

Mesure de sonde dans les plasmas électronégatifs

Pascal Chabert

LPTP, Ecole Polytechnique, France
chabert@lptp.polytechnique.fr

Pourquoi rencontre-t-on souvent des ions négatifs ...

- Les gaz utilisés pour le dépôt et la gravure de couches minces ont une forte affinité électronique
- Pour la gravure, il s'agit essentiellement de gaz halogénés (C_xF_y , SF_6 , Cl_2 , HBr , etc.), mais également l'oxygène...
- Pour le dépôt, on trouve aussi des hydrures, e.g. le silane (SiH_4)

Résultat: Les électrons sont attachés sur les molécules ou les radicaux créés par le plasma → **ions négatifs**

Pourquoi s'intéresser à eux

- Leur rôle est souvent indirect
- Ils peuvent jouer un rôle dans la cinétique chimique
- Leur présence modifie la structure électrique du plasma
- Ils génèrent des instabilités et des structures non-linéaires internes

Comment se forment-ils ?

- Rarement, mais parfois, par attachement direct (c'est le cas pour la molécule de SF₆):



- Souvent par attachement dissociatif:



- Échange de charge (par exemple dans l'oxygène):



Comment se détruisent-ils ?

- Par recombinaison avec un ion positif:



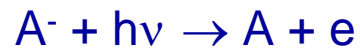
- Par collision sur un radical (ou un état excité métastable):



- Par collision avec un électron :



- Par photodétachement :



Comment les mesurer ?

- Par photodétachement
- Par spectrométrie de masse
- Par sondes électrostatiques

Nous allons nous intéresser à la dernière famille

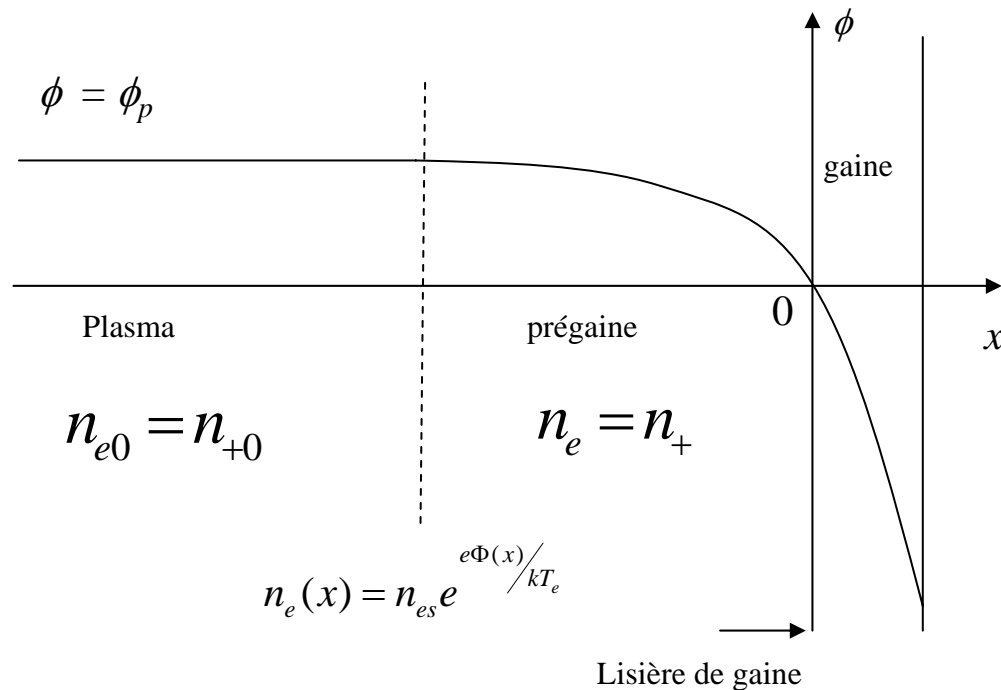
Critère de Bohm en plasma électronégatif

Structure électrique à basse pression

Théorie de Bohm en plasma électropositif non collisionnel

Les hypothèses de Bohm:

- Neutralité dans le plasma et la pré-gaine
- ions positifs fluides
- Électrons Boltzmann



$$v_{Bohm} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$$

$$\eta_s = \frac{e\phi_p}{kT_e} = \frac{1}{2}$$

Avec des ions négatifs :

- Même calcul, en ajoutant des ions négatifs en équilibre de Boltzmann (Braithwaite et Allen):

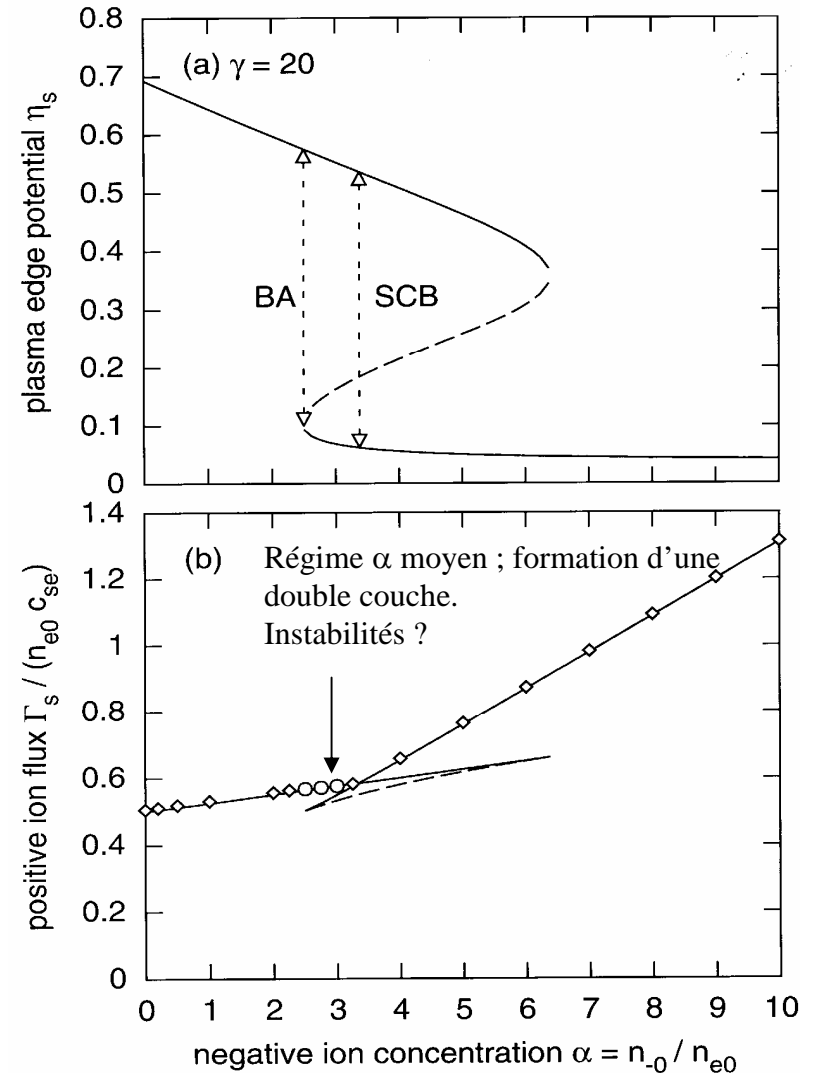
$$n_-(x) = n_{-s} e^{e\Phi(x)/kT_-} \quad \gamma = \frac{T_e}{T_-}$$

$$\alpha = \frac{n_-}{n_e}$$

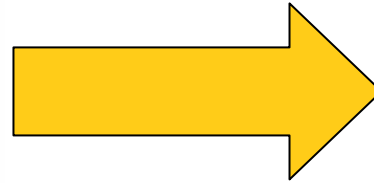
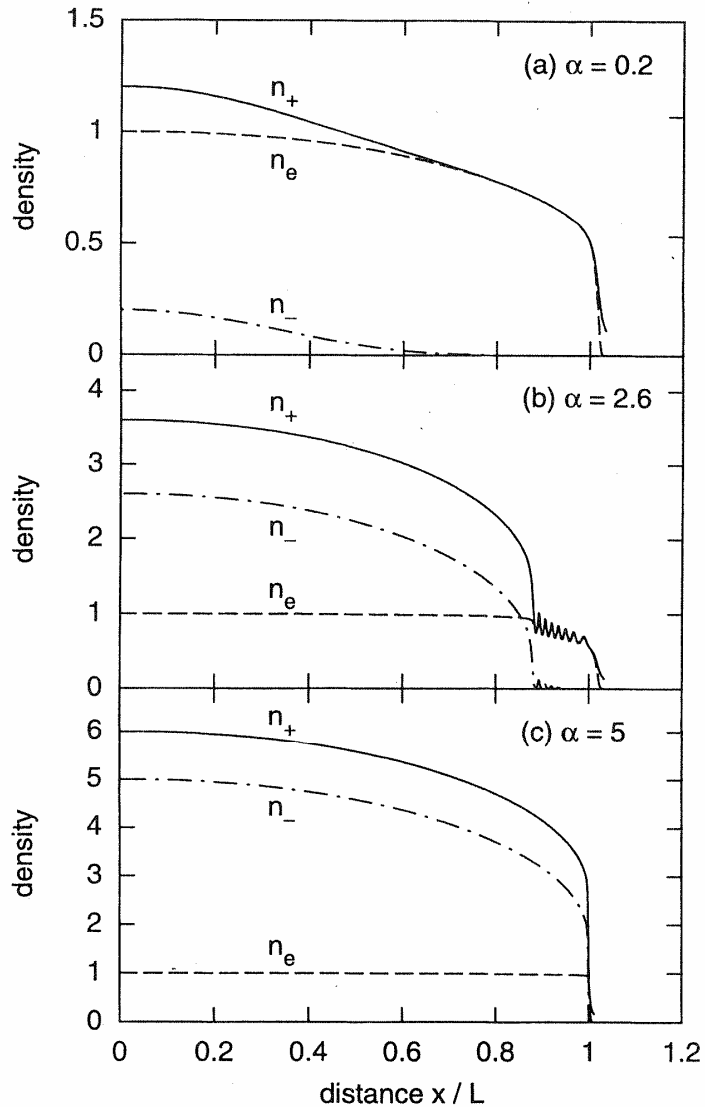
- On obtient :

$$v_{BA} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i} \frac{1+\alpha_s}{1+\gamma\alpha_s}} = v_{Bohm} \sqrt{\frac{1+\alpha_s}{1+\gamma\alpha_s}} \leq v_{Bohm}$$

$$\eta_s = \frac{e\phi_p}{kT_e} = \frac{1+\alpha_s}{2(1+\gamma\alpha_s)} \quad \alpha_s = \alpha_0 \exp\left[\frac{e\phi_p(1-\gamma)}{kT_e}\right]$$



Profils de densité



Stratifiée (prégaines électropositives)

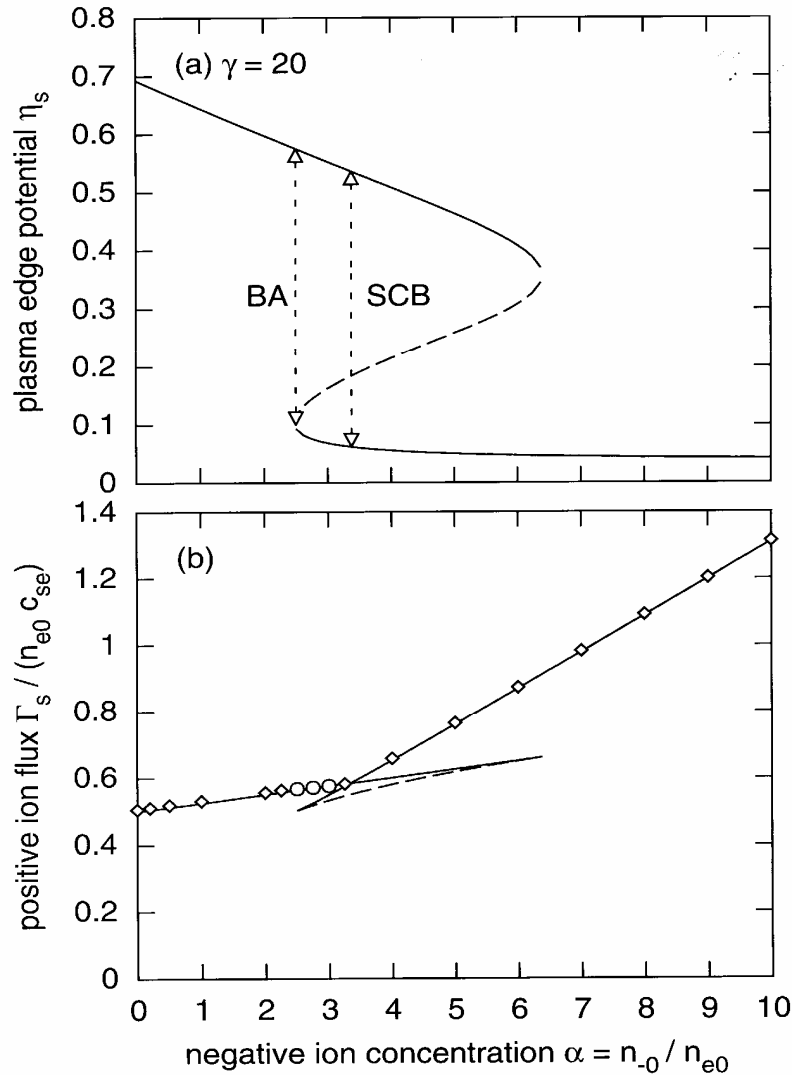


Doubles couches (instables ?)



Uniforme (prégaines électronégatives)

Profils de densité



Flux d'ions en fonction de l'électronégativité α :

Nous allons nous servir de cette courbe pour mesurer α par sonde

Technique à deux sondes

Negative ion fraction from electrostatic probes

- The negative ion fraction α can be deduced from the saturation current ratio R (Braithwaite and Allen 1988)

$$R = \frac{I(V_p)}{I_{sat}^+} = f(\alpha) \quad \alpha = \frac{n_-}{n_e}$$

- The positive ion saturation current is given by the modified Bohm flux for electronegative plasmas

$$I_{sat}^+ = e A_1 \Gamma_s(\alpha)$$

- The negative particle saturation current is given by the thermal currents measured at V_p

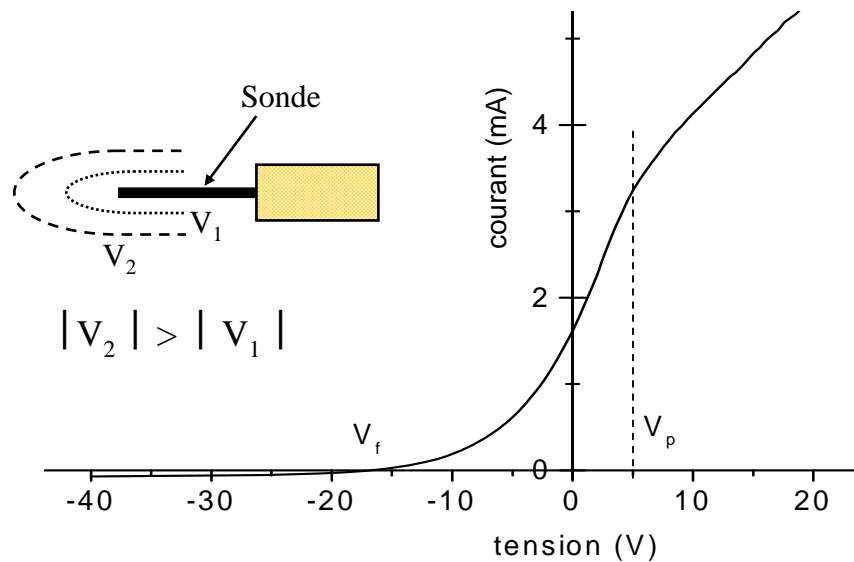
$$I(V_p) = \frac{1}{4} e A_2 (n_{e0} v_{The} + n_{-0} v_{Th-} + n_{+0} v_{Th+})$$

For $\alpha < 100$

- Need a good model for $\Gamma_s(\alpha)$
- Difficult to get both I_{sat}^+ and $I(V_p)$ with the same probe

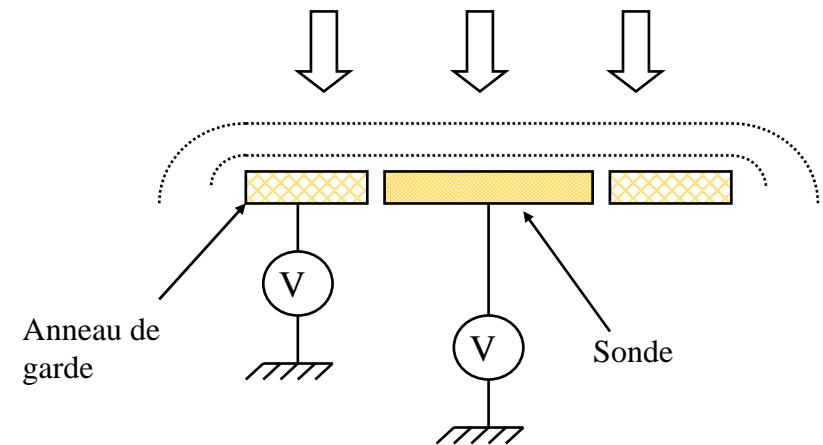
Technique à deux sondes pour α

Sonde cylindrique (d'aire A_2)



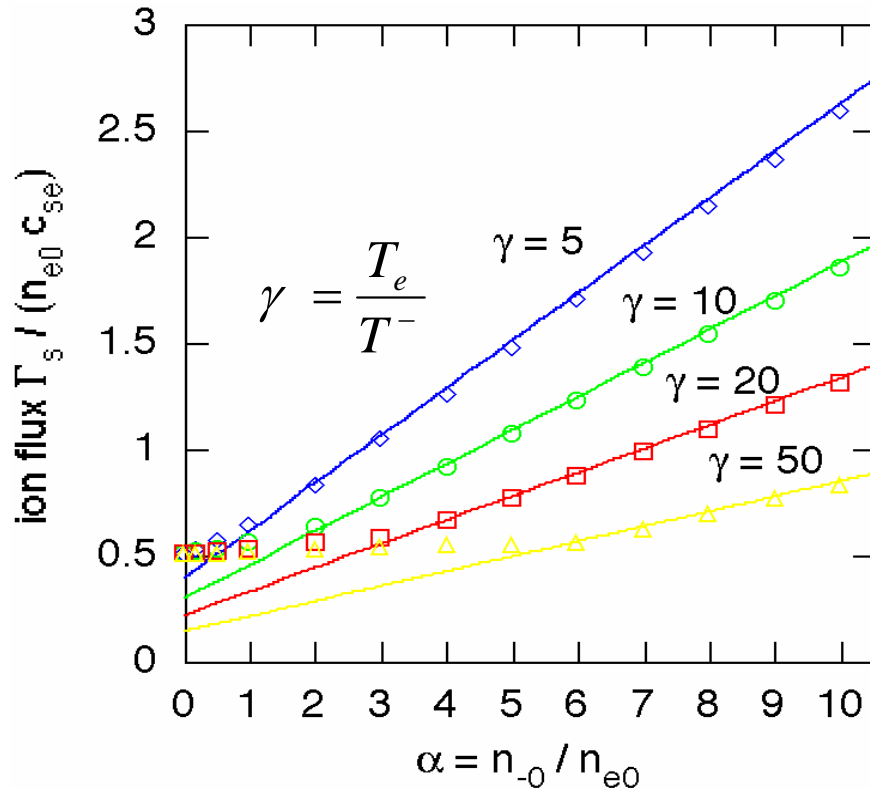
- Appropriée pour T_e , V_p , V_f and $I(V_p)$
- Pas pour I_{sat}^+ (pas de saturation)

Sonde plane (d'aire A_1)



- Bonne mesure de I_{sat}^+
- Inappropriée pour T_e , V_p and $I(V_p)$

α est déduit du rapport des courants de saturation R



Le flux d'ions normalisé est donné par:

$$\frac{\Gamma_s}{n_{e0} C_s}(\alpha) \quad \text{with} \quad C_s = \sqrt{\frac{kT_e}{m_+}}$$

Le rapport des courants de saturation par:

$$R = \frac{1}{4} \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^* \sqrt{\frac{8m_+}{\pi m_e}} \frac{n_{e0} C_s}{\Gamma_s}(\alpha)$$

Le potentiel flottant :

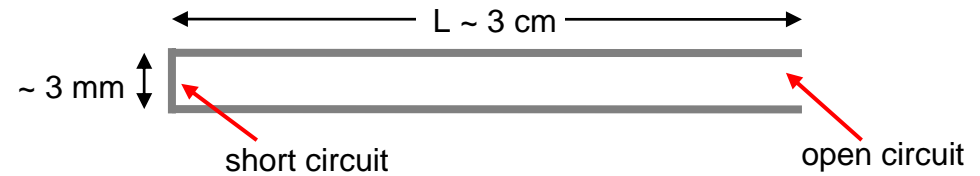
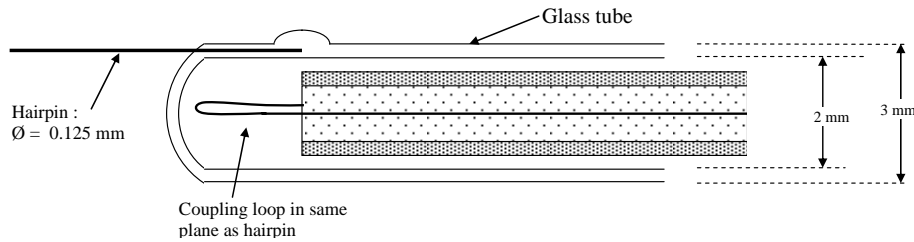
$$\frac{V_p - V_f}{T_e} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{m_+}{2\pi m_e} \right) - \ln \left(\frac{\Gamma_s(\alpha)}{n_{e0} C_s} \right)$$

Besoin de connaître le rapport des températures

Cas des plasmas polymérisants:

- n_e est mesuré par sonde micro-onde
- Γ_+ est mesuré par sonde rf

$n_e \rightarrow \frac{1}{4}$ -wave microwave resonator



- Quarter-wave μ -wave resonator
- Measures change in dielectric permittivity

Vacuum

Plasma

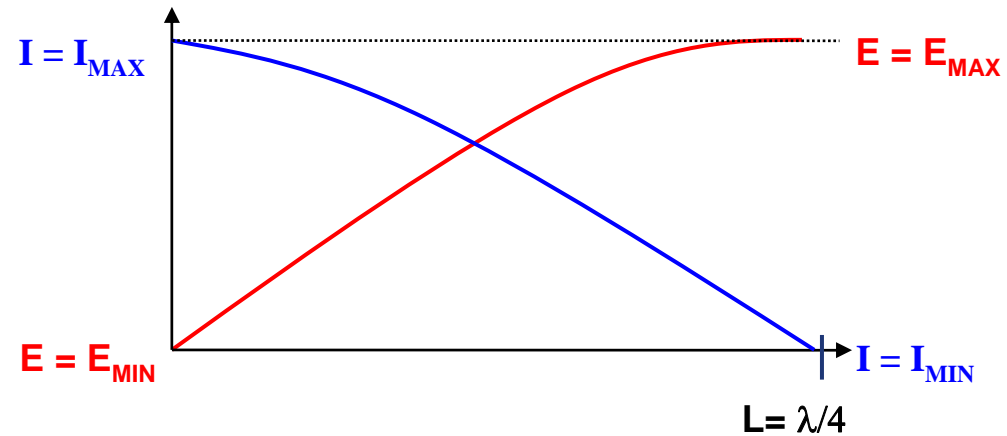
$$f_0 = \frac{c}{4L}$$

$$f_r = \frac{c}{4L\sqrt{\epsilon_p}}$$

- With plasma the frequency increases:

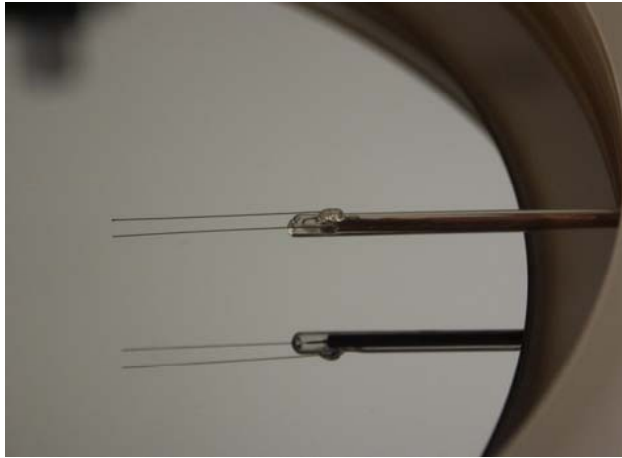
$$f_r^2 = f_0^2 + f_p^2 \Rightarrow n_e (10^{10} \text{ cm}^{-3}) = \frac{f_r^2 - f_0^2}{0.81}$$

n°17



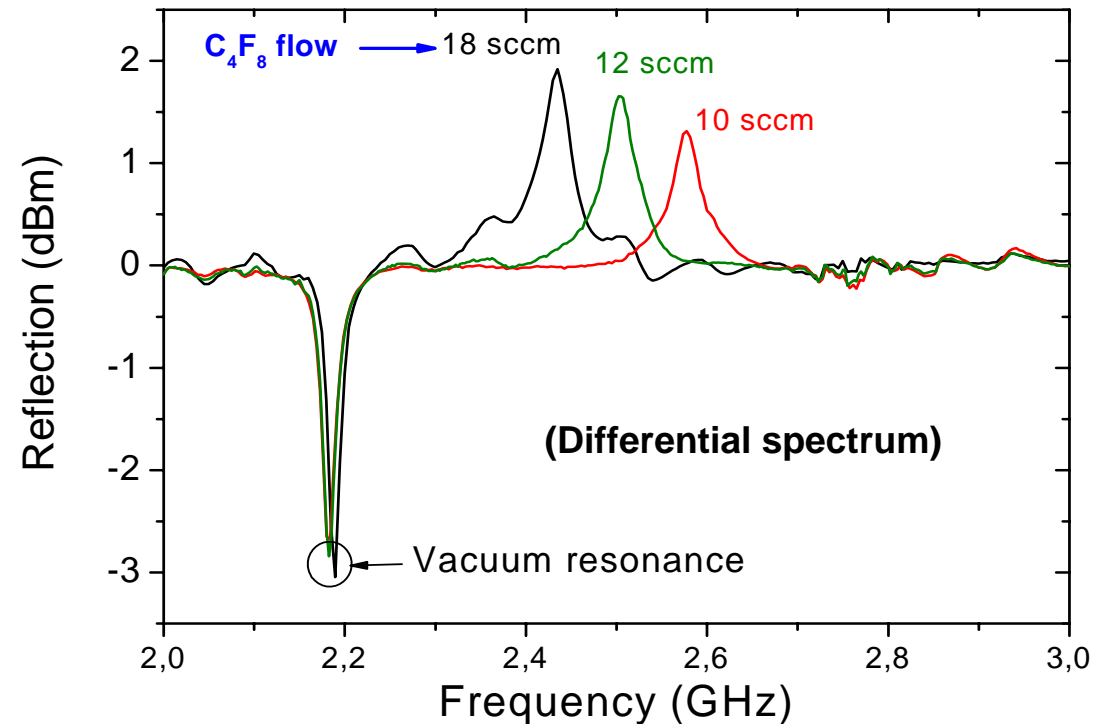
$n_e \rightarrow \frac{1}{4}$ -wave microwave resonator

Floating **Hairpin Probe** inserted through gaps in confinement rings



Constructed to withstand very aggressive environment

- ▶ $T_{GAS} \sim 500 - 800$ K
- ▶ Ion bombardment and chemical etching



Hairpin

- Stenzel *et al*, Rev. Sci. Instrum. **47** (1976) 603
- Piejak *et al*, J. App. Phys. **95** (2004) 3787

Floating Hairpin

- Help from Braithwaite and Al Kuzee, Open Univ
 \rightarrow Piejak *et al*, PSST, **14** (2005) 734-743

Diapositive 18

LL1

reference Braithwaite

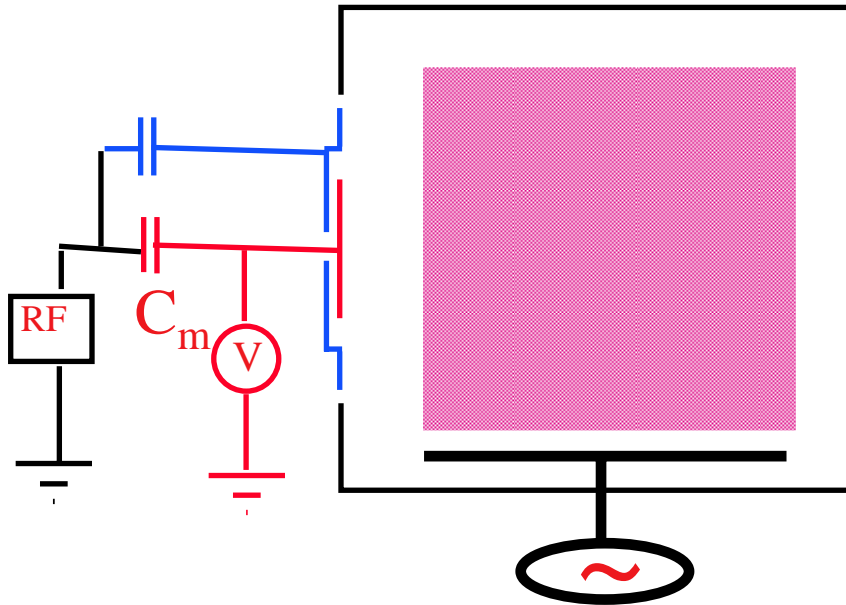
compatible to ind reactor because insensitive to deposition

not much need to talk about function

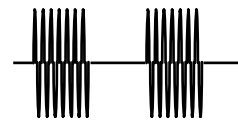
allows us to measure IV in ion current regime

Garrett Curley, 03/06/2005

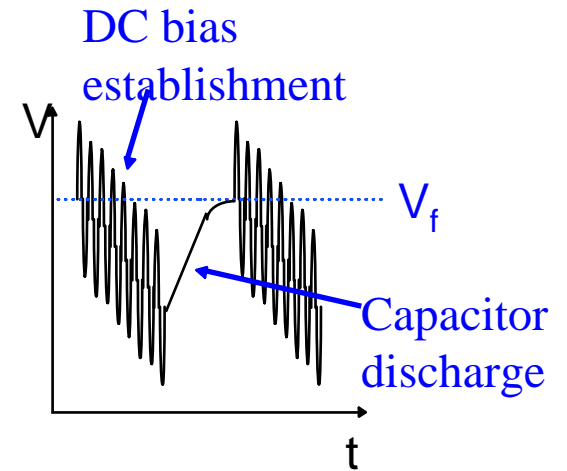
Sonde polarisée en RF



Applied RF signal:

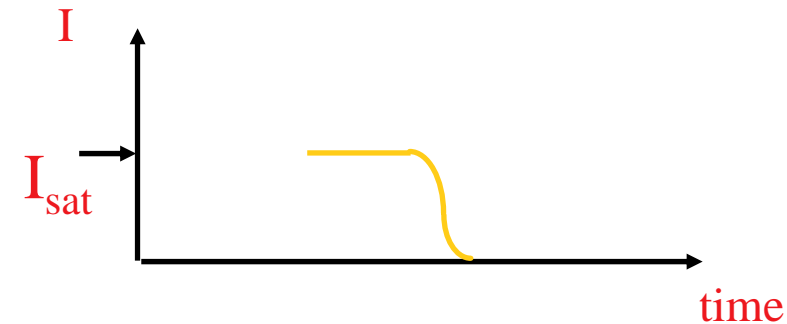


$f \approx 10 \text{ MHz}$
 $t_{\text{on}} \approx t_{\text{off}} \approx 100 \mu\text{s}$

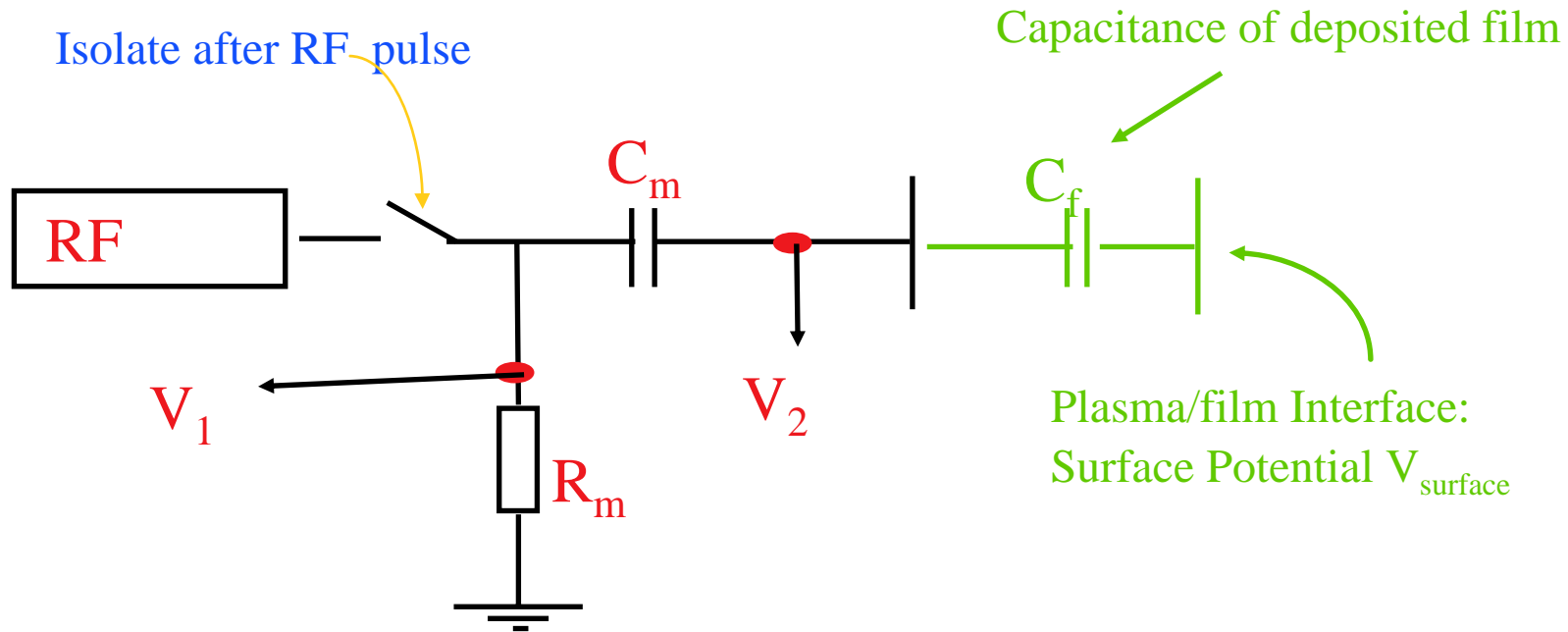


During capacitor discharge:

$$I = C_m \frac{dV}{dt}$$



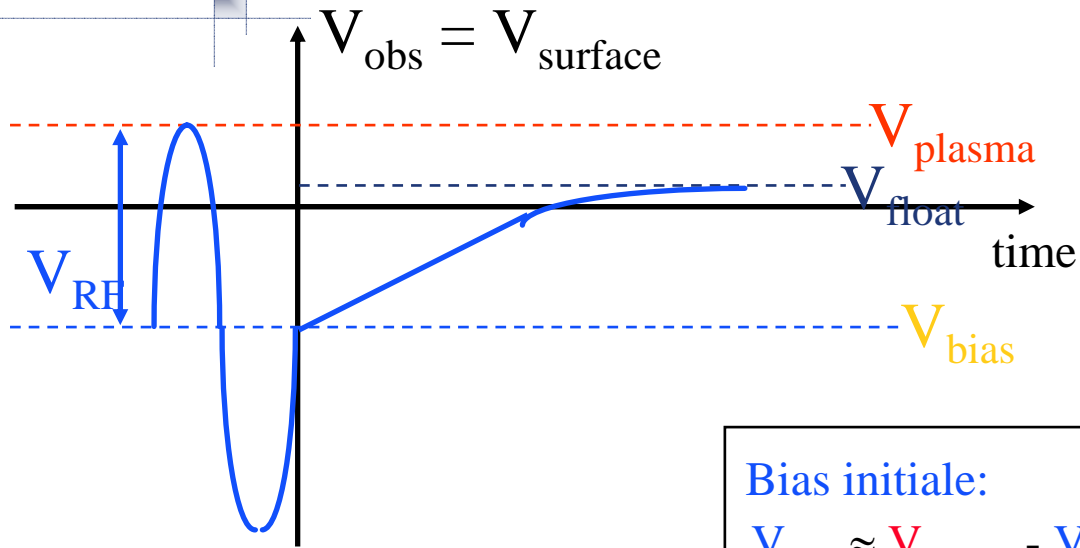
Direct Current Measurement:



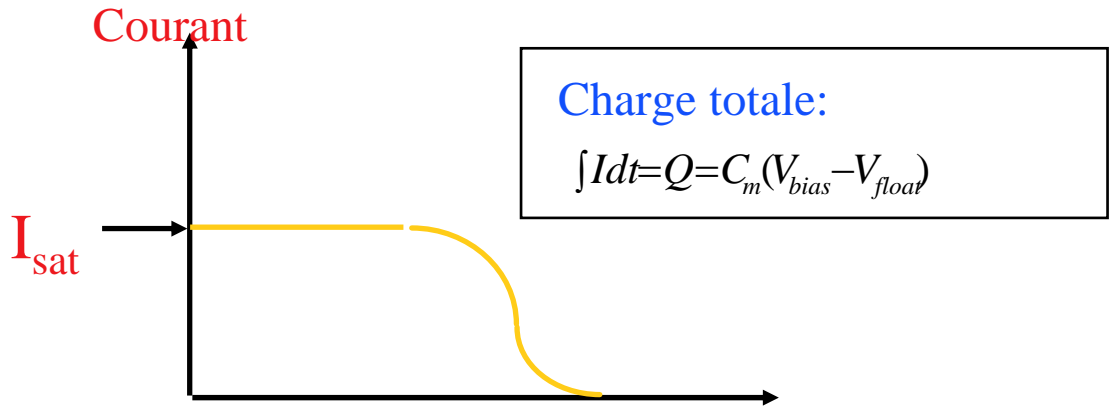
During capacitor discharge:

$$I = V_1 / R_m$$

Avec une sonde propre:

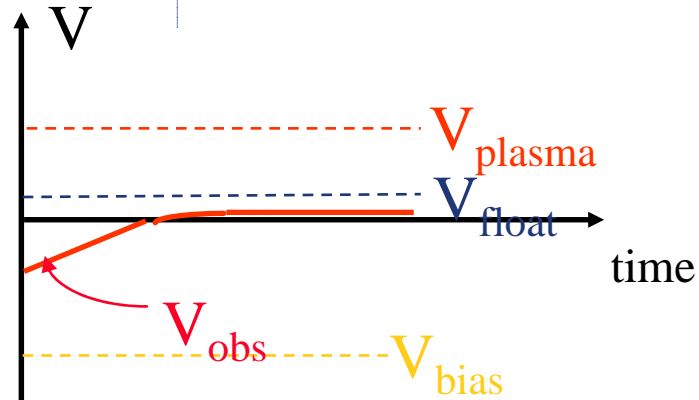


Bias initiale:
 $V_{bias} \approx V_{plasma} - V_{RF}$



Charge totale:
 $\int I dt = Q = C_m (V_{bias} - V_{float})$

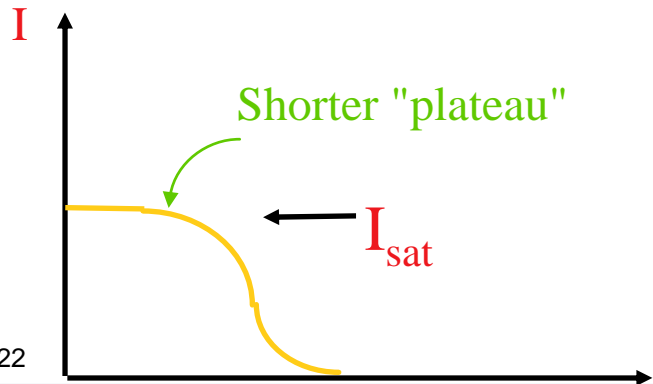
Sonde revêtu d'une couche isolante



Initial bias at film surface, and therefore ion current, are unchanged!

Observed voltage (but not voltage derivative) is reduced:

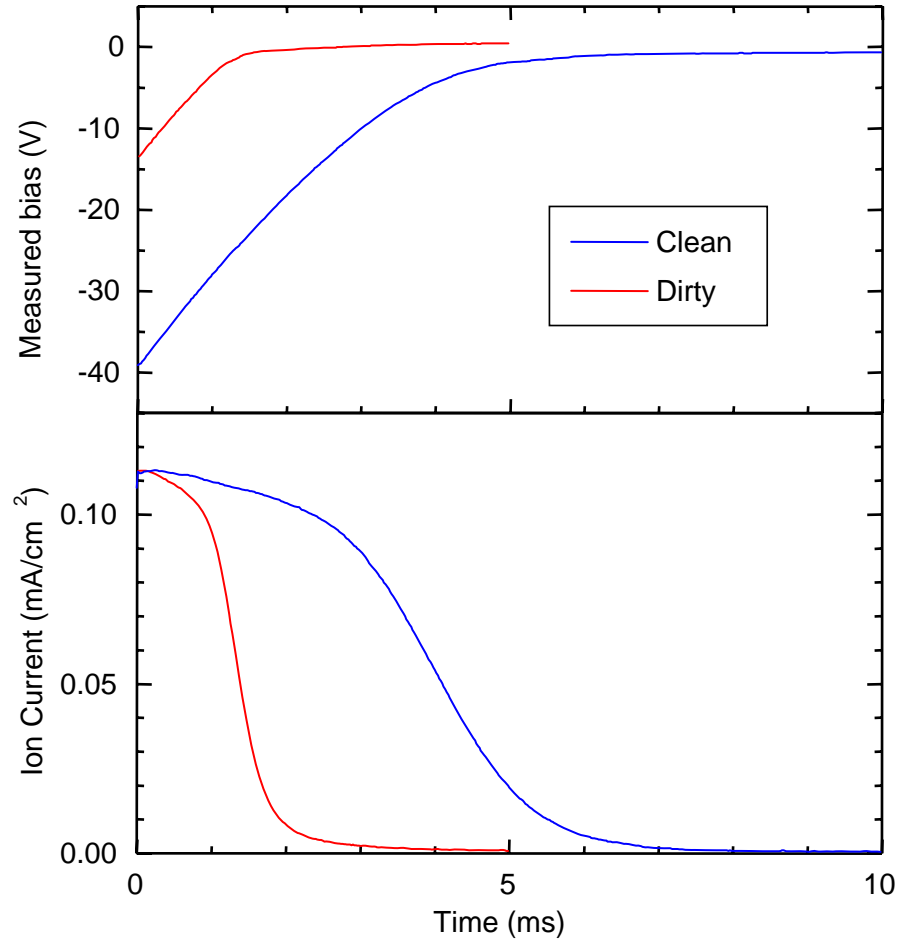
$$V_{\text{obs}} = V_{\text{surface}} \cdot \left(\frac{C_f}{C_m + C_f} \right)$$



Effective capacitance, and therefore bias discharge time, is reduced:

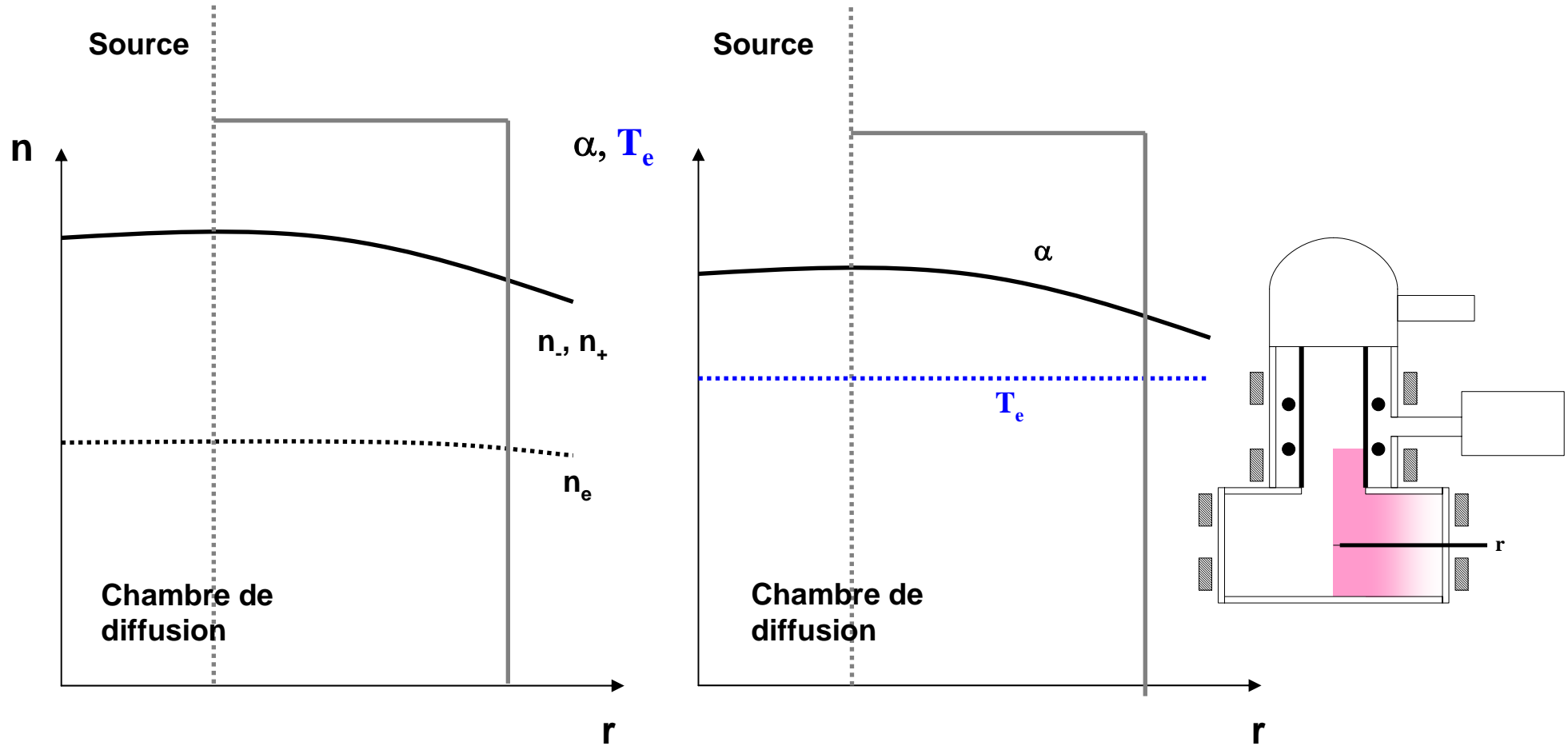
$$C_{\text{eff}} = \left(\frac{C_m C_f}{C_m + C_f} \right)$$

C_2F_6 RIE plasma, 50mTorr 100W
4 hours

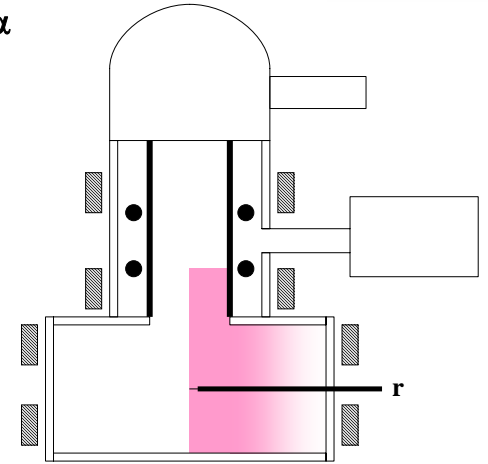
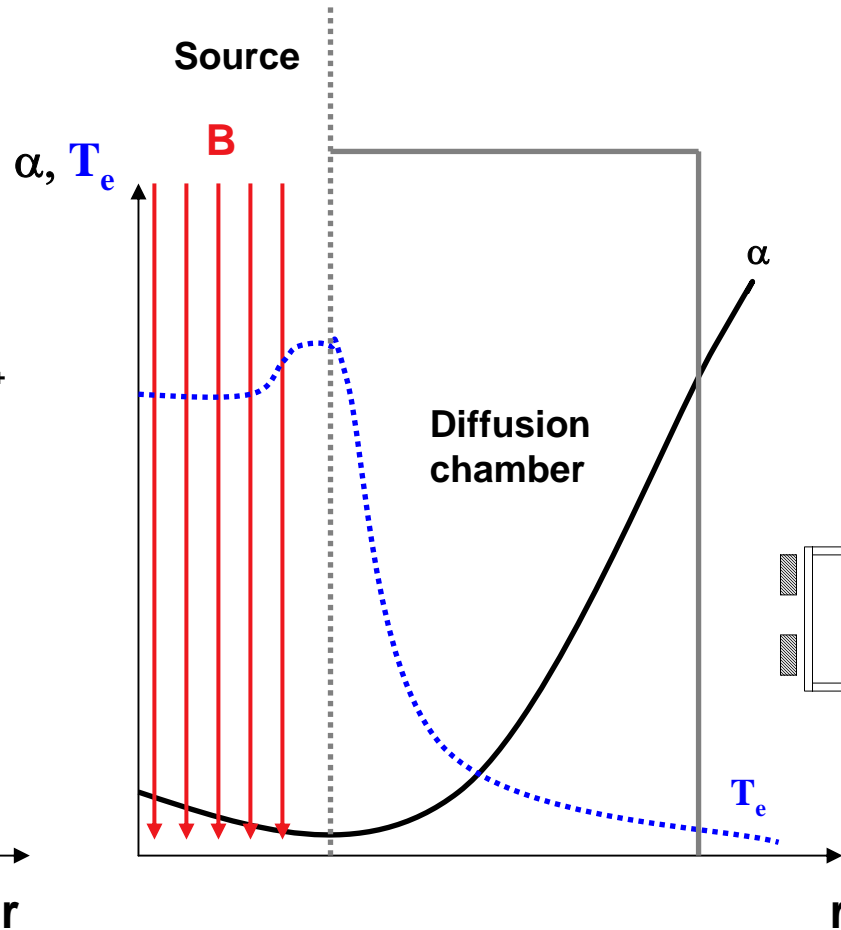
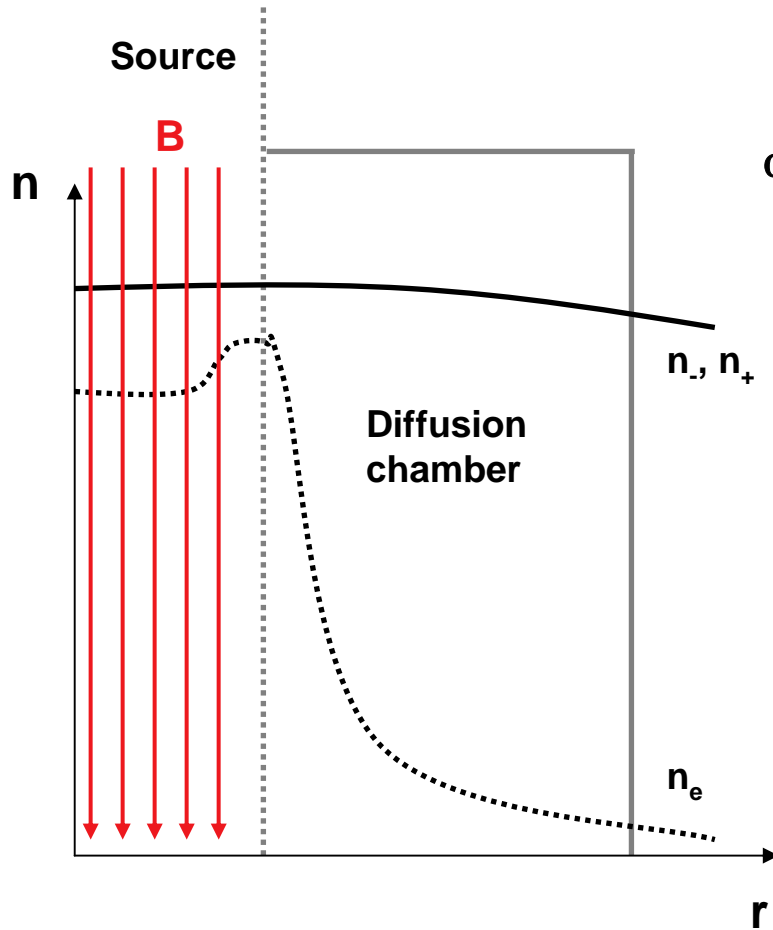


Un exemple...

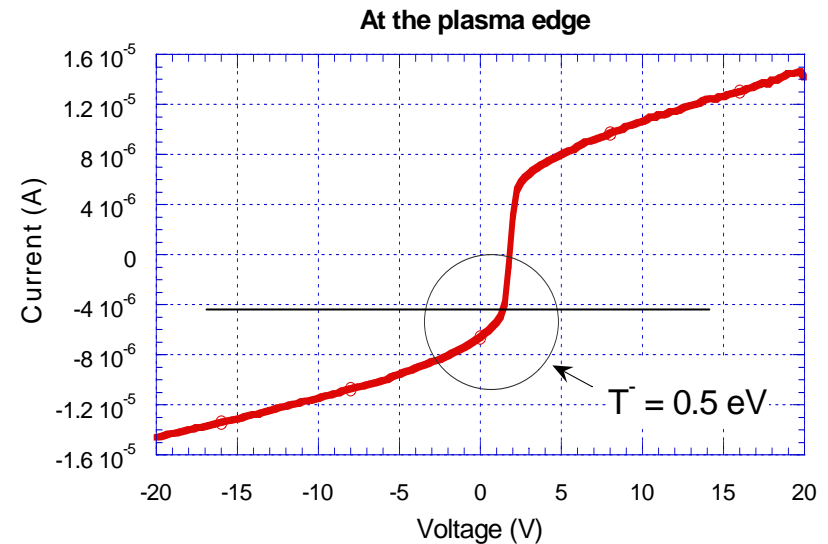
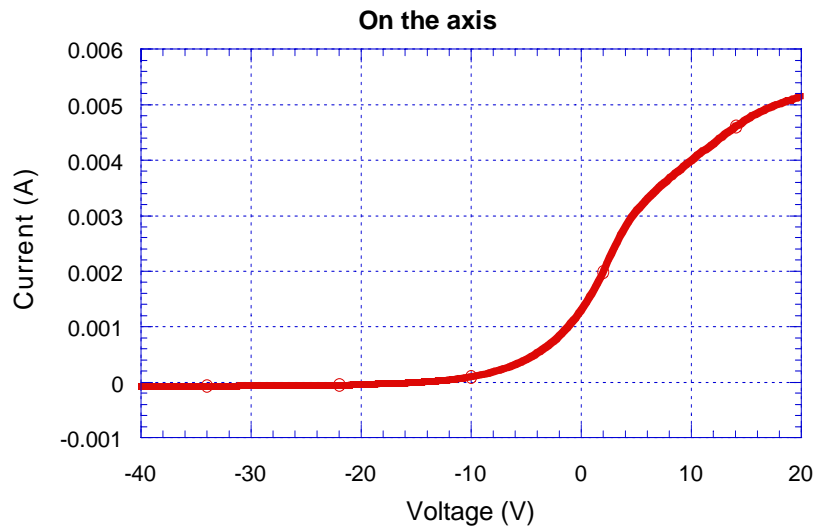
Sans champ magnétique



Avec champ magnétique



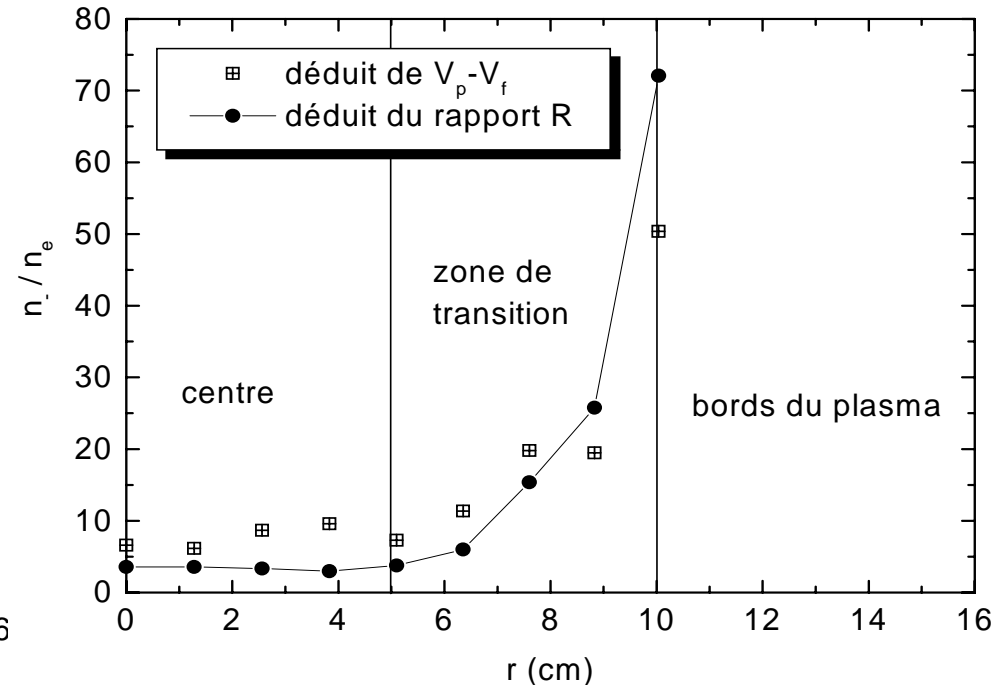
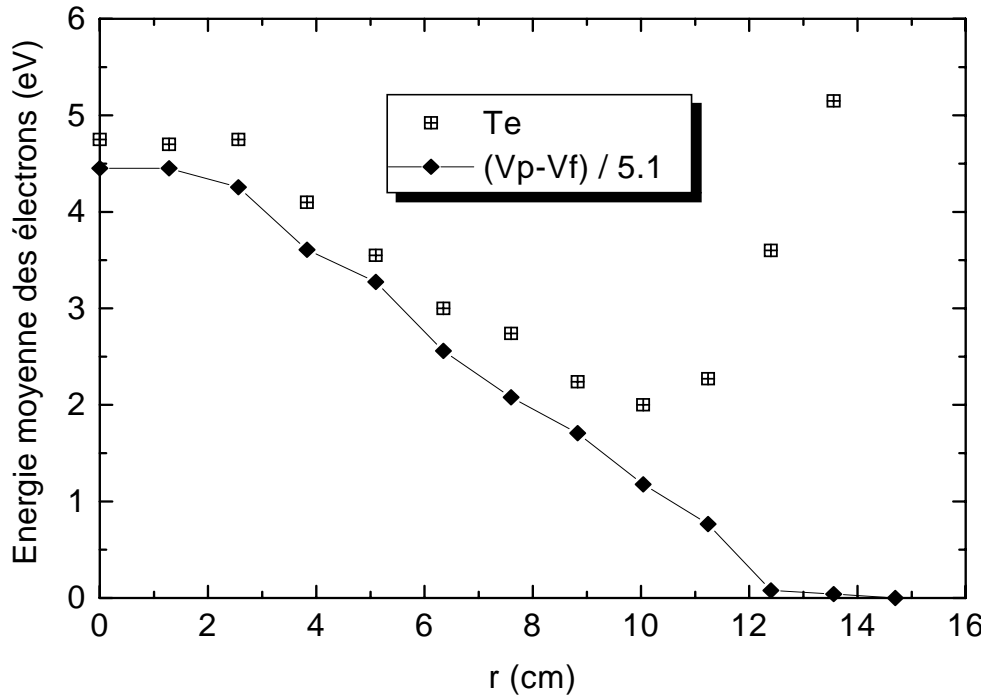
Typical cylindrical probe characteristics in center and edge regions



- On axis, electron current is dominant
- At plasma edge, currents of positive and negative particles are equal
- **The temperature of negative particles is about 0.5 eV**

Profil radial de la fraction d'ions négatifs

Plasma de SF_6 / 400 W / 1 mTorr



α déduit en considérant $\gamma = 10$ sur tout le rayon

Le centre de la chambre est dominé par les électrons

Les bords ne sont constitués que d'ions négatifs et d'ions positifs