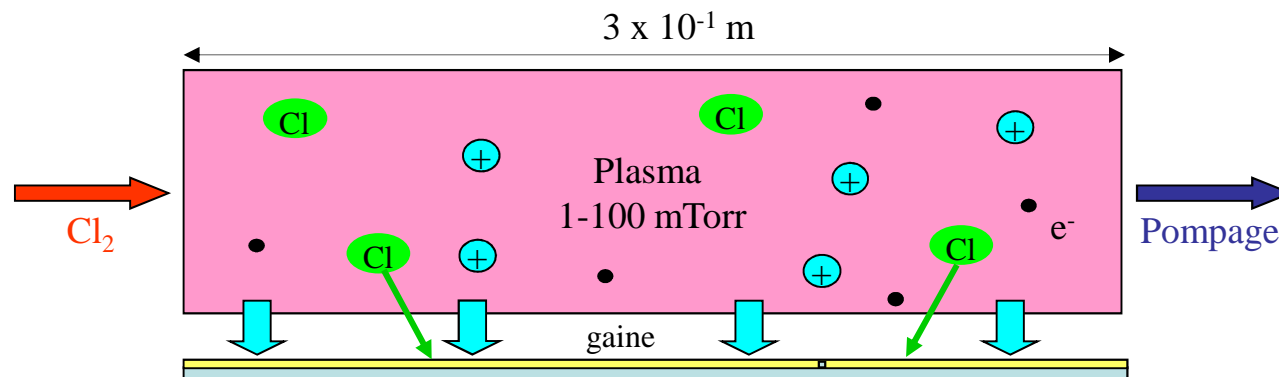


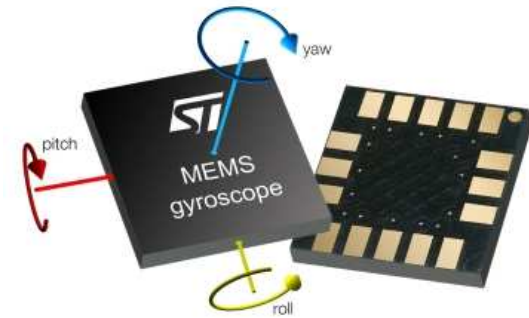
Cours Plasmas Radiofréquence Basse Pression : Des Sources aux Procédés

Emilie Despiau-Pujo

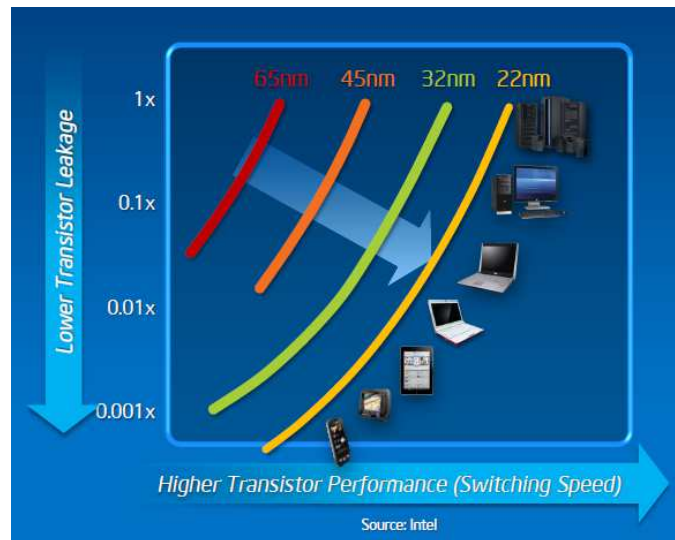
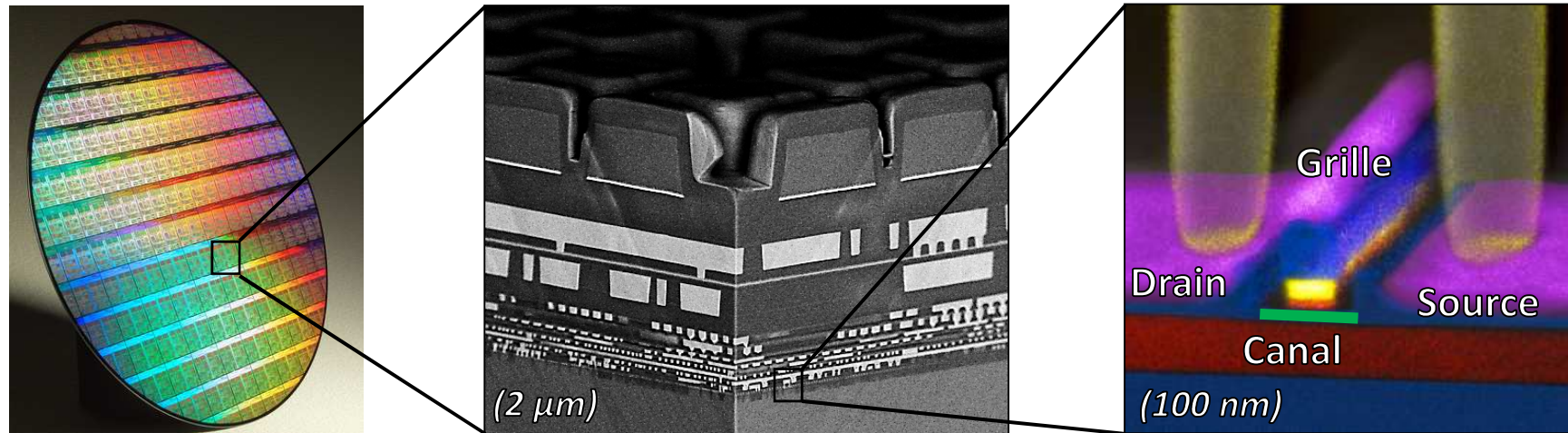
Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (CNRS/UJF) – Grenoble



L'essor de la Microélectronique

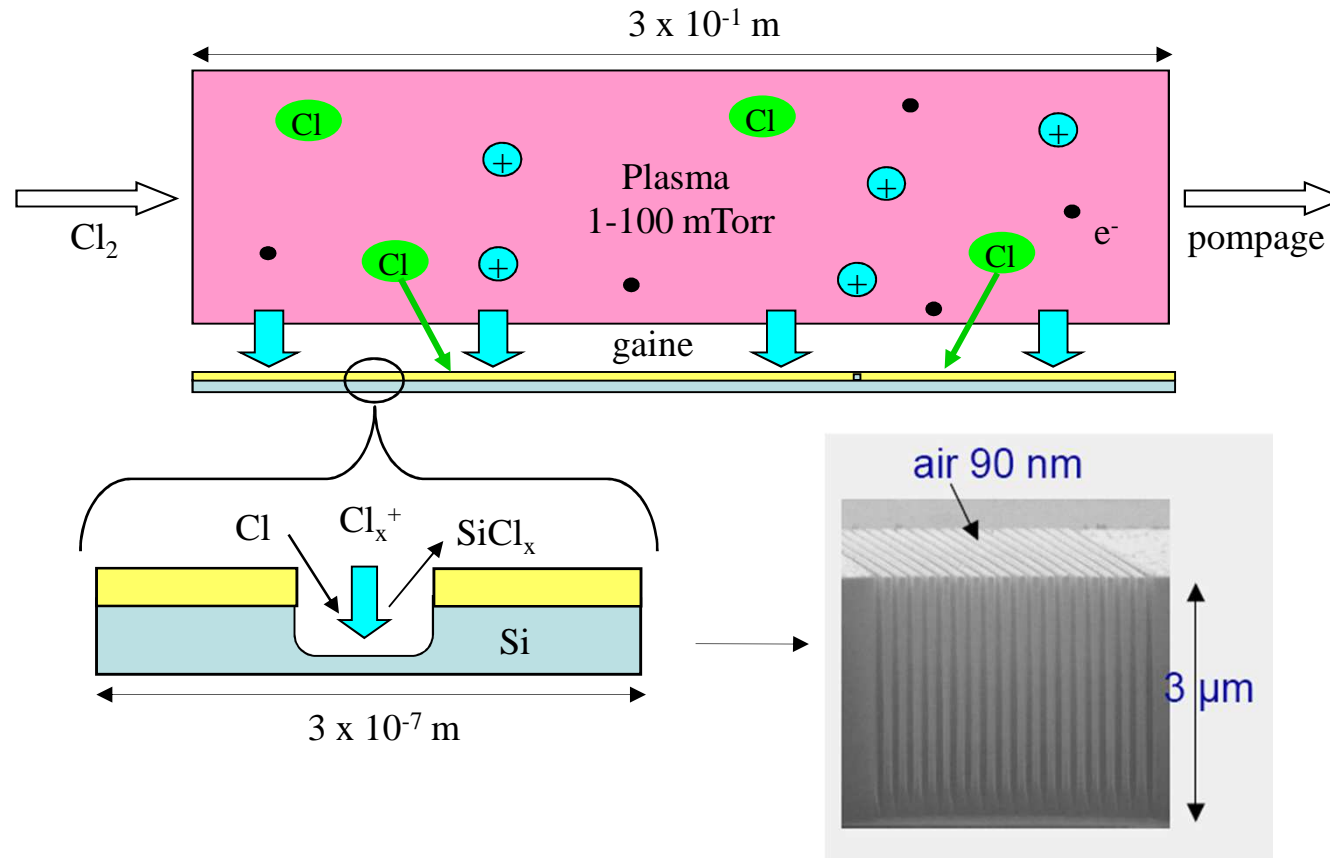


L'essor de la Microélectronique



- réalisation de structures de + en + petites
 - **dépôt** puis **gravure** d'empilements de couches ultrafines avec un contrôle au niveau nanométrique
- ⇒ décharges plasma (**RF**) basse pression

Gravure Ionique Réactive (GIR)



GIR = bombardement ionique anisotrope + attaque chimique par les réactifs radicaux
(+ formation de couches de passivation)

Plan

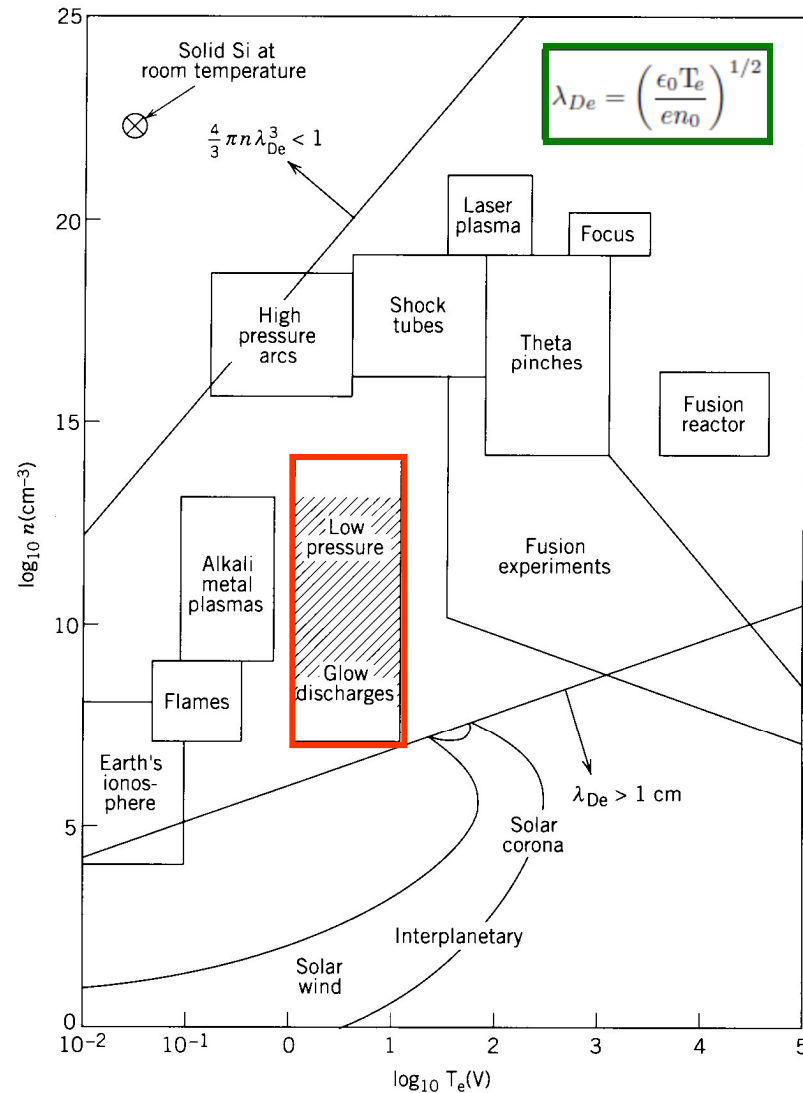
Section 1 : Physique des Décharges RF Basse Pression

- Plasmas faiblement ionisés et hors-équilibre
- Structure et dynamique du plasma (bulk et gaines)
- Gaines DC vs. Gaines RF

Section 2 : Sources Plasmas RF

- Sources capacitives simple et multifréquences (CCP)
- Sources inductives ou hautes-densités (ICP ou HDP)

Décharges RF basse pression : Des plasmas peu ionisés



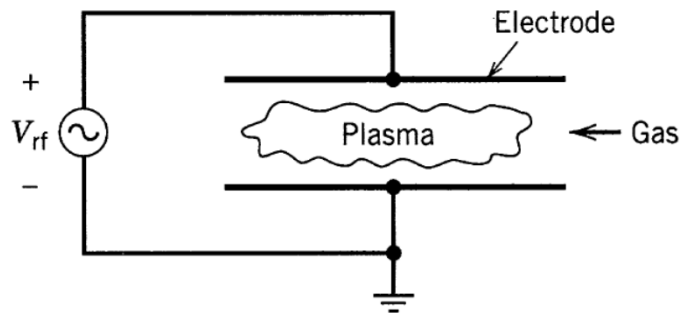
- **Plasmas : gaz ionisés**
 - totalement (fusion)
 - partiellement, degré d'ionisation :

$$x_{iz} = \frac{n_i}{N_g + n_i}$$

- **Trois types d'espèces :**
 - électrons
 - ions (positifs et négatifs)
 - neutres (réactifs/stables)
- **Décharges basse pression :** faiblement ionisées (composées principalement d'espèces neutres)

$$x_{iz} \ll 1 \quad (\sim 10^{-2} \text{ ou } 10^{-3})$$

Décharges RF basse pression : Des plasmas hors-équilibre



- créées et entretenues **électriquement** dans des **réacteurs**
- collisions particules chargées / molécules de gaz neutre
⇒ **dissociation** du gaz en précurseurs réactifs
⇒ **ionisation** des neutres entretient la décharge
- **parois** sur lesquelles les pertes en surface sont importantes

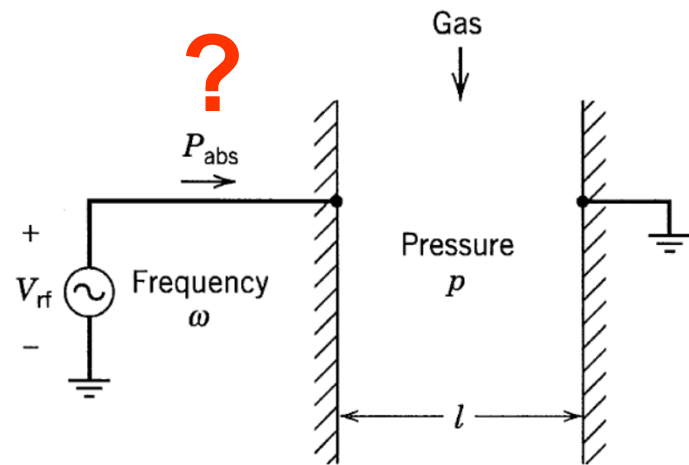
Plasmas Hors-Equilibre

- **électrons**: absorbent puissance EM et faiblement couplés avec particules lourdes ($m_e \ll m_{i,n}$)
- important couplage énergétique entre **ions**, **neutres** et **parois** du réacteur
- les e- ne sont **pas en équilibre thermodynamique** avec les ions et les neutres

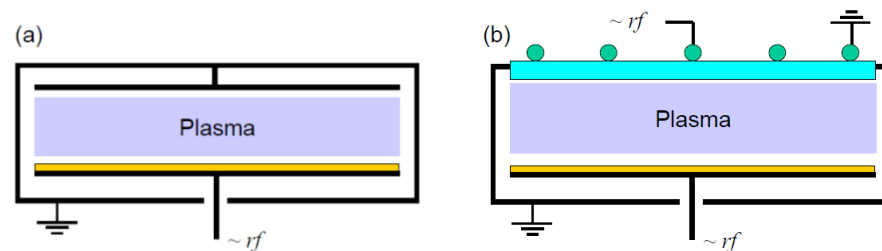
$$T_e (1-10\text{eV}) \gg T_i, T_n (\sim 300-1000\text{K})$$

Comment allumer/entretenir la décharge ?

Les décharges basse pression sont créées et entretenues **électriquement** de sorte que les e- soient accélérés et puissent **ioniser** les atomes et molécules neutres du gaz.



- **Mode de couplage de l'énergie au gaz ?**
capacitif / inductif (section 2)



- **Fréquence d'excitation ?**

DC ou basse fréquence: $f < 1\text{MHz}$

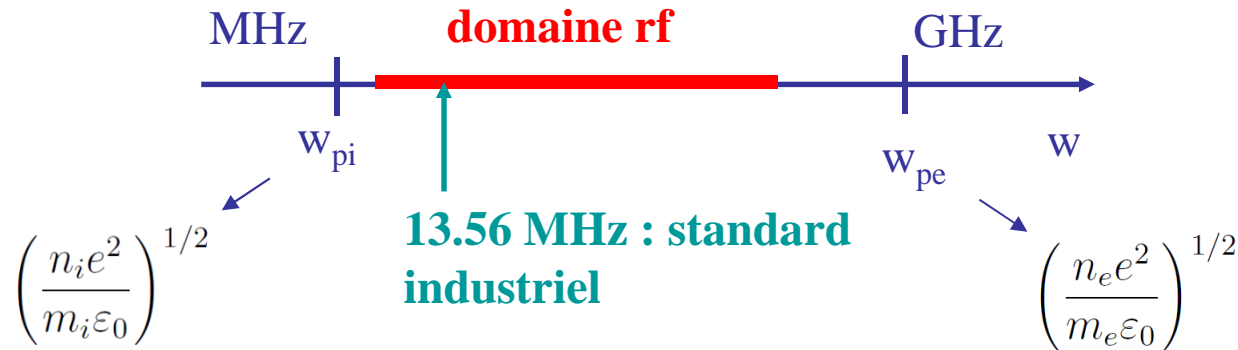
Radiofréquence : $1 < f < 500\text{MHz}$ (-> 13.56 MHz)

Micro-onde : $0.5 < f < 10\text{GHz}$ (-> 2.45 GHz)

Le domaine Radiofréquence (13.56 MHz)

- champ électrique: **même force** (qE) sur les **particules chargées** positives et négatives
- accélération γ très différente pour **ions** et **électrons** : $\gamma_e = -eE/m_e \gg \gamma_{\text{ion}} = eE/M_i$
e.g. plasma d'hydrogène : $\gamma_e / \gamma_i = M_i / m_e = 1836$!

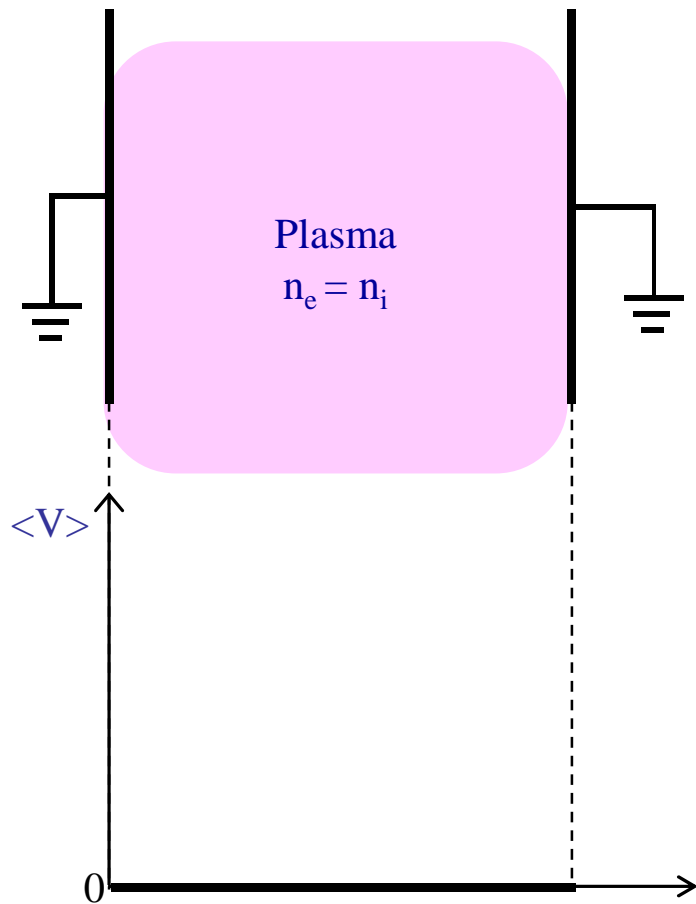
→ mobilité électronique \gg mobilité ionique



Domaine RF ($1 < f < 500\text{MHz}$)

- **Electrons** : peuvent suivre les variations instantanées du champ électrique RF
- **Ions** : répondent uniquement au champ électrique RF moyen (cf. inertie)

Interface plasma/parois : Les gaines de charge d'espace



- Une décharge existe si elle demeure quasi-neutre :

$$n_e = n_i = n_0$$

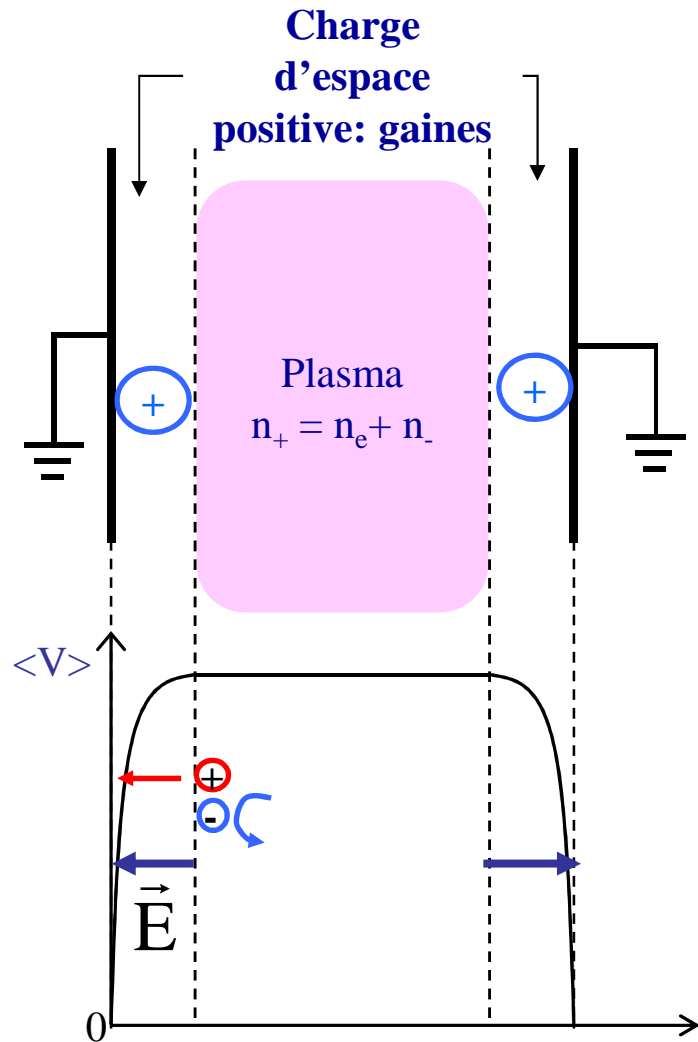
⇒ flux d'e- et ions doivent être égaux partout dans le plasma, même au niveau des parois :

$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n_0 \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad \text{doit être égal à} \quad \Gamma_i = \frac{1}{4} n_0 \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi M_i}}$$

Mais $m_e \ll M_i$ and $T_e \gg T_i \Rightarrow \Gamma_e \gg \Gamma_i$

A l'allumage de la décharge : électrons (rapides) non confinés et rapidement perdus aux parois, qui vont donc **se polariser négativement**

Interface plasma/parois : Les gaines de charge d'espace



- Une décharge existe si elle demeure quasi-neutre :

$$n_e = n_i = n_0$$

⇒ flux d'e- et ions doivent être égaux partout dans le plasma, même au niveau des parois :

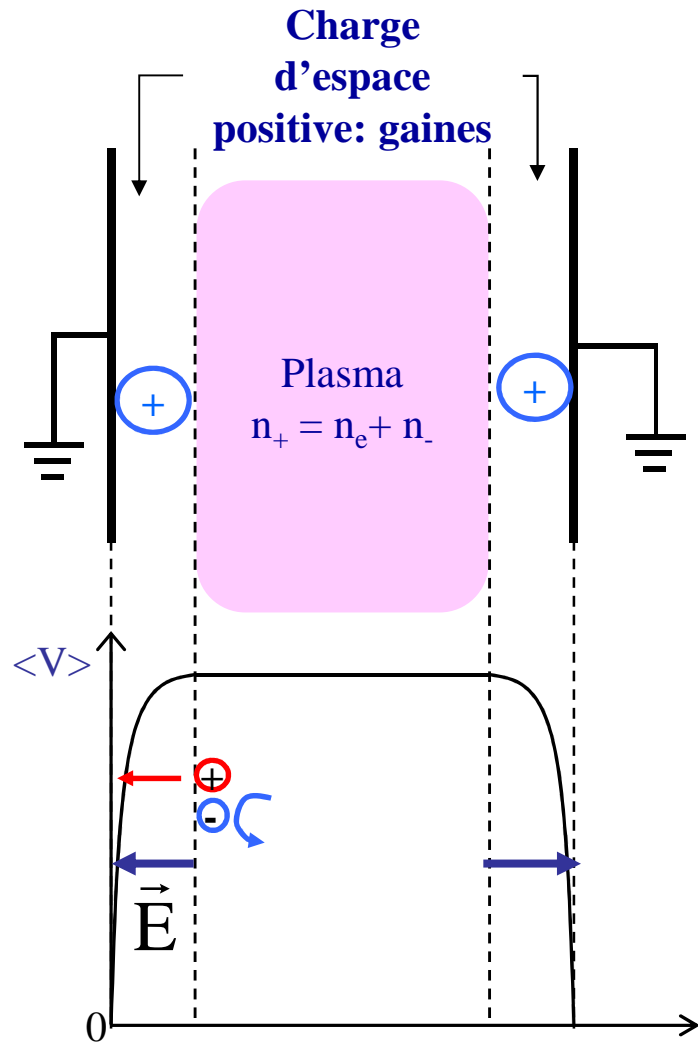
$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n_0 \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \text{ doit être égal à } \Gamma_i = \frac{1}{4} n_0 \sqrt{\frac{8kT_i}{\pi M_i}}$$

Mais $m_e \ll M_i$ and $T_e \gg T_i \Rightarrow \Gamma_e \gg \Gamma_i$

A l'allumage de la décharge : électrons (rapides) non confinés et rapidement perdus aux parois, qui vont donc **se polariser négativement**

⇒ création d'une zone de charge d'espace positive (**la gaine**) à l'interface avec les parois tq $\Gamma_e = \Gamma_i$

Interface plasma/parois : Les gaines de charge d'espace



- Gains: petites ($\approx 100\mu\text{m} - 1\text{cm}$) zones et dans lesquelles des **champs électriques importants** peuvent se développer

⇒ **électrons** (ions -) confinés au centre du plasma

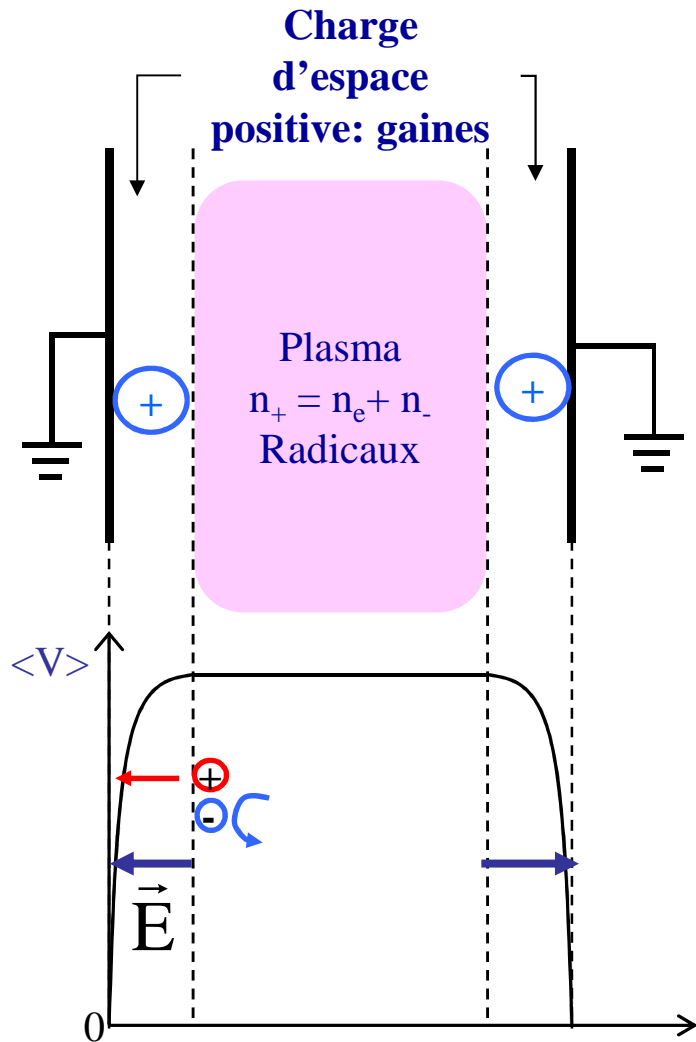
⇒ **ions positifs** accélérés vers les surfaces

- Gains: atout majeur pour **traitement de matériaux**

⇒ **conversion énergie** électrique en énergie cinétique (dirigée) transférée aux ions atteignant les surfaces

⇒ énergie de bombardement ionique (**de 1eV à 500eV**) peut être contrôlée via le potentiel de gaine V_s

Décharges basse pression : Traitement des matériaux



1) Usines chimiques miniatures ($T_e \gg T_i, T_n$)

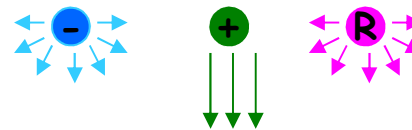
⇒ conversion à T ambiante de l'énergie électrique en **énergie chimique** (gaz dissocié en radicaux chimiquement réactifs, précurseurs de dépôt, etc.)

2) Potentiel maximum au **cœur** du plasma + **gaines**

- lents e- et ions négatifs confinés
- Ions positifs accélérés vers les surfaces

⇓ **aux surfaces**

- **Flux d'ions positifs : dirigé et énergétique**
- **Flux d'électrons : isotrope**
- **Flux de réactifs radicaux : isotrope**

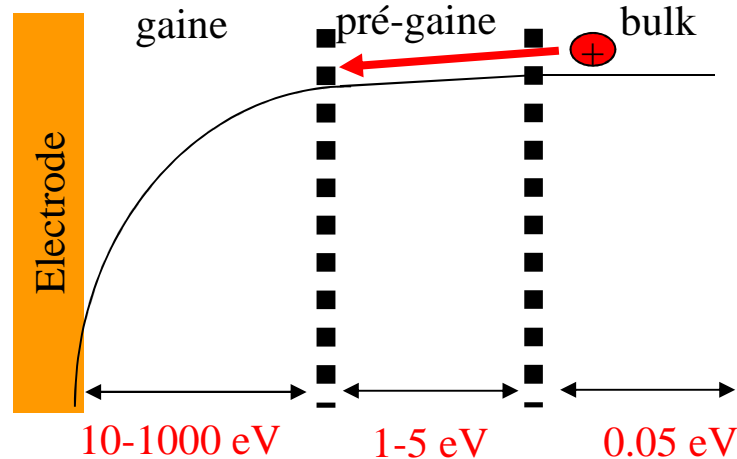


$\Gamma_n ? \Gamma_{ion} ? E_{ion} ?$

Substrat/surface

Gaines DC vs Gaines RF : Structure et caractéristiques

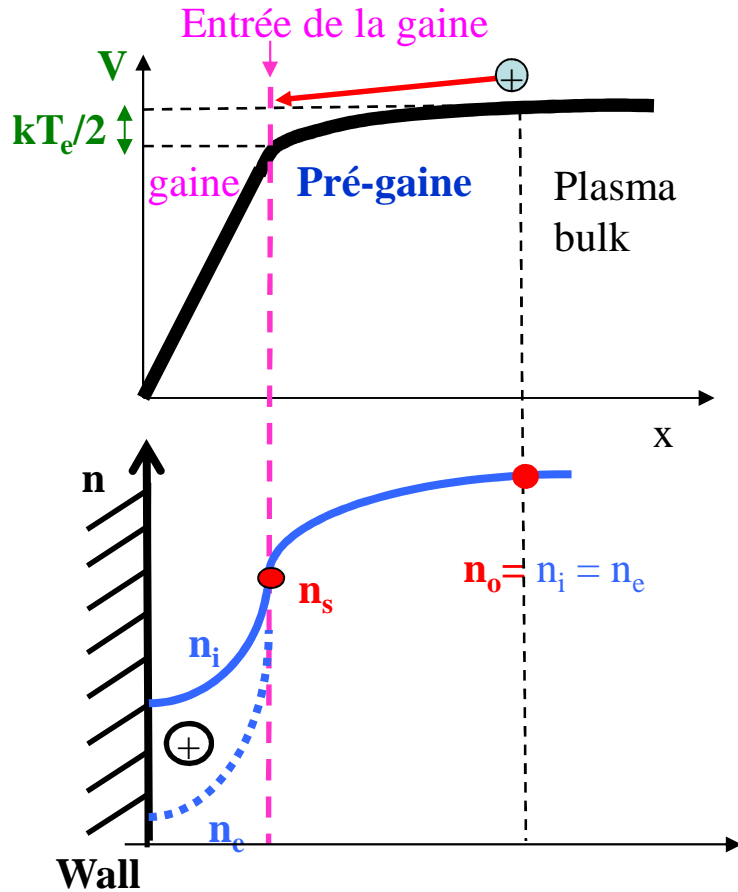
Gaines DC : Flux d'ions aux parois \equiv Critère de Bohm



- Une gaine de charge d'espace positive peut se former **seulement si** les ions pénètrent dans la gaine avec une **vitesse dirigée u_B** très supérieure à leur vitesse thermique
- Formation d'une **pré-gaine** : les ions arrivent à la frontière plasma-gaine avec une **vitesse dirigée $kT_e/2$** (faible champ E dans pré-gaine quasineutre accélère les ions vers la gaine)

\Rightarrow les ions pénètrent dans la gaine à la vitesse de Bohm (dirigée) : $u_B = (kTe/M)^{1/2}$
 \Rightarrow le flux d'ions à l'entrée de la gaine est : $\Gamma_i = n_s u_B$

Gaines DC : Distribution de potentiel et de densités



- Dans pré-gaine : quasi-neutralité maintenue mais chute de potentiel = $kT_e/2$

- Selon la relation de Boltzmann :

$$n_s = n_0 e^{(-V/T_e)} = n_0 e^{(-1/2)}$$

- densité ionique à l'entrée de la gaine : $n_s \approx 0.6n_0$

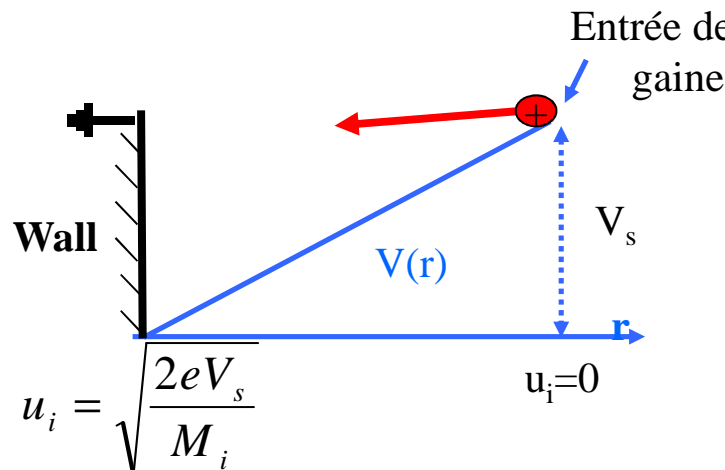
dans la gaine $\left\{ \begin{array}{l} n_e(x) = n_s e^{(-V(x)/T_e)} \\ n_i(x) = n_s u_B / u_i(x) \text{ (flux d'ions conservé)} \end{array} \right.$

⇒ Flux d'ions bombardant les surfaces: $\Gamma_I = 0.6 n_0 u_B$

⇒ Augmente linéairement avec n_0

Gaines DC : Conservation de l'énergie dans la gaine

- Les ions positifs sont accélérés par le **potentiel de gaine** V_s et gagnent de l'énergie
- En supposant les ions au repos à l'entrée de la gaine, l'**énergie cinétique ionique** E_i et la **vitesse** u_i aux parois sont déduites de la conservation de l'énergie totale (basse pression => pas de collisions)



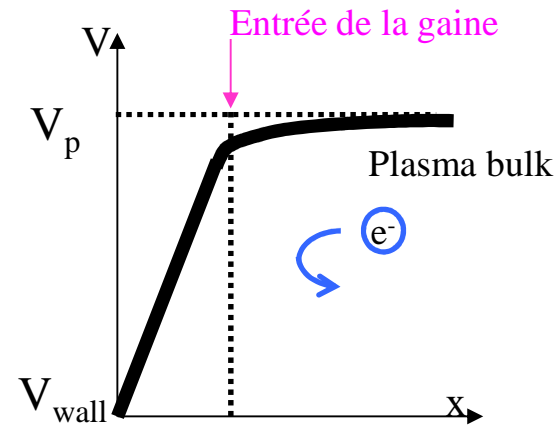
$$E_i = \frac{1}{2} M_i u_i^2 = eV_s$$

Quand il atteint les parois : l'ion a gagné une énergie $E_i = eV_s$
: la vitesse de l'ion est $u_i = (2eV_s/M_i)^{1/2}$

Gaines DC : Potentiel plasma pour les gaines faible tension

- La **chute de potentiel** dans la gaine ($V_p - V_{wall}$) s'ajuste de manière à confiner assez d'électrons dans le plasma pour que les flux d'ions et d'électrons perdus aux parois soient égaux (permettant de maintenir la quasi-neutralité) : $\Gamma_i = \Gamma_e$

$$V_p - V_{wall} = \bar{V}_s = \frac{T_e}{2} + \frac{T_e}{2} \ln\left(\frac{M}{2\pi m}\right)$$



Exemple: plasma Ar (parois à la masse)

⇒ le potentiel plasma est $V_p \approx 5.2 T_e \approx 15 \text{ V}$

⇒ e- avec énergie $< 15 \text{ eV}$ sont confinés au centre du plasma

⇒ l'énergie des ions bombardant les parois est $E_i = 15 \text{ eV}$

Gaines DC : Résumé

- le plasma tend à perdre + d' e^- que d'ions positifs aux surfaces : pour maintenir sa quasi-neutralité le plasma est protégé des surfaces par des **gaines de charge d'espace positives**.
- Grâce aux gaines les lents **e^- sont confinés** au centre du plasma tandis que les **ions positifs sont accélérés** vers les surfaces/parois.
- La **barrière de potentiel** entre le plasma et les surfaces s'ajuste de sorte que : $\Gamma_e = \Gamma_i$
- Pour un plasma d'**argon** avec parois à la masse le potentiel plasma est $V_p = 5.2 T_e = 15V$
 \Rightarrow **l'énergie des ions** bombardant les surfaces est donc $E_i = 15 \text{ eV}$
- Le **flux d'ions** bombardant les surfaces/substrats est = au **flux de Bohm** : $\Gamma_I = 0.6 n_0 u_B$
où n_0 est la densité ionique au centre du plasma

Le potentiel électrique du plasma V_p doit toujours être supérieur au potentiel de n'importe quelle surface en contact avec le plasma pour confiner ses électrons à grande mobilité

Tension RF vs DC

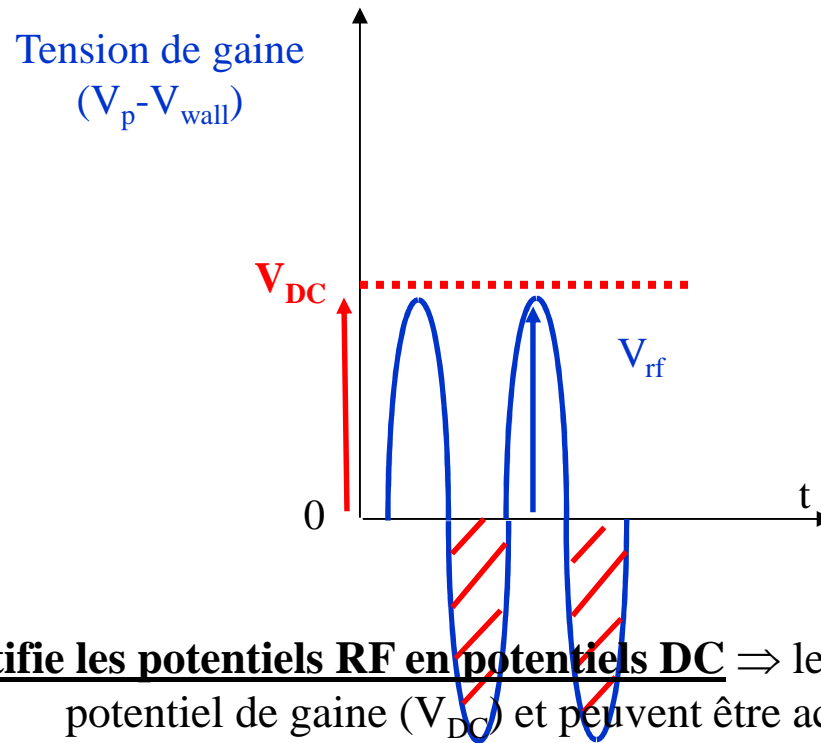
- Dans beaucoup de cas, les substrats devant être gravés sont recouverts de couches isolantes (oxydes, résines photosensibles, etc.)
- Il est donc généralement **impossible** d'utiliser :
 - des décharges DC pour la gravure
 - des tensions DC pour accélérer les ions vers le substrat
- Les **tensions RF** sont donc utilisées pour **allumer le plasma** (cf. décharges capacitatives) et pour **accélérer les ions** vers le wafer grâce aux capacités de rectification de potentiel des gaines (**tension d'auto-polarisation**)
- Ainsi, la tension de gaine **oscille en permanence** à la fréquence d'excitation RF

Gaines RF et tension d'auto-polarisation (1)

Gaines nécessaires pour confiner les électrons

⇒ chute de potentiel à travers la gaine ($V_s = V_p - V_{\text{wall}}$) doit toujours être **positive**.

⇒ si le potentiel de gaine **oscille** avec une amplitude V_{rf} , une **tension DC** $V_{\text{DC}} \approx V_{\text{rf}}$ doit se développer dans la gaine pour empêcher la tension de gaine de devenir négative.



La gaine rectifie les potentiels RF en potentiels DC ⇒ les ions répondent à la valeur moyenne du potentiel de gaine (V_{DC}) et peuvent être accélérés à forte énergie.

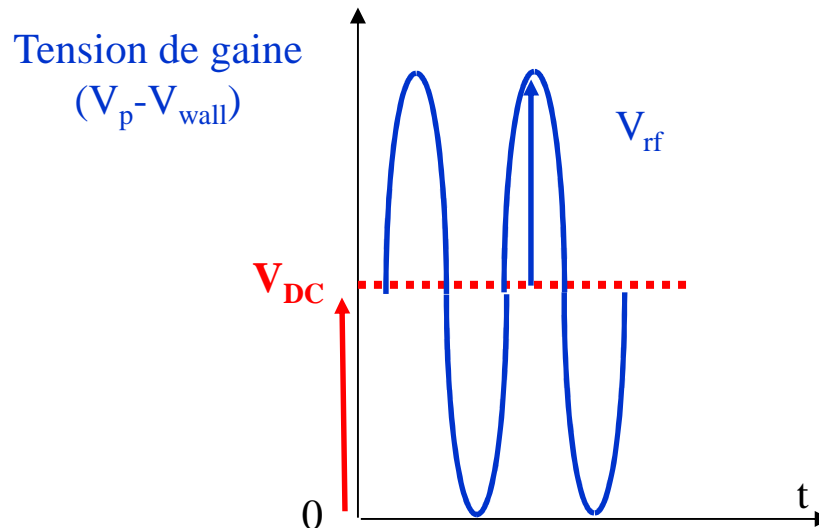
V_{DC} est appelé la **tension d'auto-polarisation** et est noté V_{bias} dans la suite.

Gaines RF et tension d'auto-polarisation (1)

Gaines nécessaires pour confiner les électrons

⇒ chute de potentiel à travers la gaine ($V_s = V_p - V_{\text{wall}}$) doit toujours être **positive**.

⇒ si le potentiel de gaine **oscille** avec une amplitude V_{rf} , une **tension DC** $V_{\text{DC}} \approx V_{\text{rf}}$ doit se développer dans la gaine pour empêcher la tension de gaine de devenir négative.



Tension de gaine = barrière que les e- doivent passer pour atteindre la surface.

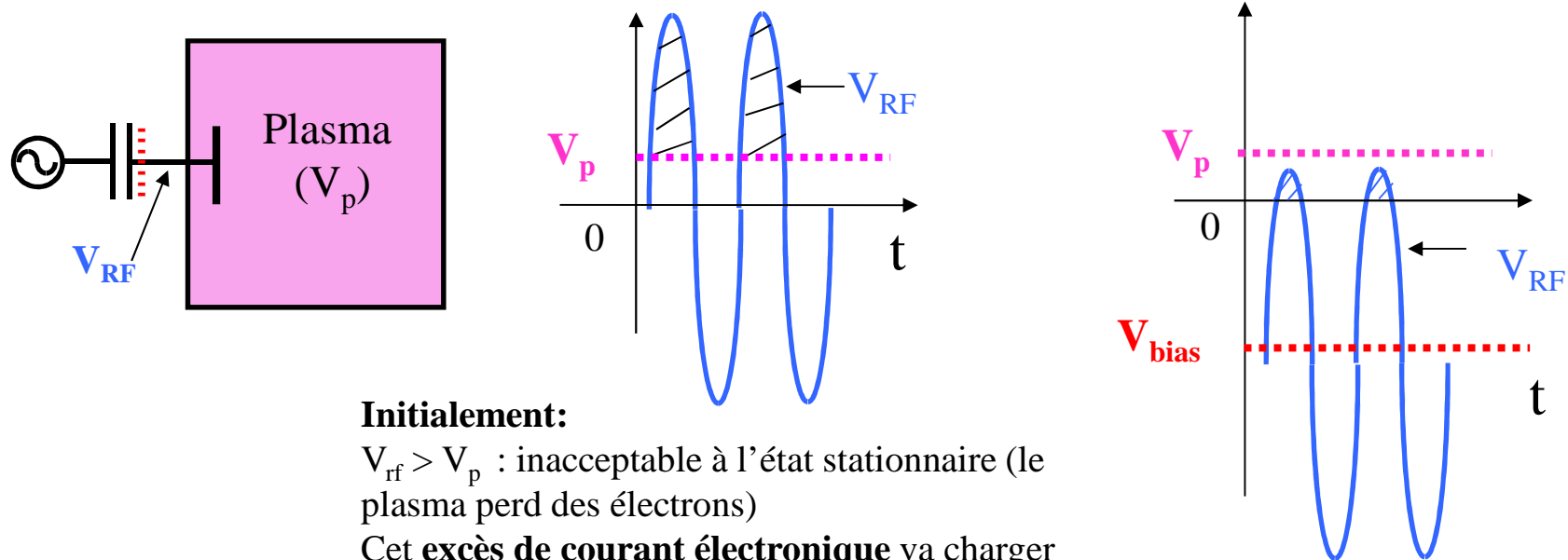
⇒ flux d'e- atteignant les parois va être modulé dans le temps et la valeur de V_{DC} est telle que $\langle \Gamma_e \rangle = \Gamma_i$ où $\langle \Gamma_e \rangle$ est le flux d'e- moyenné sur un cycle RF.

La gaine rectifie les potentiels RF en potentiels DC ⇒ les ions répondent à la valeur moyenne du potentiel de gaine (V_{DC}) et peuvent être accélérés à forte énergie.

V_{DC} est appelé la **tension d'auto-polarisation** et est noté V_{bias} dans la suite.

Gaines RF et tension d'auto-polarisation (2)

Exemple: Une petite électrode à laquelle on applique une tension V_{RF} à travers une **capacité de blocage** en série est immergée dans un plasma au potentiel V_p



Initialement:

$V_{rf} > V_p$: inacceptable à l'état stationnaire (le plasma perd des électrons)

Cet **excès de courant électronique** va charger négativement la capacité de blocage.

La gaine rectifie le potentiel RF en potentiel DC :

Les **ions** qui ne répondent qu'à la valeur **moyenne** du potentiel sont accélérés vers l'électrode par la **tension d'auto-polarisation dc** et acquièrent une **énergie** eV_{bias} .

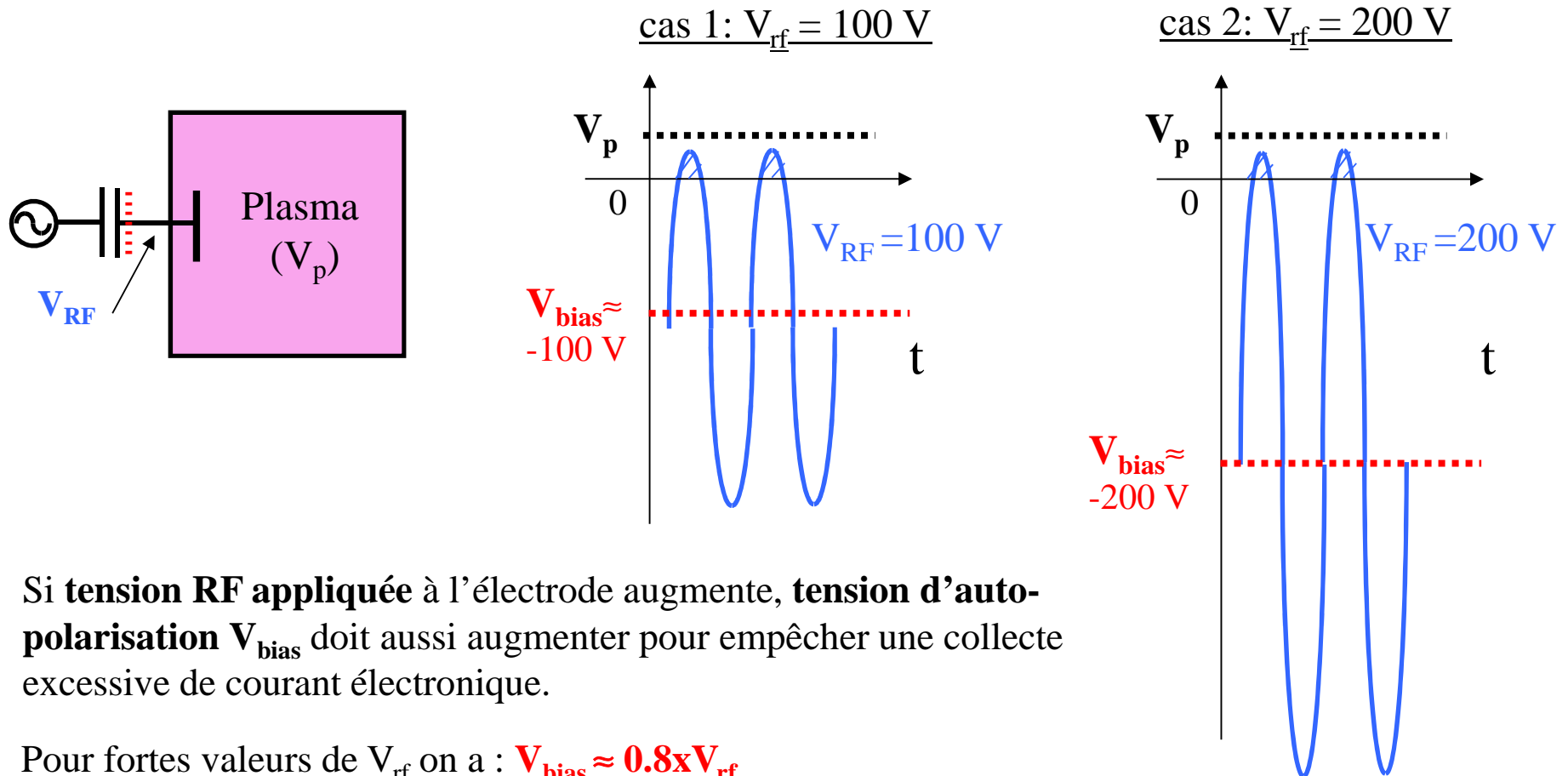
A l'état stationnaire:

La capacité se polarise à -

V_{bias} réduisant ainsi la

perte d'électrons : $\langle \Gamma_e \rangle = \Gamma_i$

Gaines RF et tension d'auto-polarisation (3)



Si tension RF appliquée à l'électrode augmente, tension d'auto-polarisation V_{bias} doit aussi augmenter pour empêcher une collecte excessive de courant électronique.

Pour fortes valeurs de V_{rf} on a : $V_{bias} \approx 0.8 \times V_{rf}$

- ⇒ énergie des ions bombardant l'électrode $E_i = eV_{bias}$ contrôlable via la tension d'excitation V_{RF}
- ⇒ méthode de contrôle de l'énergie des ions bombardant les substrats dans réacteurs ICP

Épaisseur et capacité de la gaine

- quand $V_s \gg T_e$ l'épaisseur de la gaine $s(\text{cm})$ est : $s = \lambda_D \left(\frac{e V_s}{k T_e} \right)^{3/4} \approx 500 \frac{V^{3/4}}{\sqrt{n_e} T_e^{1/4}}$

⇒ épaisses gaines (1cm) observées dans plasmas basse-densité (LDP)

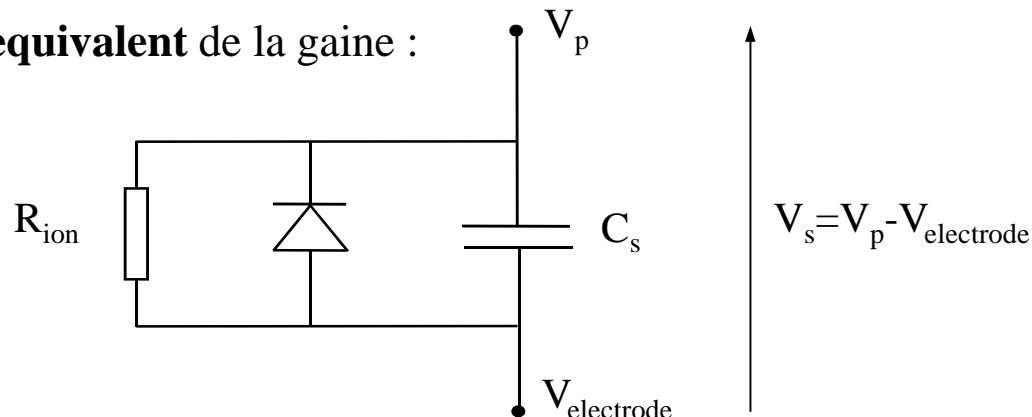
⇒ bien + fines (100s μm) dans plasmas hautes densités (HDP)

- Dans **gaines haute tension**, pas d'électrons dans la gaine pendant la majeure partie du cycle RF (e- atteignent l'électrode par « pulses » quand la gaine s'effondre)

⇒ courant dans la gaine dominé par un courant de déplacement $J_D = \epsilon_0 dE/dt$

⇒ **gaine se comporte comme un condensateur de capacité $C_s = \epsilon_0 A/s$** (A surface de la gaine)

- **Circuit équivalent** de la gaine :



Gaines RF : Résumé

- Les gaines **rectifient** le potentiel RF en potentiel DC
⇒ si tension V_{rf} imposée dans la gaine, une **tension d'auto-polarisation** $V_{bias} \approx V_{rf}$ apparaît dans la gaine pour empêcher la perte excessive d'électrons à forte mobilité : $\Gamma_i = \langle \Gamma_e \rangle$
- A cause de leur inertie, les **ions** répondent uniquement à la **valeur moyenne du potentiel**
⇒ ions **accélérés** par la tension d'auto-polarisation et peuvent acquérir de fortes énergies
⇒ sans collisions dans la gaine, les ions gagnent une **énergie cinétique** eV_{bias} en traversant la gaine : c'est la clé pour **contrôler l'énergie des ions bombardant le substrat**
- Le flux d'ions atteignant les surfaces :
⇒ **constant** dans le temps
⇒ donné par le **flux de Bohm** : $\Gamma_i = 0.6n_0u_B$
- Au contraire, les **électrons** sont perdus aux parois uniquement **pendant une petite partie du cycle RF** (quand la barrière de potentiel passe par un minimum).
- Aux fréquences typiques (13 MHz) et à faible densité ionique, la gaine RF se comporte essentiellement comme **un condensateur**.

Plan

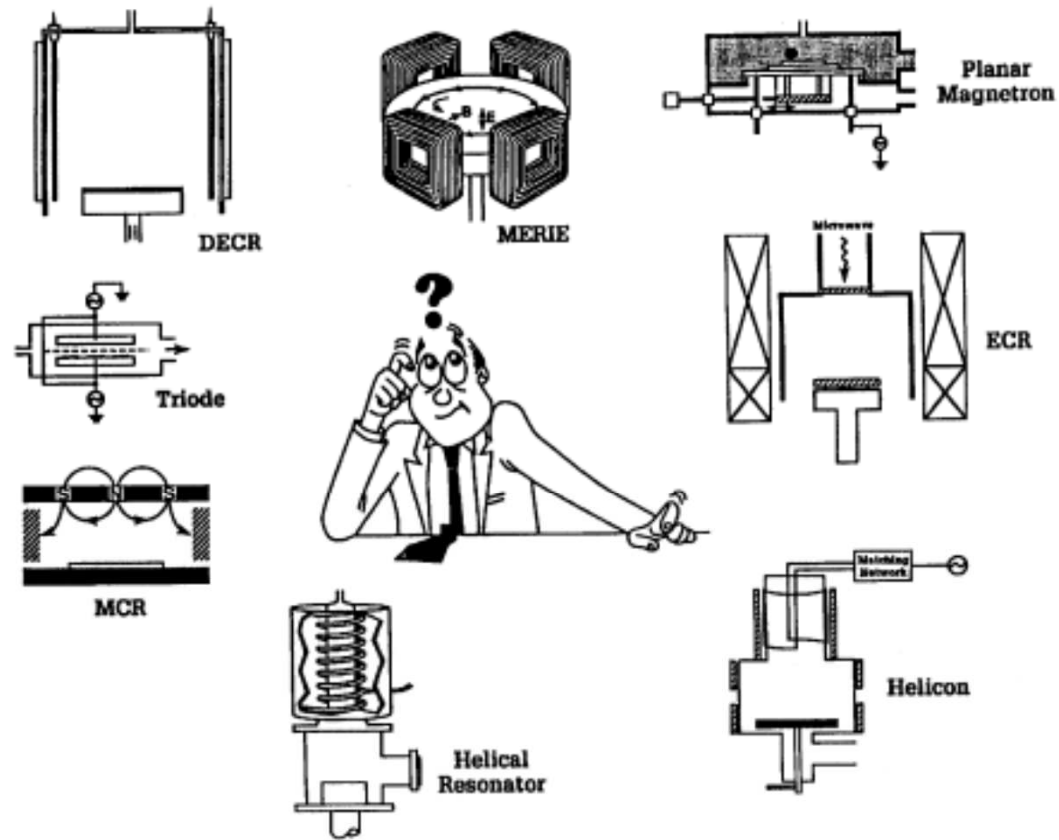
Section 1 : Physique des Décharges RF Basse Pression

- Plasmas faiblement ionisés et hors-équilibre
- Structure et dynamique du plasma (bulk et gaines)
- Gains DC vs. Gains RF

Section 2 : Sources Plasmas RF

- Sources capacitives simple et multifréquences (CCP)
- Sources Inductives ou Hautes-densités (ICP ou HDP)

Choisir son équipement plasma



- How about inductive? (figure published in 1991)

Sources plasma RF pour la Micro-électronique (1)

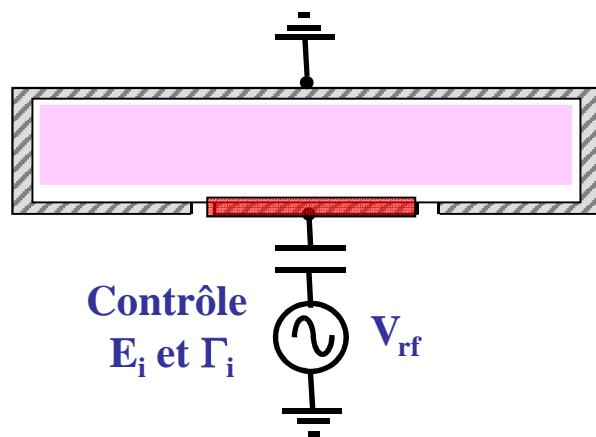
- différenciées par **mode de couplage** de la puissance électrique (champs EM RF) au plasma
- **forme et intensité des champs** EM RF (donc efficacité du chauffage des e-) dépend de la structure d'excitation

Plasmas à Couplage Capacitif (CCP)

Faibles densités (10^9 - 10^{10} cm⁻³)

Puissance couplée capacitivement au plasma

Faible Γ_i et fortes E_i

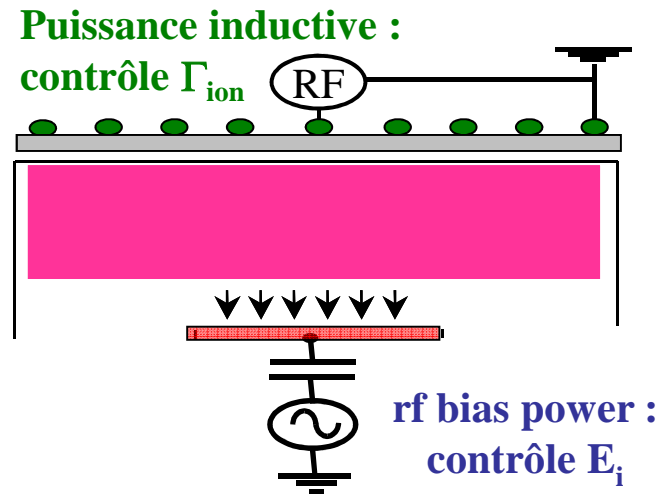


Plasmas à Couplage Inductif (ICP ou HDP)

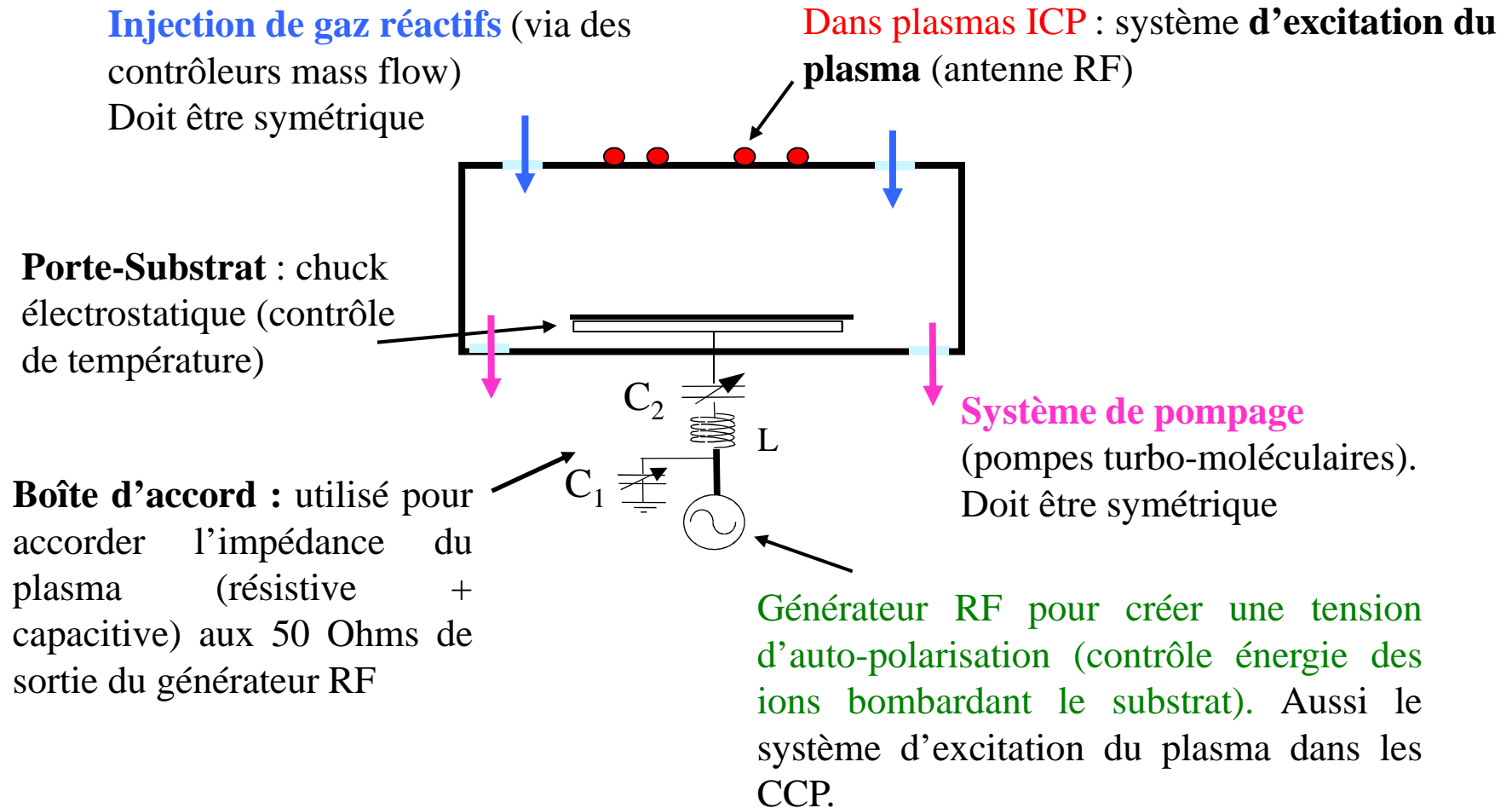
Hautes densités (10^{10} - 10^{12} cm⁻³)

Puissance couplée inductivement au plasma

Fort Γ_i et basses E_i



Sources plasma RF pour la Micro-électronique (2)



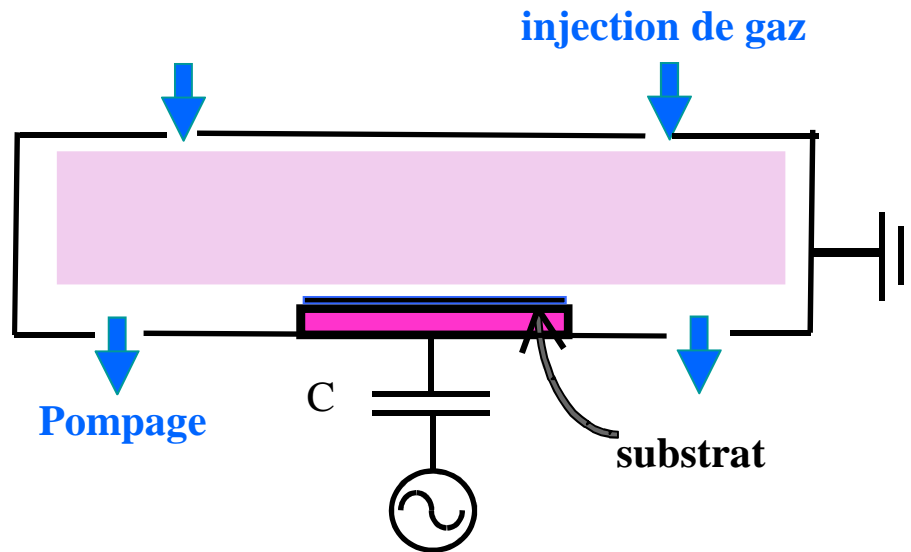
Sources/Réacteurs plasma : Excitation RF

- Tensions RF utilisées :
 - i) pour **créer le plasma** (dans décharges capacitives)
 - ii) **et/ou** pour **accélérer les ions vers le substrat** grâce aux propriétés de rectification de potentiel des gaines (tension d'auto-polarisation)
- La puissance est couplée au substrat via une **capacité de blocage** placée en série avec le générateur. Celui-ci bloque tout courant DC et assure que le courant d'ions positifs soit égal au courant électronique (moyenné dans le temps) : $\langle \Gamma_e \rangle = \Gamma_i$
- La capacité peut se charger négativement et une **tension d'auto-polarisation** peut se développer permettant ainsi la gravure de substrats isolants
- **13.56 MHz** et ses harmoniques sont les fréquences typiquement utilisées dans les applications industrielles

Plasmas à Couplage Capacitif (CCP)

Réacteur à couplage capacitif basse densité (CCP)

- premiers réacteurs utilisés pour la **gravure ionique réactive** dans les années **70-80**
- 2 **plaques métalliques polarisées** (électrodes) par tension RF et alimentées par un générateur simple fréquence (13.56 MHz)
- **substrat** placé sur l'électrode polarisée (<100mT)



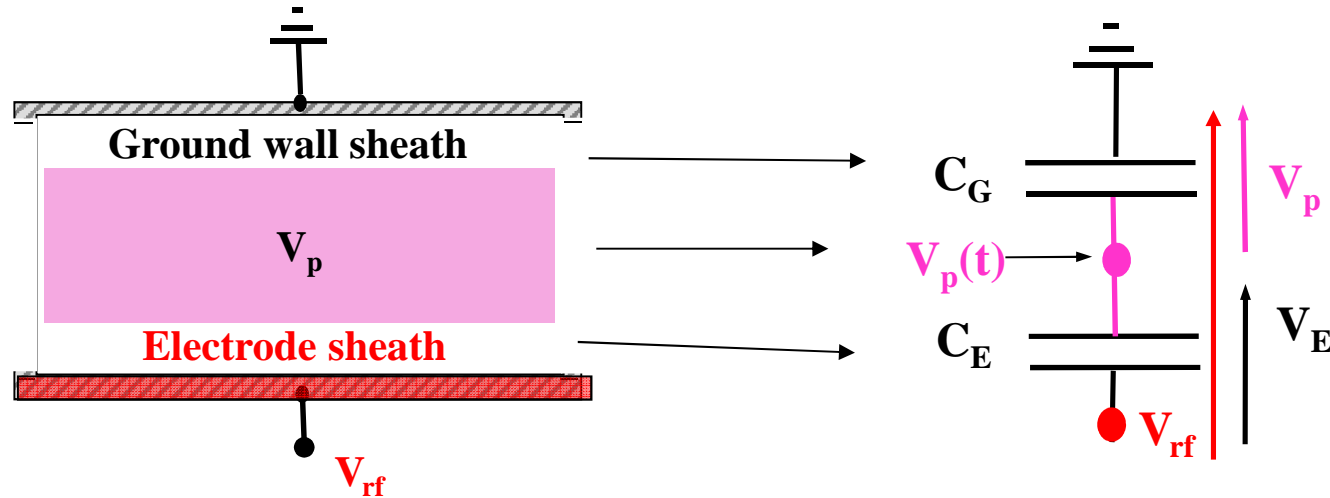
L'amplitude de la tension RF entre les 2 plaques (électrodes) **détermine à la fois l'énergie et le flux** des ions bombardant le substrat...

Réacteur à couplage capacitif basse densité (CCP)

On considère un circuit RF équivalent à un réacteur à couplage capacitif :

H1: le plasma est un conducteur parfait

H2 : les impédances de gaine (Z_E & Z_G) sont capacitives ($V_p(t)$ -> tension sinusoïdale)



- La tension RF V_{rf} appliquée à l'électrode doit être partagée entre les 2 gaines : $V_{rf} = V_E + V_p$

$$\frac{V_p(t)}{V_{rf}(t)} = \frac{Z_G}{Z_G + Z_E}$$

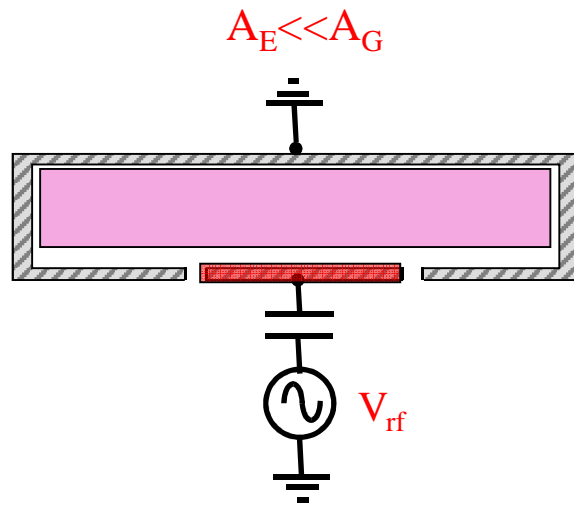
- $Z = 1/(jC\omega) \sim s/(A\omega)$ où s est l'épaisseur de la gaine et A la surface de l'électrode

$$\frac{V_p(t)}{V_{rf}(t)} = \frac{A_E}{A_G + A_E}$$

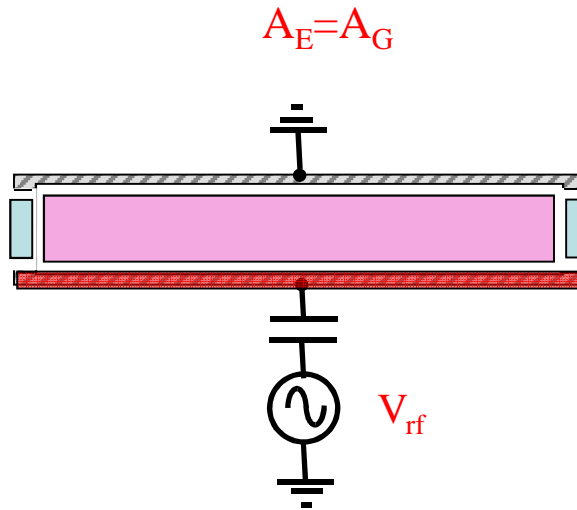
Réacteur Plasma Capacitif : 2 cas

La surface de l'électrode de puissance A_E peut être très petite devant la surface des parois à la masse A_G (réacteur asymétrique) ou comparable (réacteur symétrique) \Rightarrow comportement de V_p complètement différent

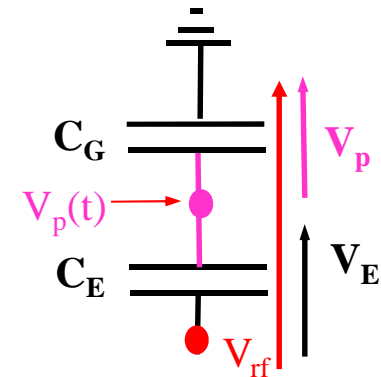
1) Réacteur asymétrique



2) Réacteur symétrique



3) Circuit équivalent



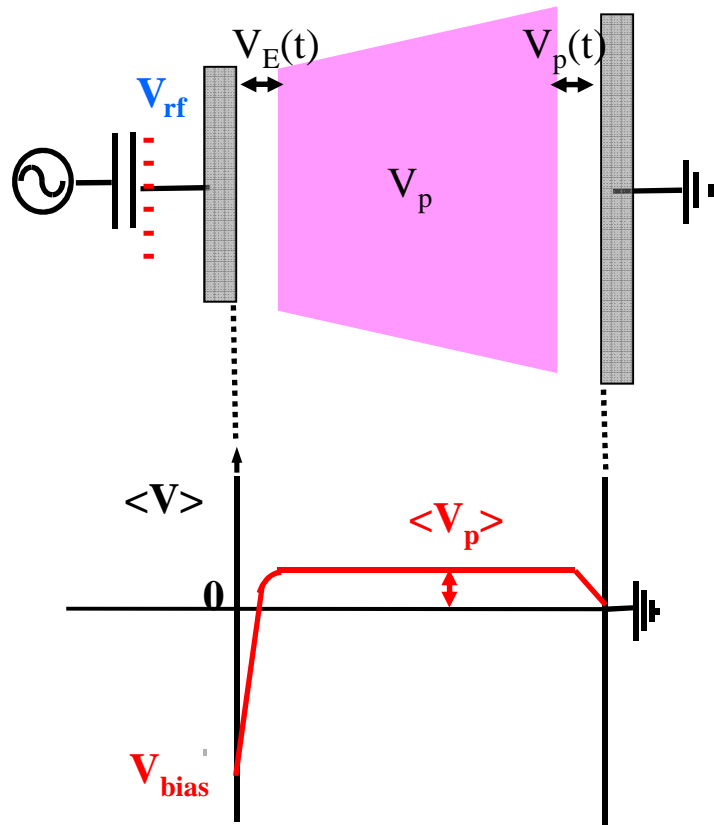
$$\frac{V_p(t)}{V_{rf}(t)} = \frac{A_E}{A_G + A_E}$$

• $A_G \gg A_E$ (système asymétrique) $\Rightarrow V_p(t) \ll V_{rf}(t)$
 \Rightarrow modulation de V_p **négligeable**

• $A_G \approx A_E$ (système symétrique) $\Rightarrow V_p(t) \approx 0.5 V_{rf}(t)$
 \Rightarrow **forte** modulation de V_p

CCP : Réacteur asymétrique (1)

Valeur moyenne tensions inter-électrodes :



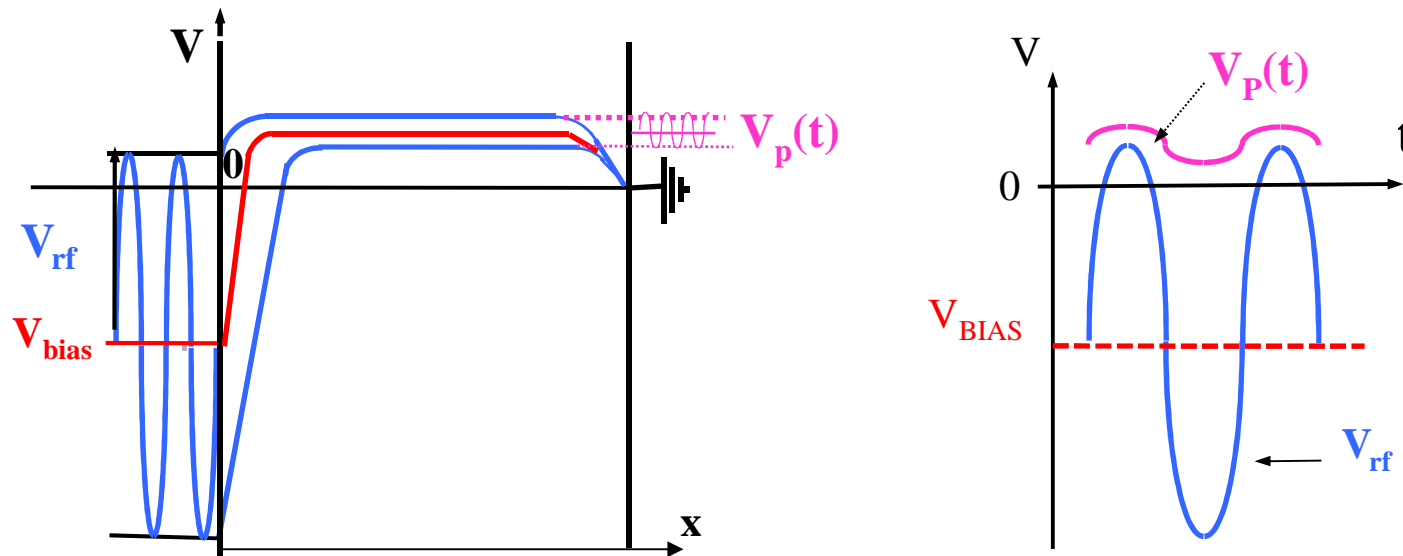
- **Modulation RF de $V_p \rightarrow 0$**
e.g. $\langle V_p \rangle_t \approx 15 \text{ V}$ (gaine faible tension faisant face aux parois à la masse)
- $V_E \gg V_p$
 - \Rightarrow forte modulation de la tension RF dans la gaine faisant face à l'électrode de puissance
 - \Rightarrow forte tension d'auto-polarisation
 - \Rightarrow la capacité se charge à $-V_{bias} \approx V_{rf}$

- petite **électrode de puissance** bombardée par ions **énergétiques** w/ $E_i \approx V_{bias} \approx V_{rf}$
- **parois du réacteur** bombardées par ions de **faible énergie** $\approx V_p = 15 \text{ eV}$

CCP : Réacteur asymétrique (2)

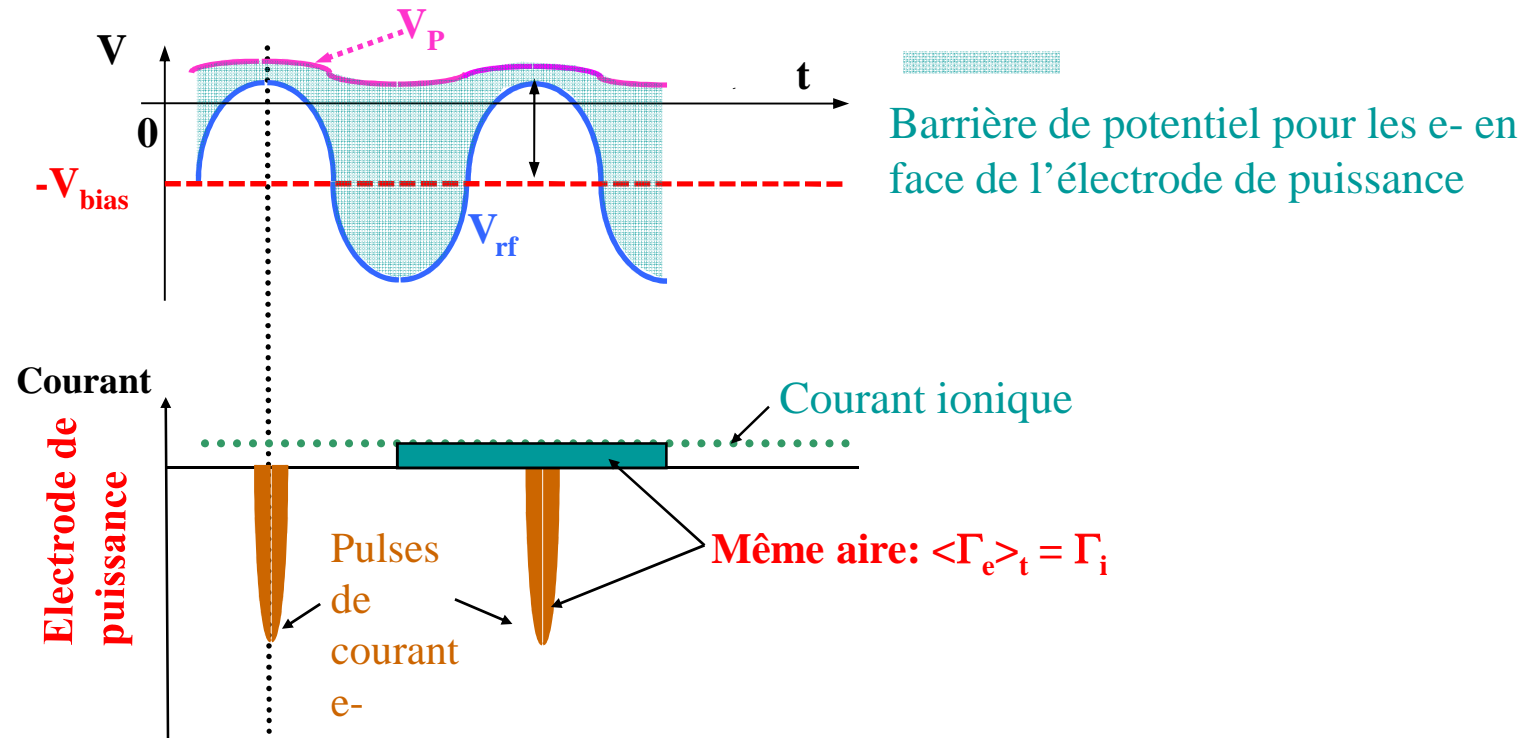
Dépendance temporelle des tensions

$$V_E(t) \gg V_p(t)$$

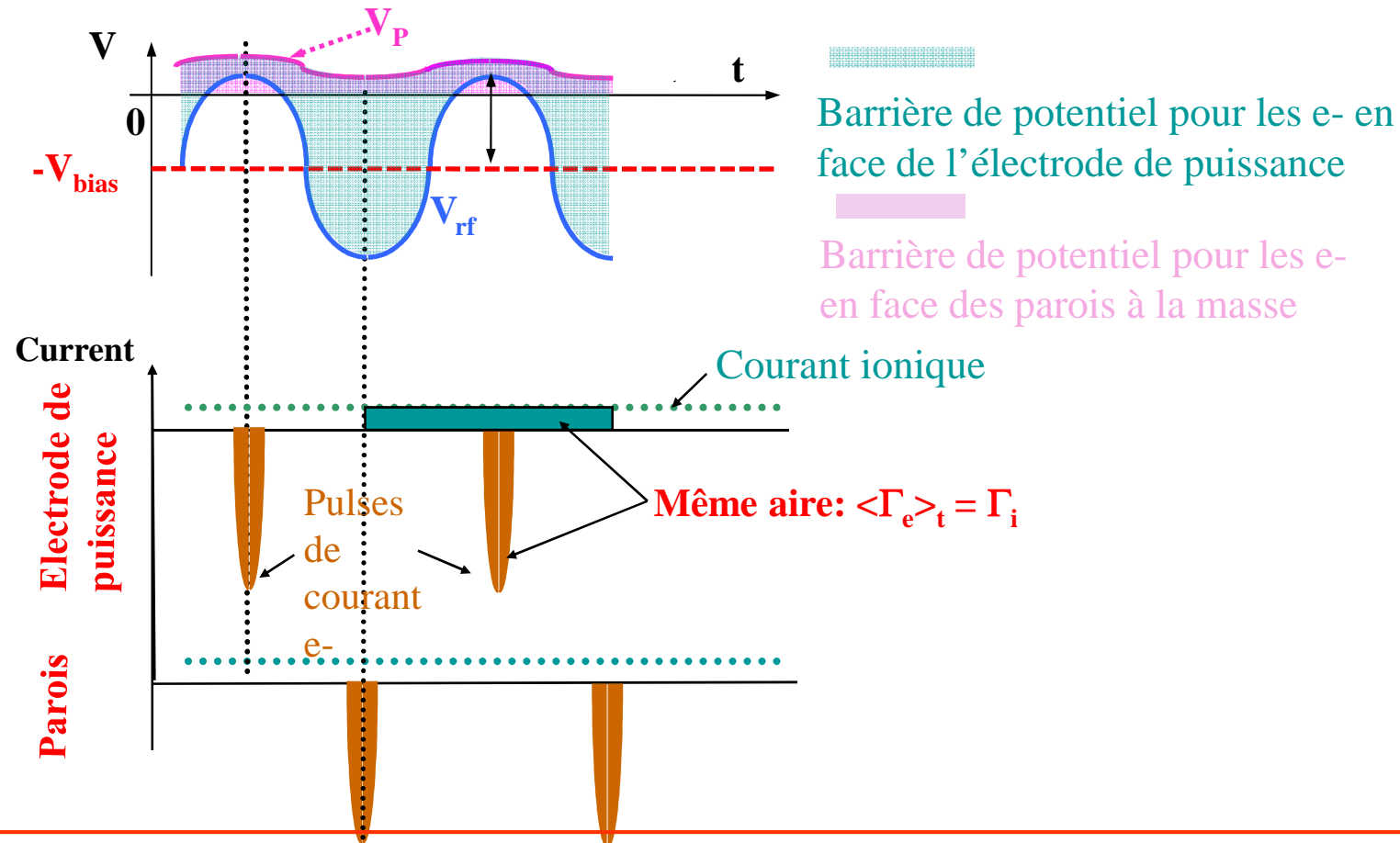


A tout instant t , $V_p(t)$ demeure **supérieur au potentiel de surface le + élevé**
en contact avec le plasma

Réacteur CCP asymétrique : Flux d'ions et d'e- vers l'électrode

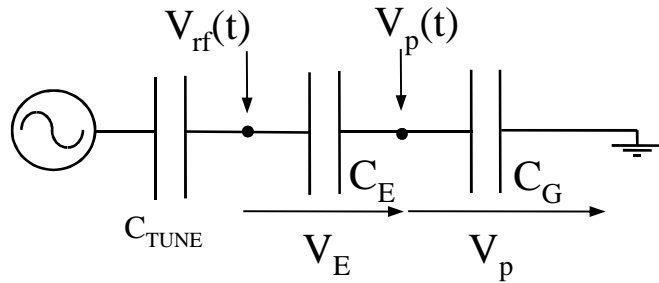


Réacteur CCP asymétrique : Flux d'ions et d'e- vers l'électrode



- Ions perdus **continuellement** aux parois du réacteur et sur l'électrode RF
- **Pulses** de courant **électronique** atteignent l'électrode RF **uniquement** quand la tension de gaine s'effondre

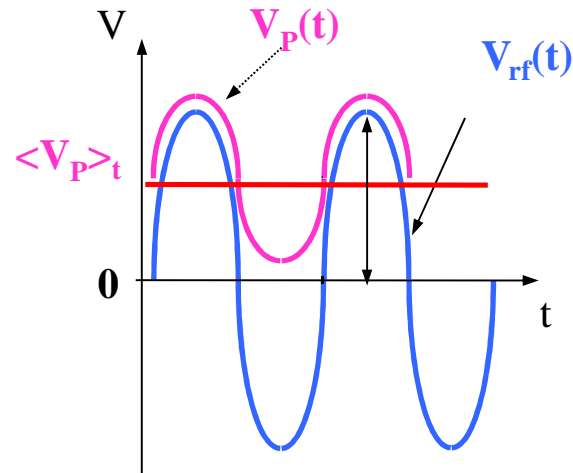
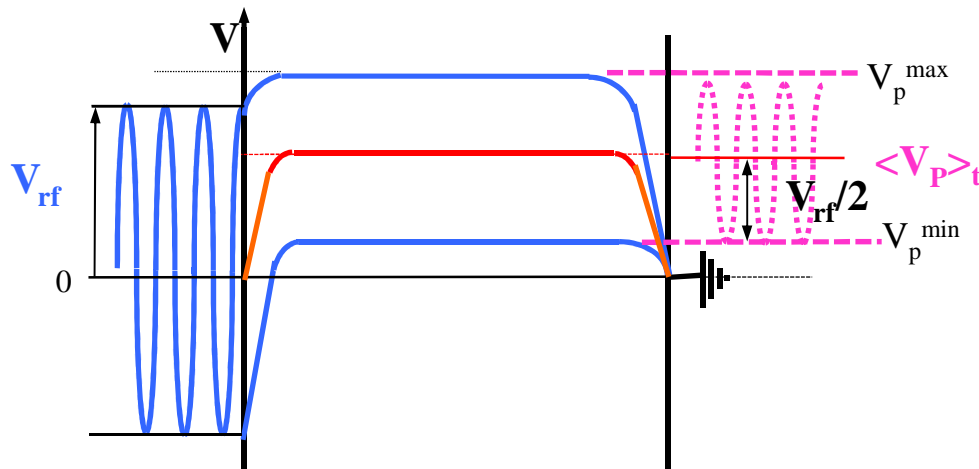
CCP : Réacteur symétrique



- Même surface d'électrodes : $A_E = A_G$
- Même capacité pour les 2 électrodes
 $\Rightarrow C_E = C_G \Rightarrow V_E = V_p(t) = V_{rf}/2$

\Rightarrow Forte **modulation de V_p** / parois à la masse.

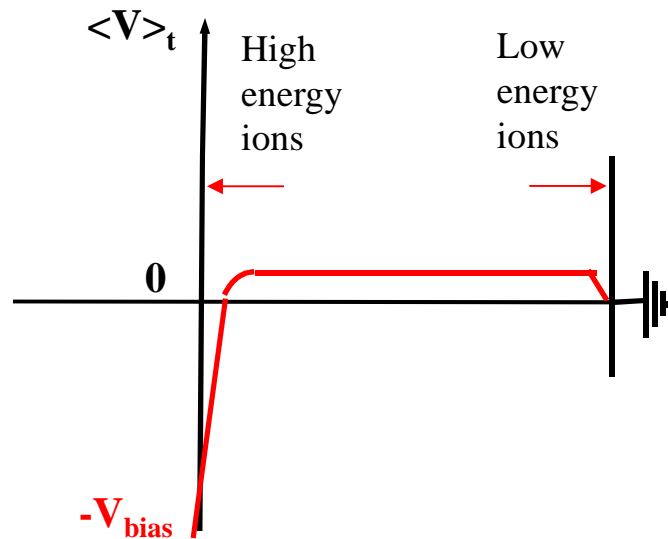
\Rightarrow Forte **tension d'auto-polarisation** dans les 2 gaines mais ici la capacité ne se charge pas négativement : c'est la valeur moyenne du **potentiel plasma V_p** qui s'élève.



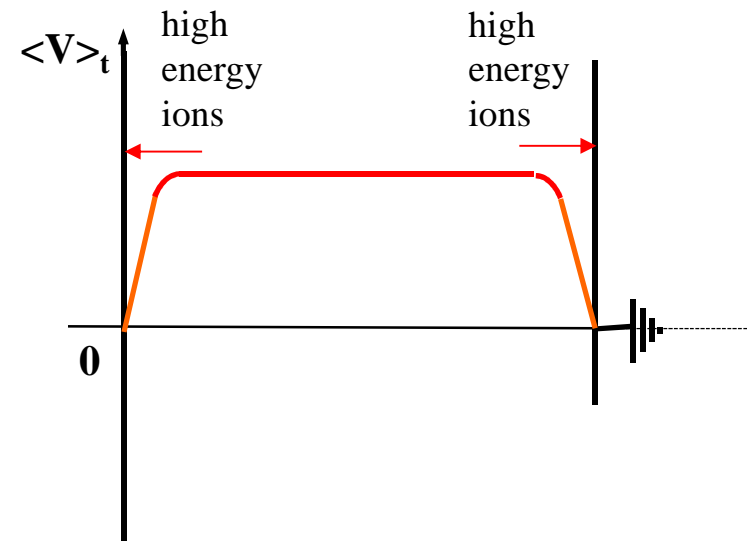
\Rightarrow **2 électrodes bombardées par ions énergétiques alors qu'une seule alimentée par la RF !**

Réacteurs CCP Symétrique et Asymétrique: Résumé

Asymétrique



Symétrique



- **Dans un réacteur asymétrique**, la + petite électrode est bombardée par des ions énergétiques (énergie $eV_{\text{bias}} \approx eV_{\text{rf}}$) \Rightarrow l'énergie des ions bombardant le substrat peut être contrôlée par la tensions RF V_{rf} . Les parois du réacteur sont bombardées par des ions de faible énergie (V_p).

- **Dans un réacteur symétrique**, il n'y a pas d'auto-polarisation de la capacité mais la valeur moyenne du potentiel plasma V_p est élevée : à la fois le substrat et l'électrode opposée sont bombardés par des ions énergétiques (énergie $eV_{\text{rf}}/2$).

CCP à 13.56 MHz : Limitations

Dans un réacteur asymétrique la tension d'auto-polarisation peut être si haute que la majeure partie de la puissance RF est absorbée par les ions et non pas par les électrons :

$$P_{rf} \approx I_i \times V_{bias} = Ae\Gamma_{ion} V_{bias} \Rightarrow \Gamma_{ion} \approx \frac{P_{rf}}{AeV_{bias}}$$

- 1) V_{bias} est grand $\Rightarrow \Gamma_{ion}$ (n_0) est petit : **CCP = plasma basse densité (10^9 - 10^{10} cm⁻³)**
- 2) Si P_{rf} augmente, à la fois n_0 (flux d'ions) et V_{bias} (énergie ionique) augmentent
 \Rightarrow **impossible de contrôler indépendamment le flux et l'énergie des ions dans un CCP**
- 3) CCP peuvent fonctionner uniquement à **relativement haute pression** (> 20 mTorr) où libre parcours moyen des e- petit devant la distance inter-électrode (typiquement 2-5 cm)
 \Rightarrow **gaine collisionnelle = perte de directionalité des ions**

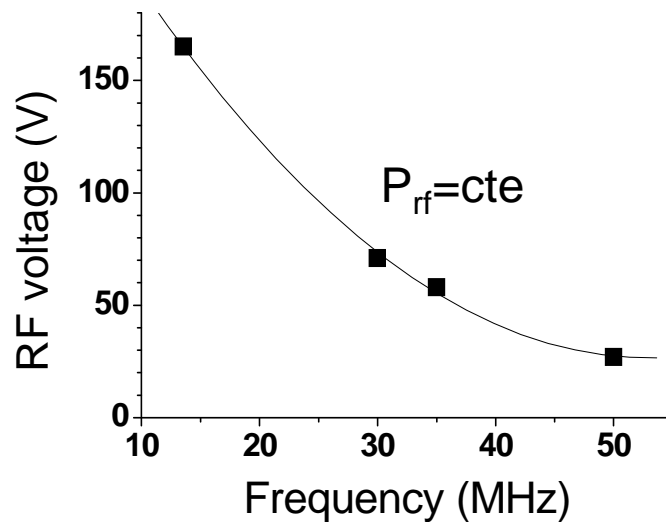
\Rightarrow Une **amélioration** des CCP était requise...

\Rightarrow **CCP double-fréquence ou multi-fréquences**

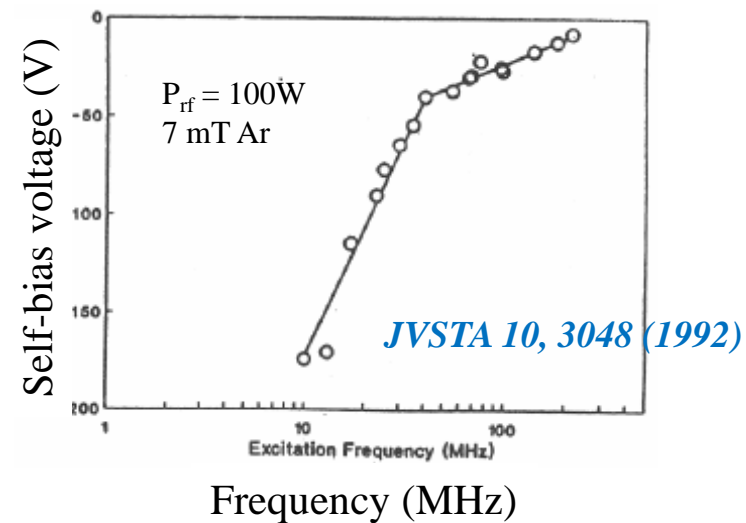
Influence de la fréquence (1) : Tension de gaine et E_{ion}

- Puissance RF P_{rf} couplée **capacitivement** au plasma via les gaines : $Z_s = 1/c\omega = V_{rf} / I_{rf}$

RF voltage vs Frequency



Bias voltage vs Frequency



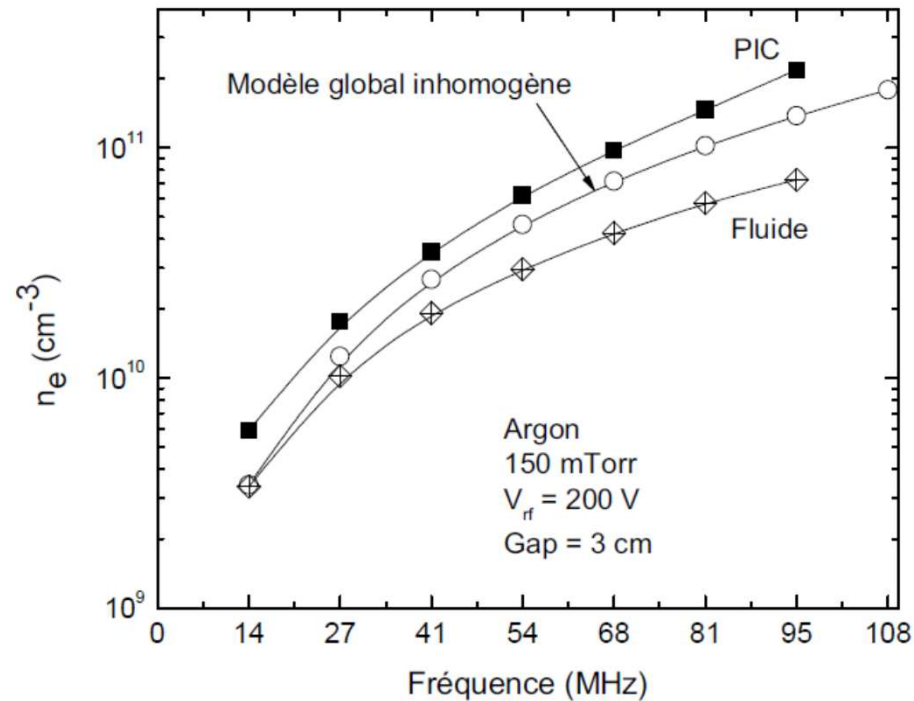
⇒ quand ω augmente à P_{rf} constant, V_{rf} décroît ⇒ $|V_{bias}|$ décroît aussi

Augmenter la fréquence d'excitation à puissance constante

⇒ **diminution de l'énergie ionique**

Influence de la fréquence (2) : Densité électronique n_e et Γ_{ion}

A Perret et al. (150 mTorr / $V_{rf} = cte = 200V$)



Relation entre tension RF et **puissance**
 P_e absorbée par les électrons :

$$P_e \propto \omega^2 V_{rf}$$

$$\Rightarrow \text{à } V_{rf} \text{ constant : } n_e \propto \omega^2$$

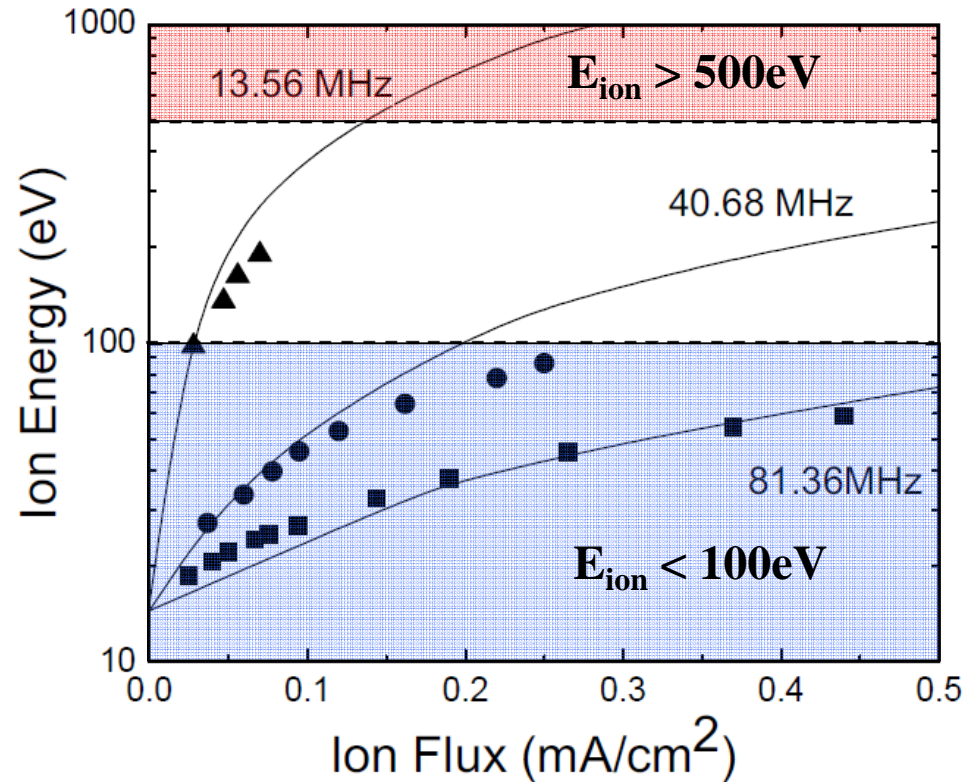
Augmenter la fréquence d'excitation à V_{RF} constante :

⇒ augmentation de la densité électronique

⇒ **augmentation du flux ionique** bombardant le substrat

Influence de la fréquence (3) : Energie & Flux ionique

A. Perret et al., Appl. Phys. Lett 86 (2005) 021501

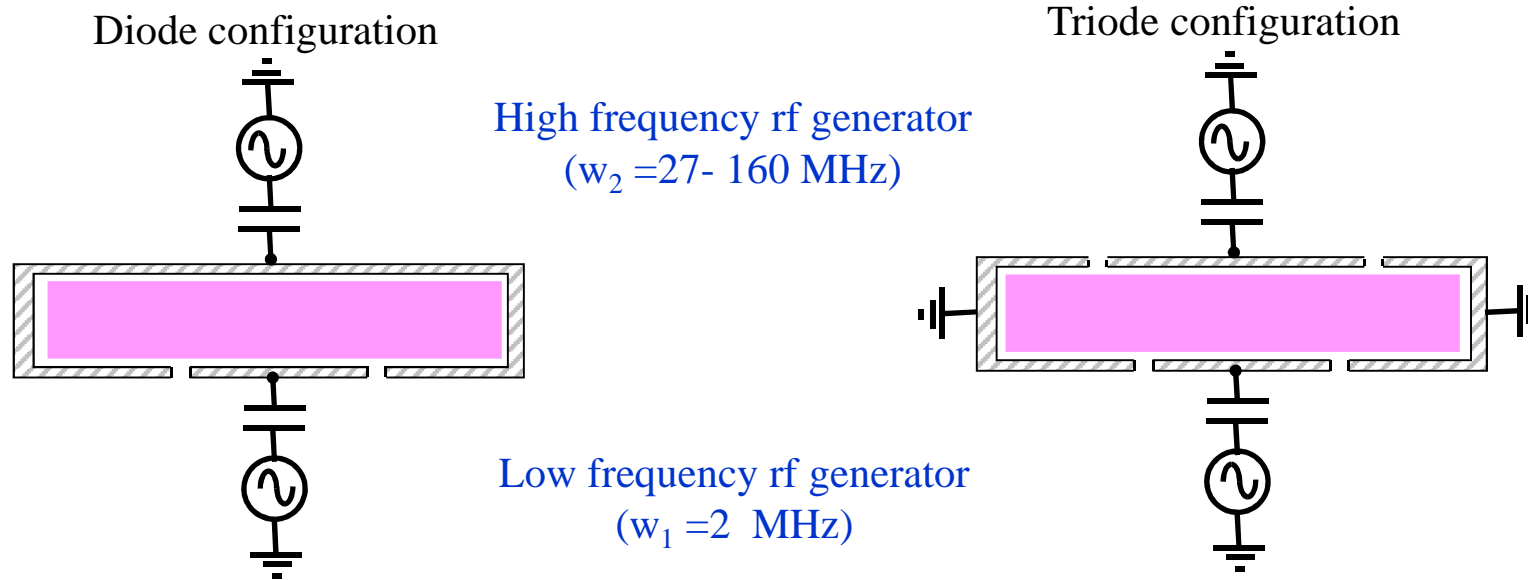


- **A basse fréquence :**
faible flux d'ions
fortes énergies ioniques (> 100 eV)
- **A haute fréquence :**
fort flux ionique
faibles énergies ioniques (< 100 eV)

Peut-on contrôler **indépendamment le flux et l'énergie des ions**
en utilisant une excitation multifréquence ?

Réacteurs double-fréquence

But: contrôler indépendamment le flux et l'énergie des ions

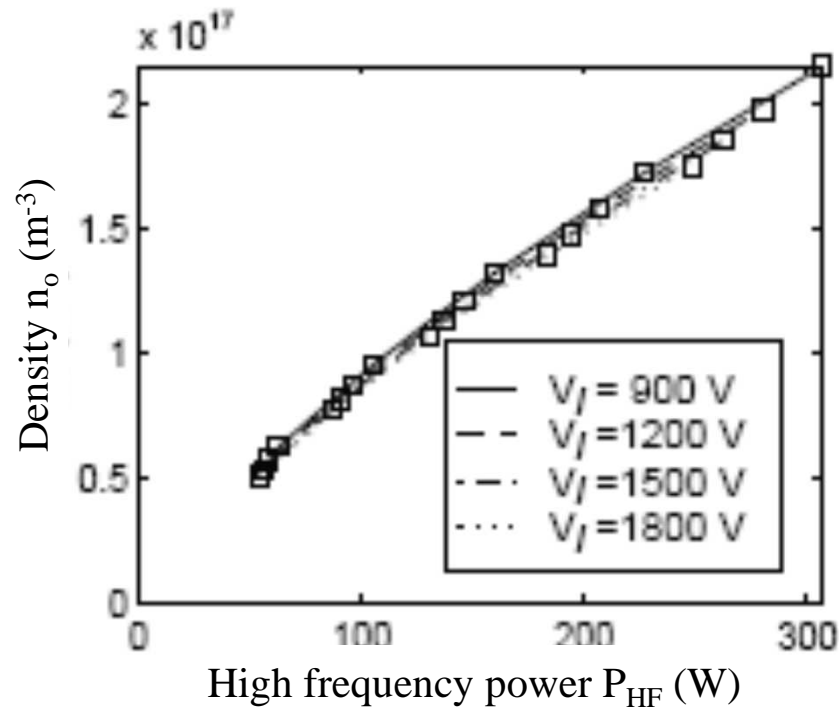


Principe:

- tension haute fréquence contrôle le flux d'ions ($n_e \propto \omega_2^2$)
- tension basse fréquence contrôle l'énergie des ions

Réacteurs double-fréquence : Flux et énergie des ions

$$f_{HF} = 60 \text{ MHz} / f_{LF} = 2 \text{ MHz}$$



- Contrôle indépendant du flux et de l'énergie des ions jamais mais le découplage s'améliore quand f_{HF}/f_{LF} augmente.

- **Fixer V_I** permet de conserver une énergie ionique quasi-constante tout en faisant varier le flux d'ions par un facteur 4

Augmentation du flux d'ions avec P_{HF} **indépendamment** de V_{LF}

Distribution en énergie des ions (IEDF) bombardant l'électrode

- La fonction de distribution en énergie (**IEDF**) est un paramètre crucial pour la gravure plasma.

- Jusqu'ici on a supposé que :
 - les ions répondaient uniquement à la valeur moyenne de la tension de gaine
 - tous les ions arrivaient sur le substrat avec la même énergie eV_{bias}⇒ correct **uniquement à haute-fréquence** et pour des gaines **non collisionnelles**

- La forme de l'IEDF est contrôlée par :
 - 1) le **temps de transit** de l'ion dans la gaine

 - 2) les collisions dans la gaine (e.g. **pression** de travail)

CCP : IEDF et Temps de transit des ions dans la gaine

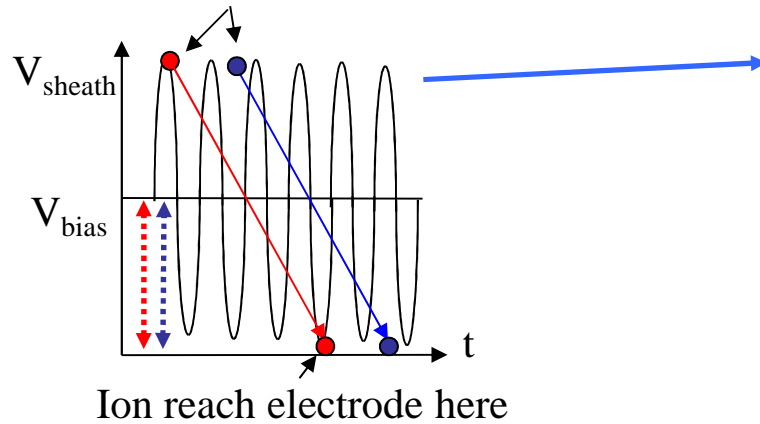
- **Temps de transit τ_{ion}** = temps nécessaire à un ion pour traverser la gaine
 $\Rightarrow \tau_{\text{ion}}$ dépend de **l'épaisseur de la gaine** et de la **masse** de l'ion
- Ratio à considérer : rapport entre τ_{ion} et la **période du signal RF ($T = 1/f$)**
- **Si $\tau_{\text{ion}} \gg T$:**
 - tous les ions ont ~ la même énergie E_{ion} égale à la valeur moyenne de la tension de gaine V_s
 - les ions tendent à ignorer la composante rf de la tension de gaine
- **Si $\tau_{\text{ion}} \ll T$:**
 - E_{ion} est déterminée par la valeur **instantanée de V_s** quand l'ion pénètre dans la gaine
 - large **IED** puisque les ions expérimentent des tensions entre ~ 0 et $2V_{\text{rf}}$.
- Facteurs importants pour déterminer ce rapport :
 - fréquence RF
 - épaisseur de la gaine
 - masse de l'ion

CCP : Influence de la fréquence sur l'IEDF

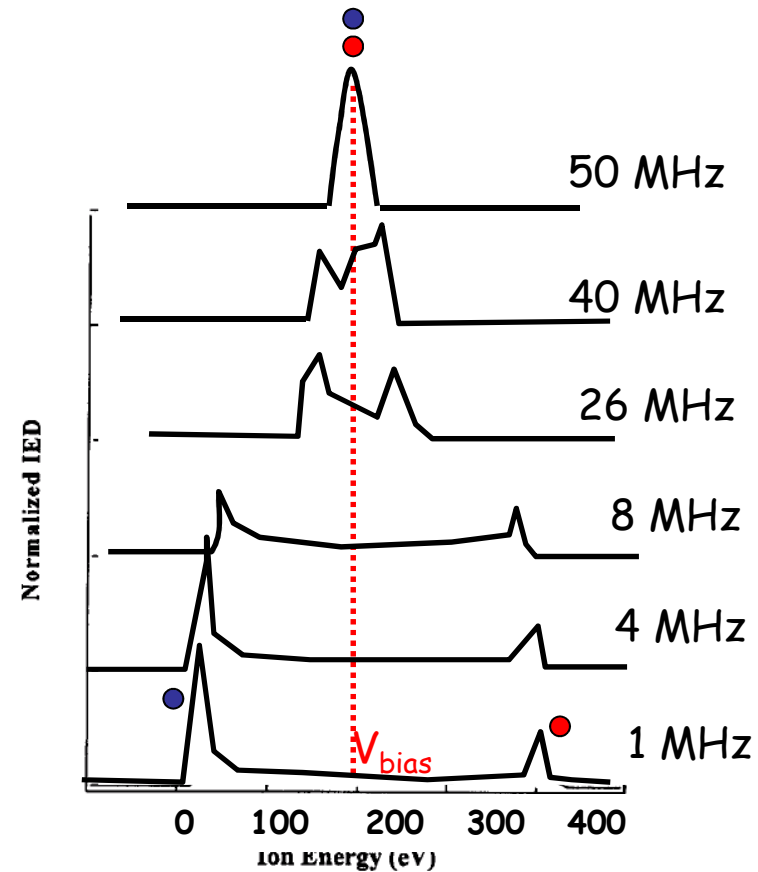
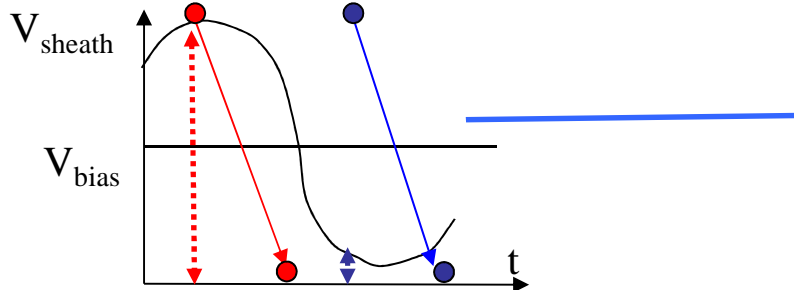
Excitation HF : $\tau_{ion} \gg 1/\omega$

Ion enters sheath here

(● at V_s max; ● at V_s min)



Excitation BF : $\tau_{ion} \ll 1/\omega$



A basse fréquence : E_{ion} max + élevée car certains ions expérimentent la tension RF complète $2V_{rf}$

A haute fréquence : tous les ions ont la même énergie $V_{bias} \sim V_{rf}$

Fréquence RF et IEDF : Résumé

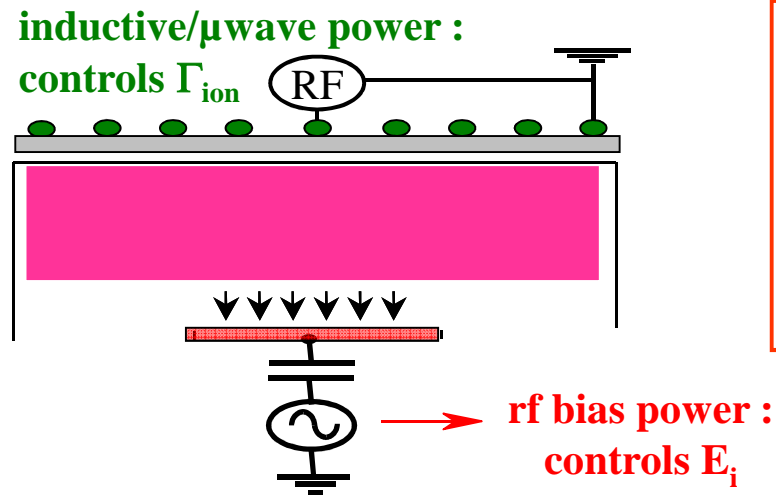
- forme **IEDF** influencée par la **fréquence RF** et le **temps de transit** des ions à travers la gaine
- **A haute-fréquence (ou ions lourds):** tous les ions ont approximativement la même énergie : $V_{\text{bias}} \approx V_{\text{rf}}$.
- **A basse fréquence:** des ions à la fois **faiblement et fortement énergétiques** bombardent le substrat simultanément
 - ⇒ E_{ion} max atteint : $2 \times V_{\text{rf}}$ ($2 \times E_i$ pour la même tension de bias à haute fréquence)
 - ⇒ utile quand hautes E_{ion} requises (e.g. gravure oxydes)

Ces conclusions s'appliquent aussi aux sources haute-densité (section suivante), dans lesquelles l'IEDF au niveau du substrat est aussi contrôlée par la fréquence du générateur utilisé pour auto-polariser le substrat.

Plasmas à Couplage Inductif (ICP)

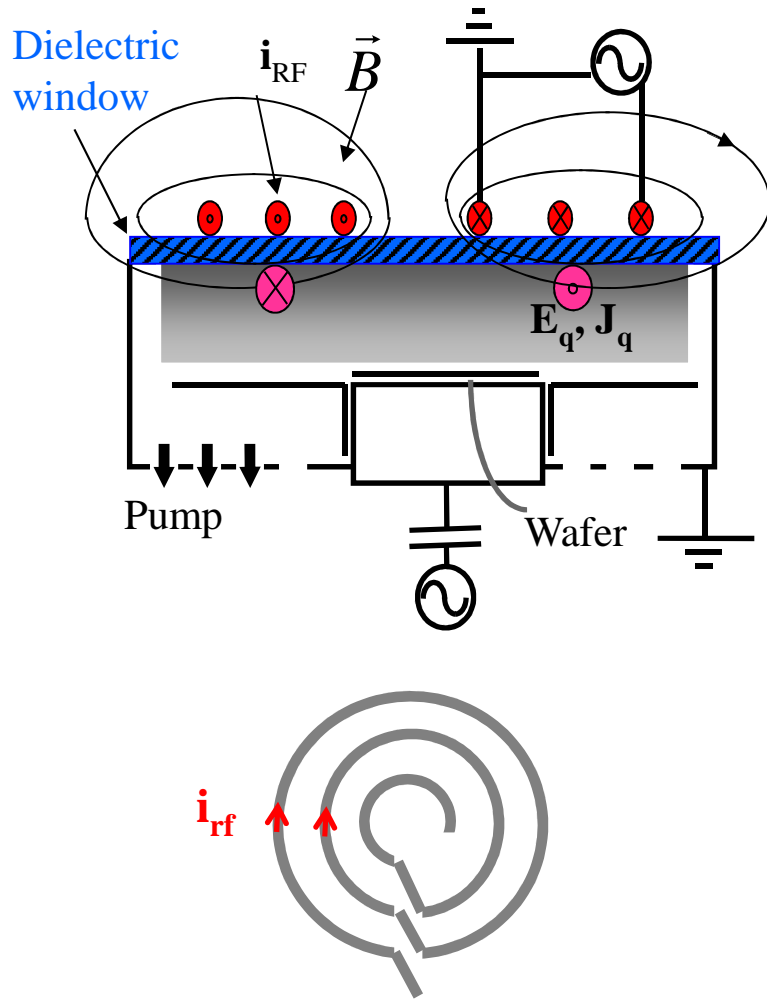
Réacteurs ICP : 2 générateurs

- Pourquoi des plasmas ICP ou HDP ? Besoin de :
 - **faibles E_{ion}** (cf. sélectivité et dommages surfaciques en gravure)
 - contrôle indépendant du flux Γ_{ion} et de l'énergie E_{ion}
 - gaines **basse pression** (<10 mTorr) pour directionnalité des ions
- Principe
 - Plasma généré par couplage de la puissance RF au plasma via des **antennes**
 - **densité e-** (donc flux ions sur substrat) contrôlée par puissance RF injectée dans le plasma
 - E_{ion} contrôlée en utilisant un 2d générateur RF couplé capacitivement au substrat



- contrôle indépendant flux et énergie des ions
- fort flux ionique ET faibles énergies accessibles
- peut fonctionner à très basse pression
⇒ gaines non collisionnelles

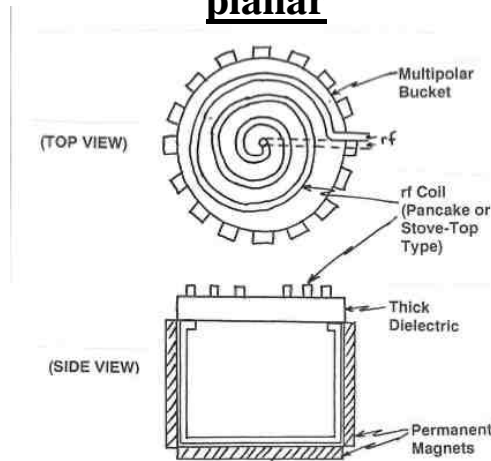
Réacteurs ICP: Génération/Entretien du plasma



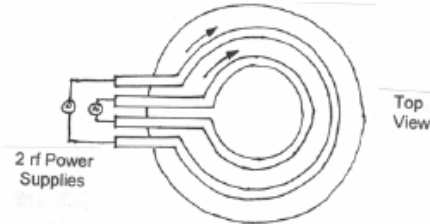
- **courant RF i_{RF}** circulant dans antenne externe
 \Rightarrow **champ magnétique \vec{B}** induit dans le gaz
 [Maxwell-Ampère : $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$]
- variation temporelle du champ B
 \Rightarrow **champ électrique azimuthal E_θ** ($\perp J_\theta$) dans plasma
 [Maxwell-Faraday : $\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$]
- **onde EM absorbée** dans le plasma sur $\delta=c/w_{pe}$ à basse pression (**épaisseur de peau**)
 $\delta \leq (R,l) \Rightarrow$ couplage puissance efficace
 \Rightarrow densités plasma élevées (**10^{10} - 10^{12}cm^{-3}**)
- Gaines **fines** : E_{ion} faibles ($\sim 20 \text{eV}$)
 \Rightarrow porte-substrat polarisé par alimentation indépendante

Réacteurs ICP: Antennes

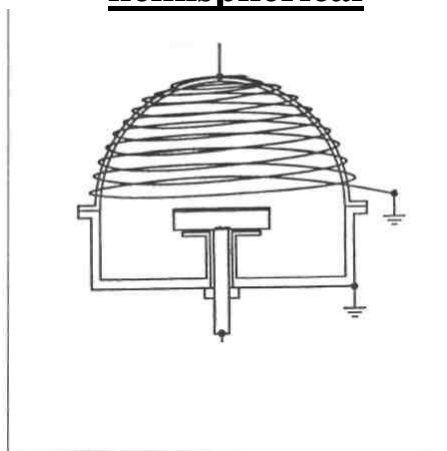
planar



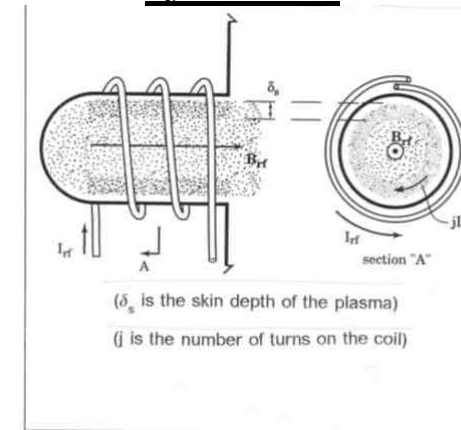
planar/2 coils



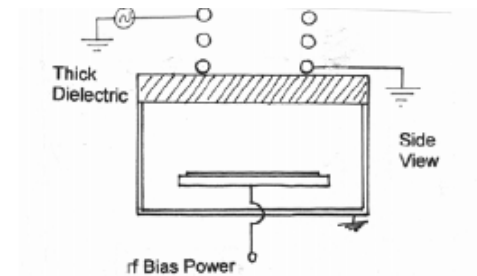
hemispherical



cylindrical



“non sputtering” coil

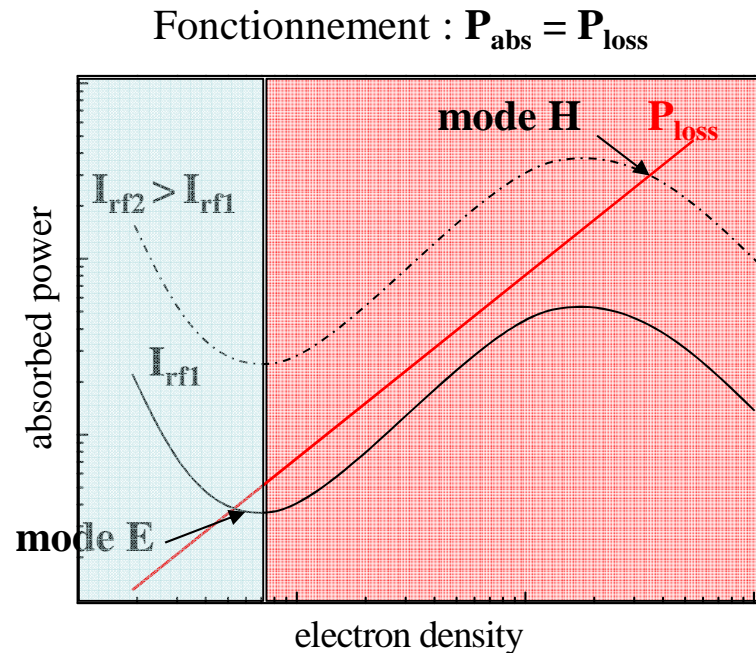


The end of coil adjacent to the ceramic window is grounded thereby reducing the capacitive coupling between the coil and the plasma.

The high voltage end of the coil is farther away from the ceramic window thereby also reducing the capacitive coupling.

Réacteurs ICP: 2 régimes de fonctionnement

- 1) Régime basse puissance dit « **capacitif** » (E)
- 2) Régime haute puissance dit « **inductif** » (H)



■ Mode Capacitif (E)

- Faible P_{RF} ($<100\text{W}$) \Rightarrow **faibles n_e**
- Tension RF aux extrémités de la bobine
 \Rightarrow champ électrostatique entre bobine & parois
 \Rightarrow chauffage e- de type capacitif : $P_{\text{abs}} \propto I_{\text{RF}}^2/n_e$

■ Mode Inductif (H)

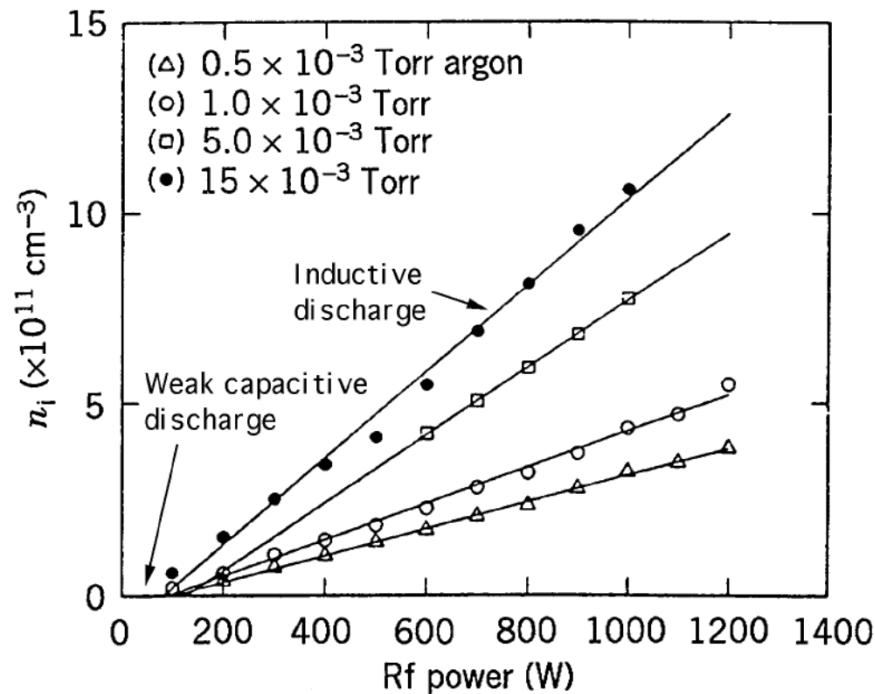
- Forte P_{RF} ($>100\text{W}$) \Rightarrow **fortes n_e**
- **onde EM évanescente** dans plasma sur $\delta=c/w_{pe}$
 \Rightarrow régime basse densité $P_{\text{abs}} \propto I_{\text{RF}}^2 \cdot n_e$
 \Rightarrow régime haute densité $P_{\text{abs}} \propto I_{\text{RF}}^2/\sqrt{(n_e)}$

Transition E-H relativement abrupte :

- **stable** (mais possible hystérésis) en gaz **électropositif**
- peut être **instable** en gaz **électronégatif**

Réacteurs ICP: Régime inductif (« normal »)

- pas d'électrode de puissance immergée dans le plasma
⇒ tension de gaine non modulée et potentiel plasma faible : $V_p \approx 5Te$



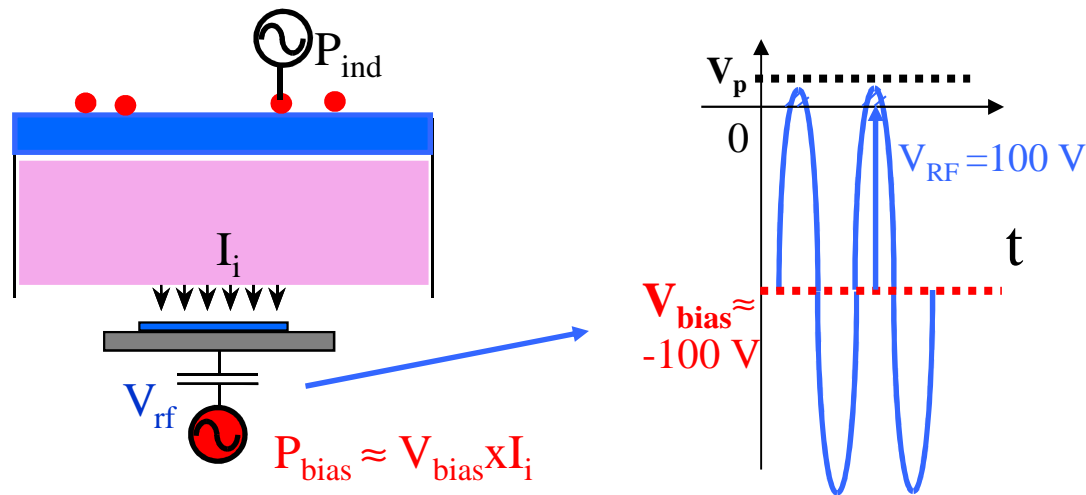
Conséquences

- puissance RF absorbée principalement par les e^- (et non par les ions)
⇒ très **hautes densités** plasma / CCP
- Pour $P > 100\text{W}$, relation linéaire entre la puissance RF injectée dans le plasma et la densité électronique n_o (et donc le flux d'ions):

$$P_{\text{abs}} \propto n_o$$

Réacteurs ICP: Porte-substrat polarisé /couplé capacitivement

- Couplage inductif : plasma **dense** à faible p et **courant ionique** I_i au substrat contrôlé par P_{ind}
- **Potentiel plasma** faible (≈ 15 V) et **non** modulé
- **Tension** V_{rf} appliquée sur électrode couplée **capacitivement**
 - ⇒ tension d'auto-polarisation V_{bias}
 - ⇒ énergie ions bombardant l'électrode $E_{ion} = eV_{bias}$ contrôlable par V_{rf} indépendamment de Γ_{ion}

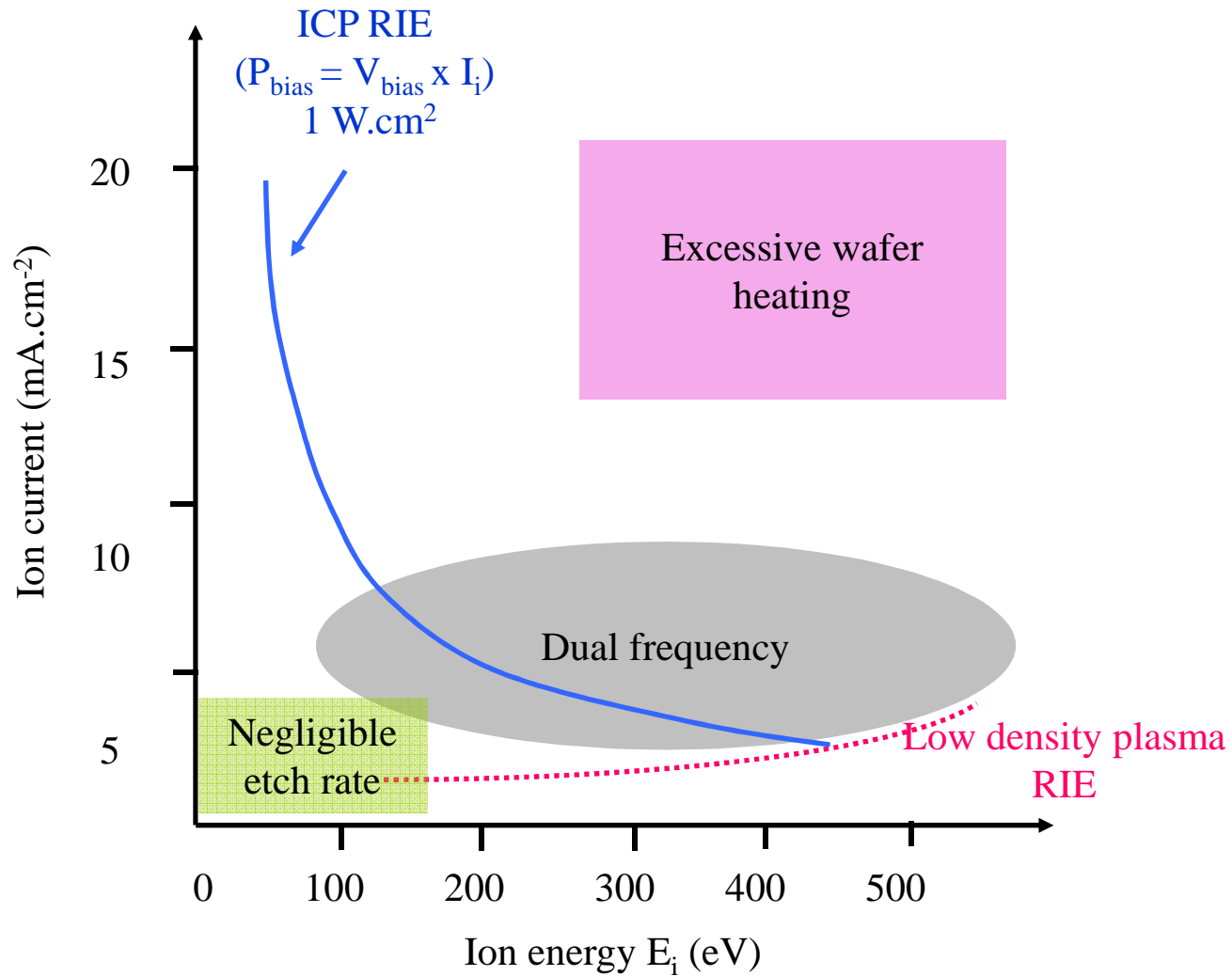


Limitation: Parce que I_i est fort (20 mA.cm^{-2}), V_{bias} maintenu faible et **E_i faible dans ICP**
Exemple: $I_i = 20 \text{ mA.cm}^{-2}$, wafer 300 cm^2 et $P_{bias} = 500 \text{ W} \Rightarrow V_{bias} = 80 \text{ V}$ seulement

Plasmas à Couplage Inductif (ICP)

- **Hautes densités** plasma atteintes sans électrode haute tension en contact avec le plasma
- Pas de **pulvérisation** des parois/électrode si **pas de couplage capacitif** plasma/antenne
 - ⇒ $V_{rf} > 1000V$ sur antenne : même avec toit diélectrique épais, une partie de la RF est couplée capacitivement au plasma
 - ⇒ couplage parasite éliminé en utilisant des “boucliers” **électrostatiques** (Faraday shields)
- Mais l’allumage du plasma requiert du couplage capacitif pour craquer le gaz
 - ⇒ dans la plupart des systèmes un couplage capacitif significatif antenne/plasma existe et les toits du réacteur sont **pulvérisés-gravés** relâchant des **impuretés** dans le plasma
 - e.g. atomes O et Si avec toits SiO_2 , Al avec toit en céramique*

Flux / Energie ionique: Possibilités en Gravure Ionique Réactive



Merci de votre attention