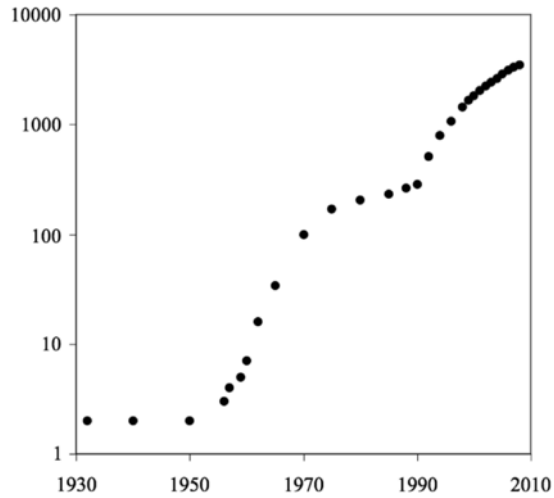


# Étude de plasmas par sondes électrostatiques

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie  
Centre de Recherche Plasma-Matériaux-Nanostructure

S. Béchu, A. Bès, L. Bonny, D. Fombaron,  
A. Lacoste

# Vaste sujet que les sondes électrostatiques ...



N St J Braithwaite and R N Franklin, Plasma Sources Sci. Technol. 18 (2009) 014008

Tore Supra (J. Gunn)

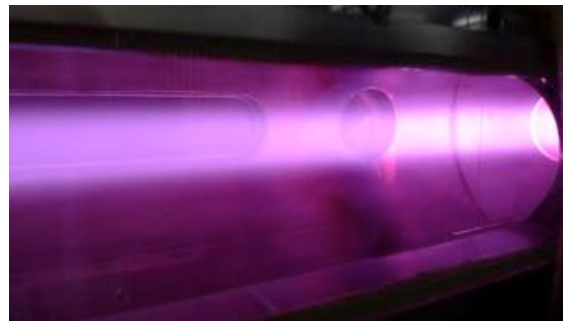


Réacteur diamant (LSPM – Villetaneuse)



Satellite DEMETER

RAID reactor (EPFL-Swiss Plasma Center)



PPS 1350 (SNECMA)

# Vaste sujet que les sondes de Langmuir ...

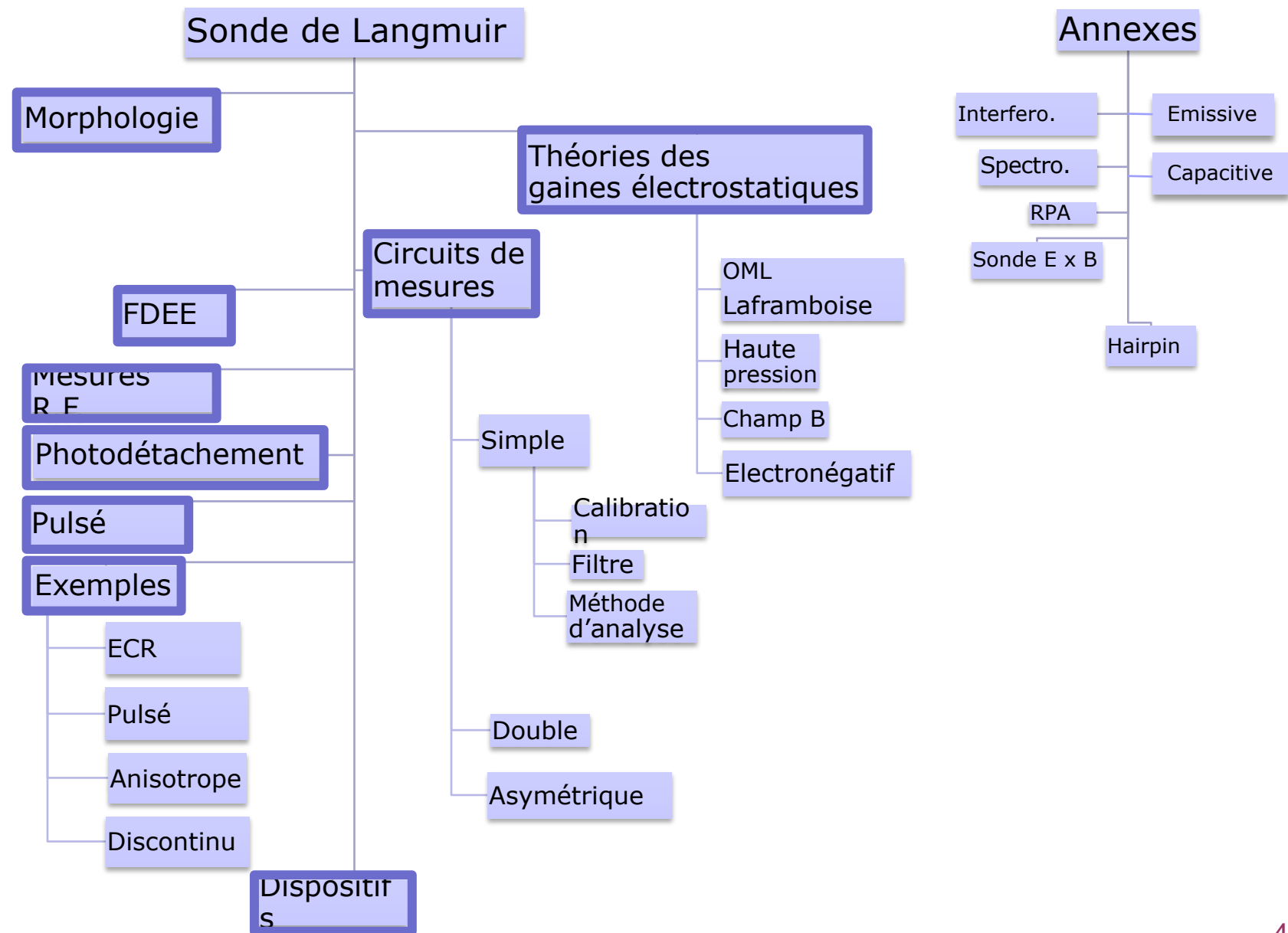
Diagnostic essentiel car le seul permettant d'accéder simultanément, de façon locale et absolue aux caractéristiques du plasma :

- ❑ Potentiels plasma / flottant
- ❑ Densités des électrons / ions (+/-)
- ❑ Température des électrons (ions)
- ❑ Fonction de distribution en énergie des électrons (EEDF)
- ❑ Vitesse / angle de dérive

Hypothèses :

- ❑ Pas de collision dans la gaine + (Maxwell-Boltzmann)
- ❑ Pas d'émission secondaire
- ❑ Toute espèce chargée est neutralisée à la surface de la sonde
- ❑ Petite dimension par rapports aux  $\lambda_{pm}$  dans le plasma

# Sommaire



# Introduction – Dimension des sondes

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de  
mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

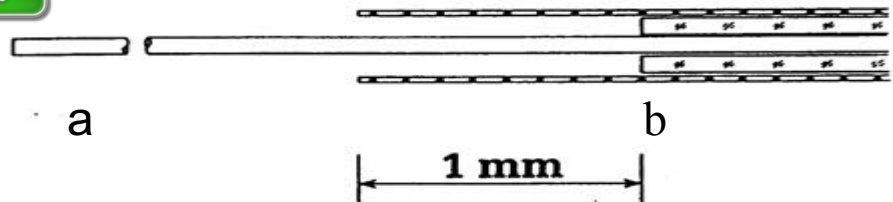
Dispositifs  
expérimentaux

Bibliographie

- **La plus petite possible !**
  - Diamètre du support < au plus petit libre parcours moyen  $\approx$  quelques millimètres
  - Surface de collection en accord avec la densité estimée  $\approx$  quelques  $\text{mm}^2$
- Le diamètre ne doit pas être trop petit afin de limiter  $R_s$ , ni trop important pour ne pas saturer l'ampli de puissance !
- Longueur difficile à estimer dans le cas d'un fil de tungstène de  $100 \mu\text{m}$  !

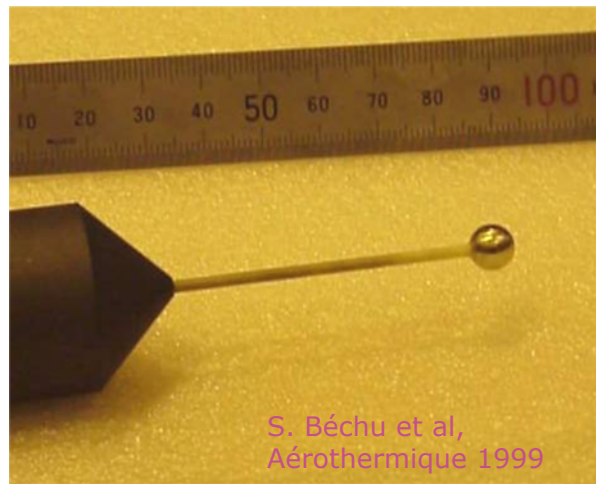
# Introduction - Morphologie des sondes de Langmuir

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



$a = 38 \mu\text{m}$   
 $b = 175 \mu\text{m}$

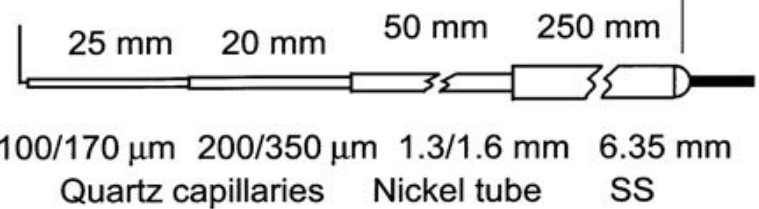
V. Godyak et al,  
 PSST 1, 179, 1992



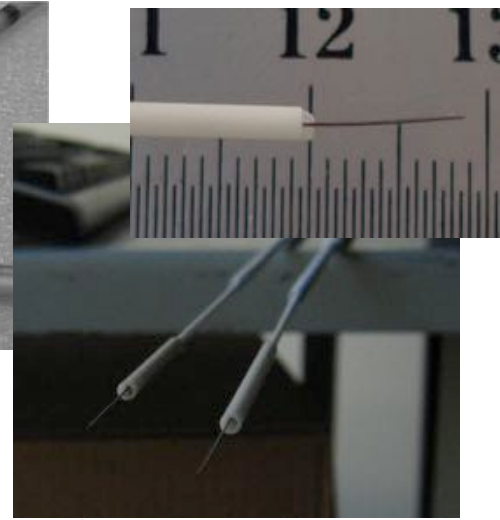
W probe tip  
 $2a=76 \mu\text{m}, l=6 \text{ mm}$



V. Godyak et al,  
 PSST 11, 525, 2002



The most popular bad probe design

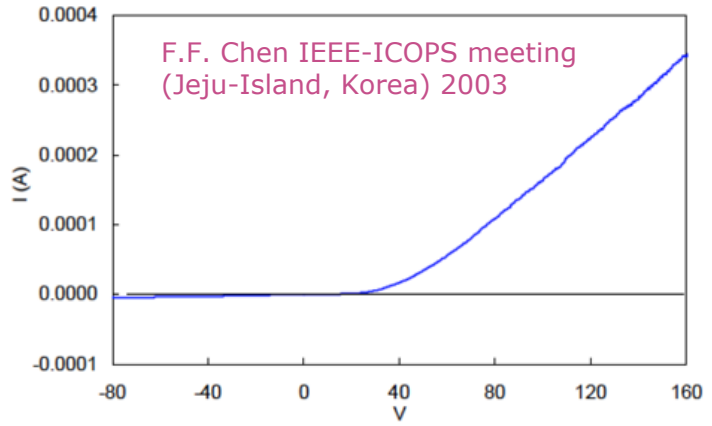
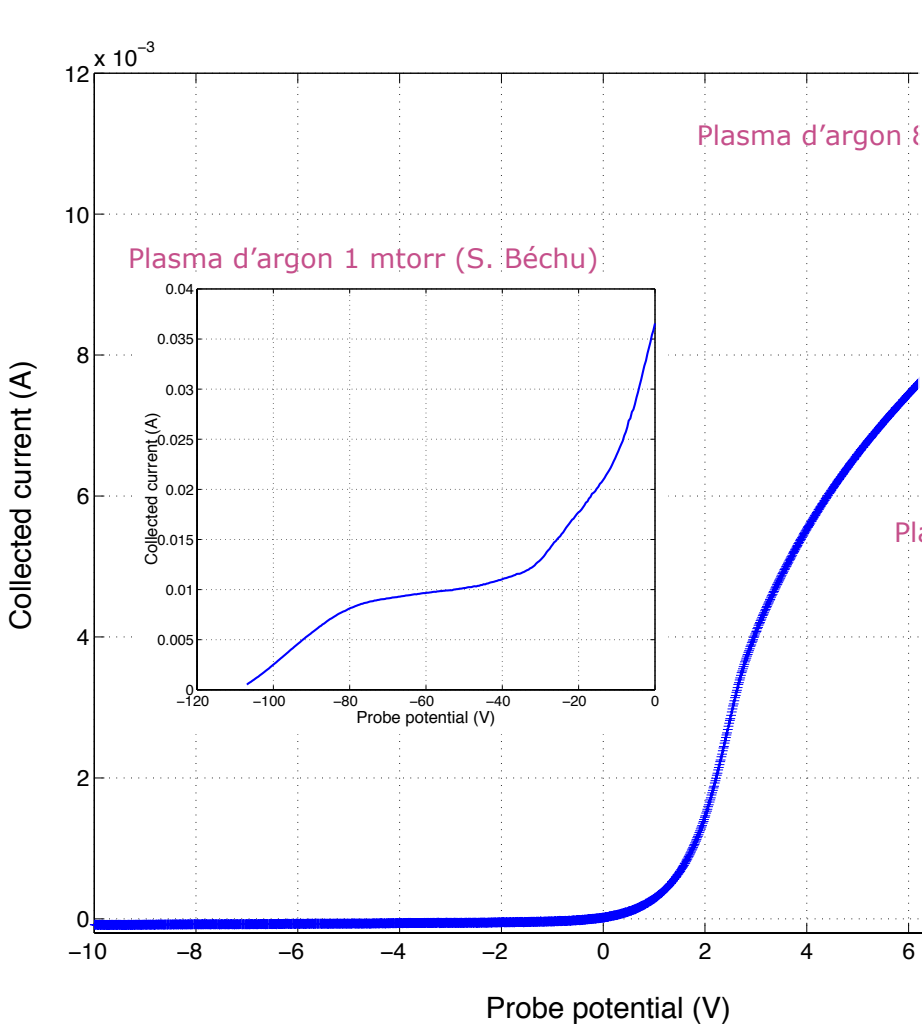


Satellite DEMETER (Lebreton, Arnal)

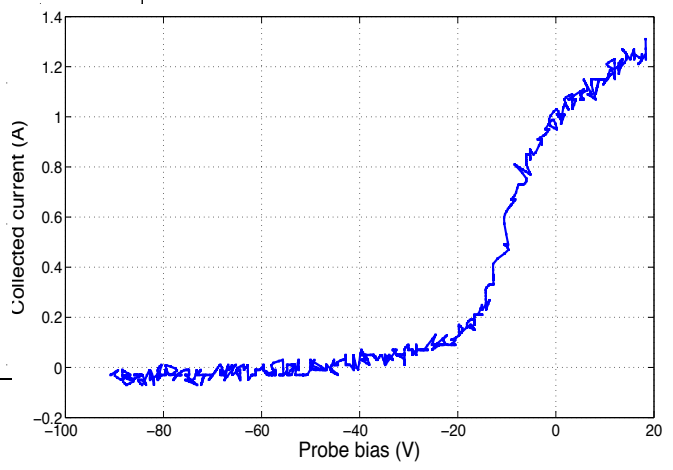
# Introduction – Morphologie des courbes de sondes

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

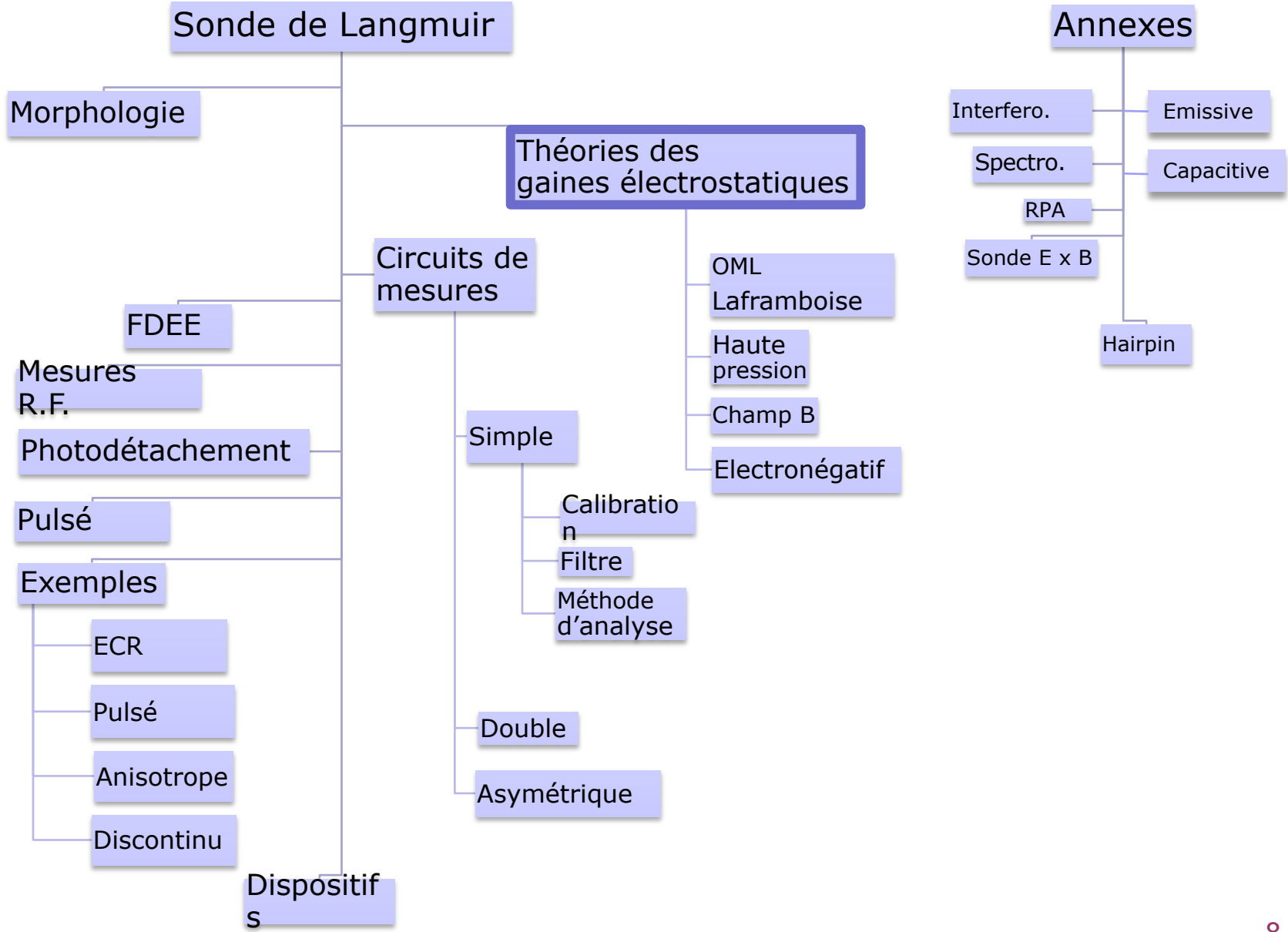
Ce que l'on va mesurer : un courant  $I_s$  en fonction d'une tension  $V_s$



Plasma d'hydrogène 30 G / 14 kW / 2 mtorr (A. Simonin)



# Sommaire





# Théorie sonde plane - Formation de la gaine

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

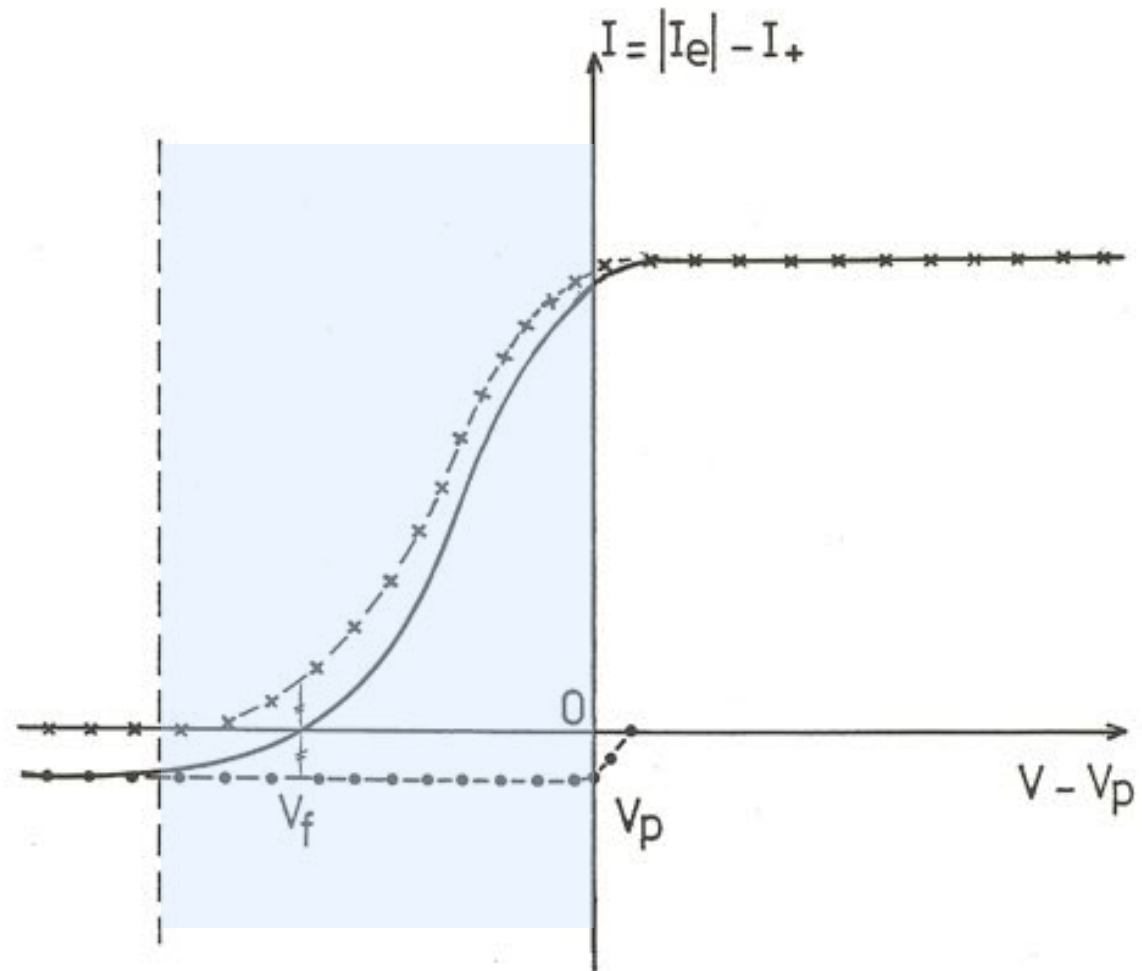
Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution

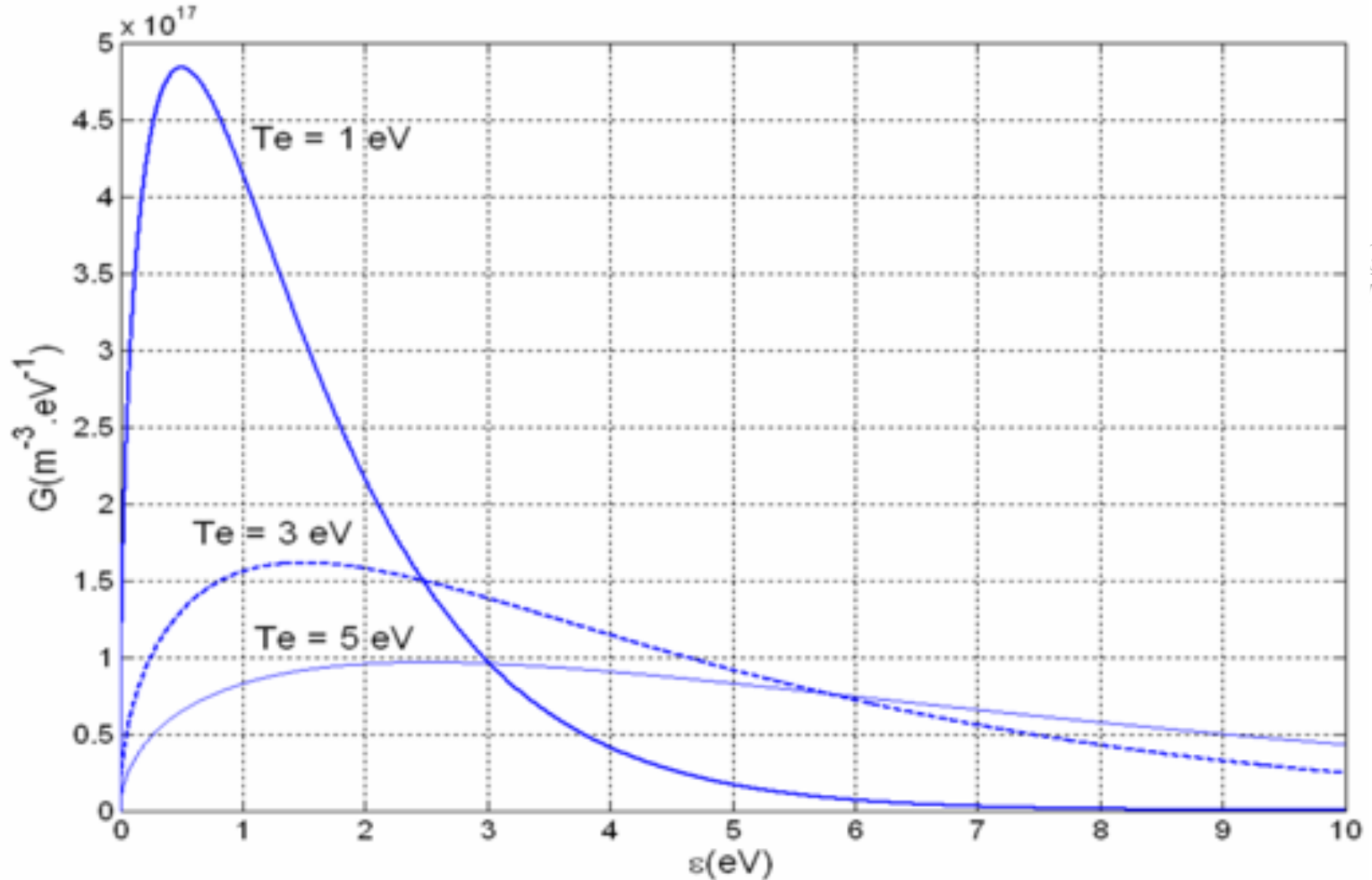


-x-x-x-  $I_e$   
-o-o-o-  $I_+$   
—  $I = |I_e| - I_+$

# Théorie sonde plane - Formation de la gaine $V_f < V_s < V_p$

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## ■ Potentiels répulsifs pour les électrons

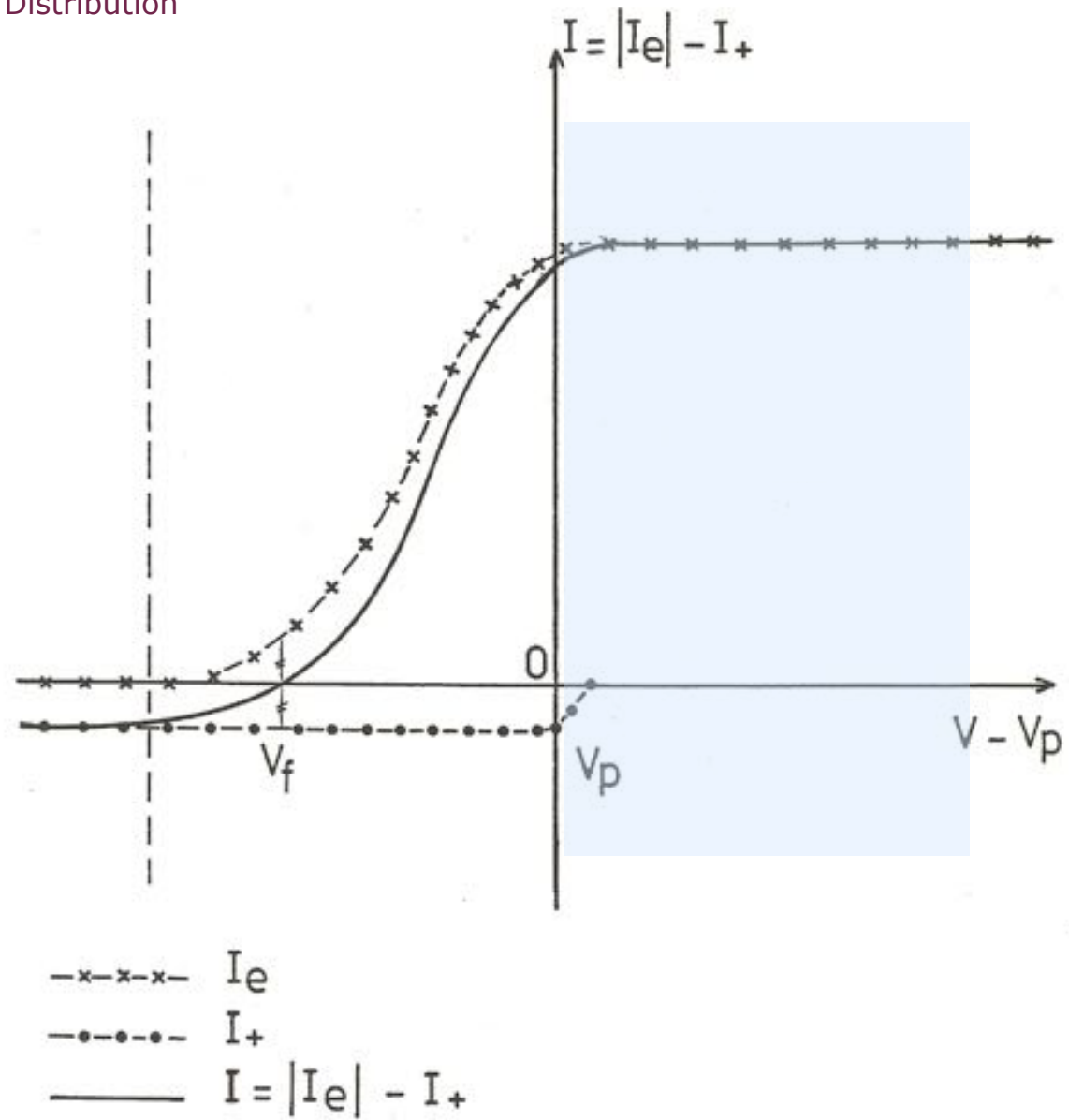


$\frac{s}{e}$

# Théorie sonde plane - Formation de la gaine

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution



# Théorie sonde plane - Formation de la gaine « électronique »

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

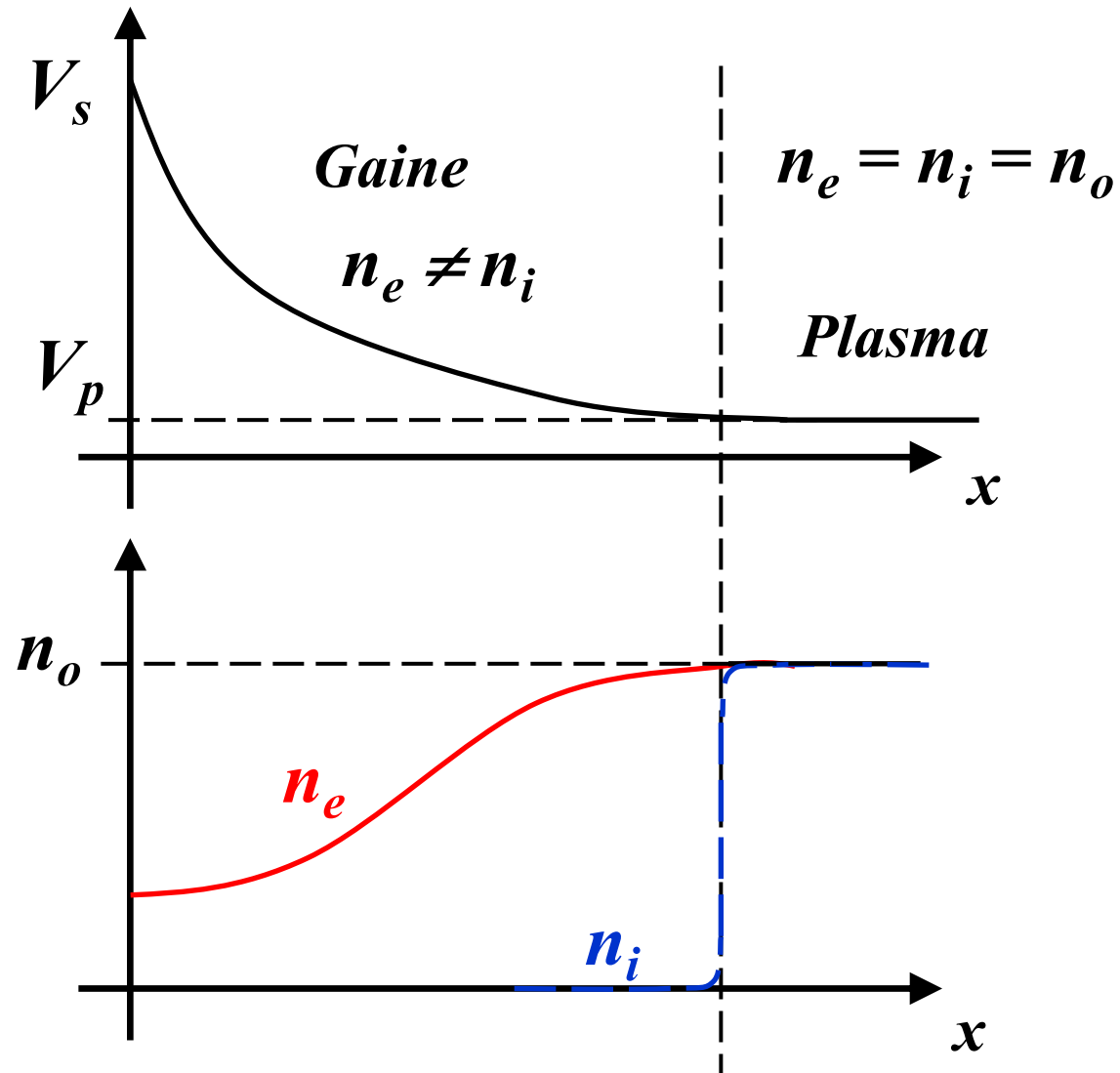
Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution



# Théorie sonde plane - gaine « électronique » $V_s > V_p$

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution

Tous les ions sont repoussés ( $T_i \approx 400-800$  K)

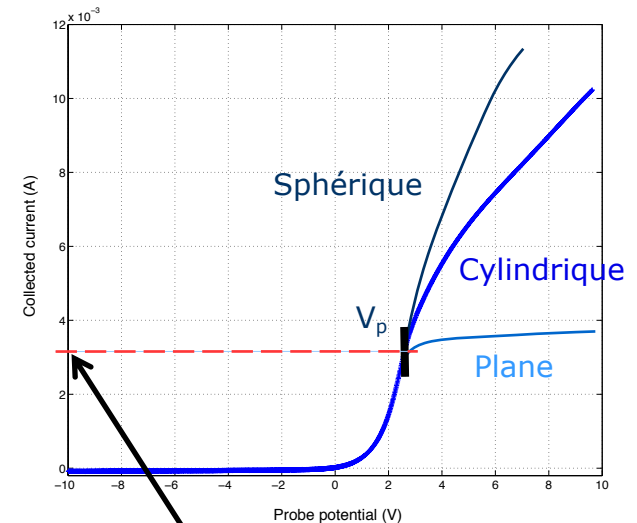
Séparation de charges immédiate

$$n_i(x) = 0$$

Flux aléatoire :  $\Gamma_{electrons} = \frac{1}{4} n_e v_e$

$$v_e = \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}}$$

$$\Gamma_{electrons} = n_e \sqrt{\frac{k_b T_e}{2\pi m_e}}$$



$$I_{electrons} = qA_S n_e \sqrt{\frac{k_b T_e}{2\pi m_e}}$$

# Théorie sonde plane - Formation de la gaine « électronique »

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Cas non collisionnel

- Longueur de Debye

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_o k_b T_e}{q^2 n_e}}$$

- Epaisseur / longueur de gaine

$$l_g = \lambda_D \left( \frac{q(V_S - V_P)}{k_b T_e} \right)^{\frac{3}{4}}$$

## Cas collisionnel

$$l_g = \lambda_D \sqrt{m(V_S - V_P + 3,5) - 4}$$

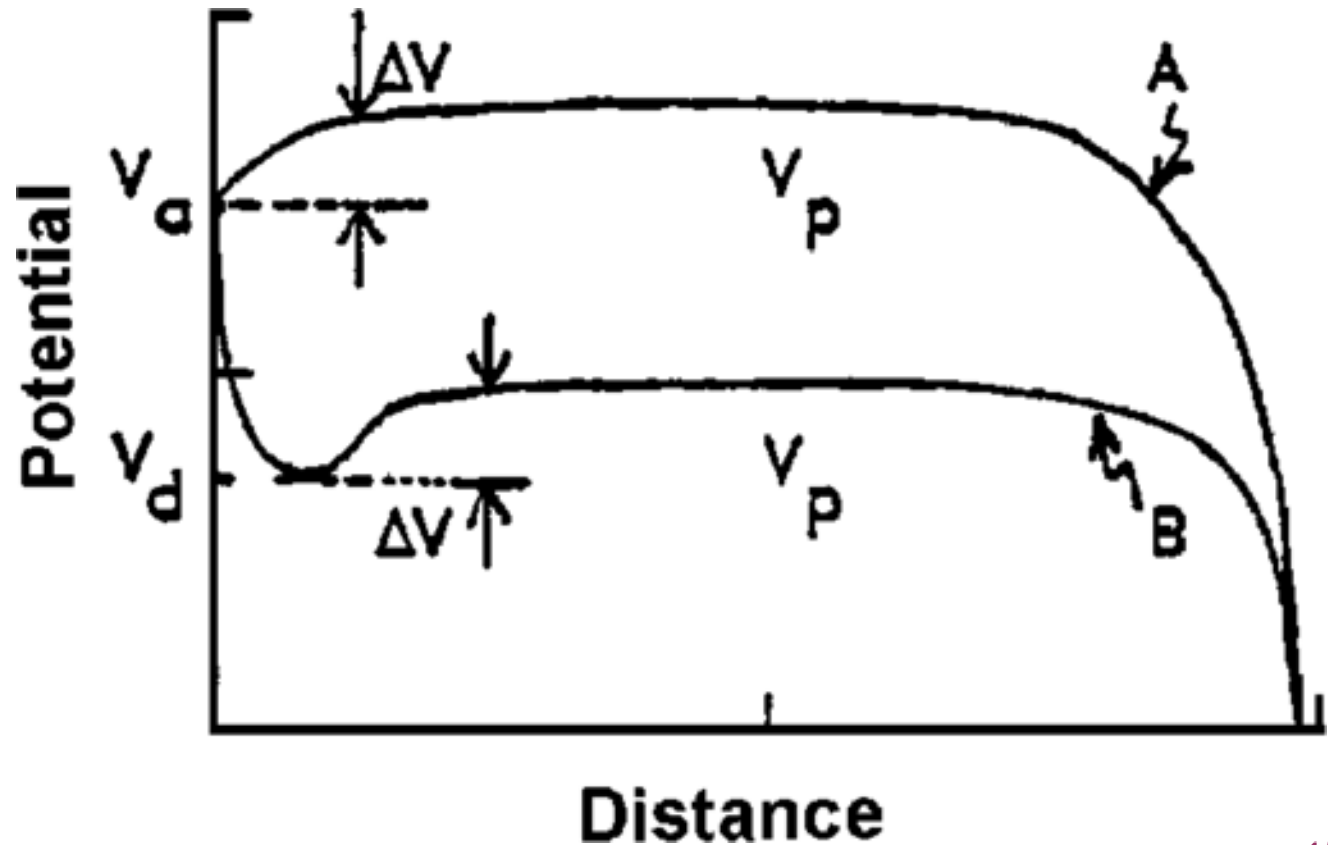
$$m = 0,59 + 1,86 D_\lambda^{0,47}$$

M. Tichy, M. Sicha, P. David, and T. David, Contrib. Plasma Phys. 34, 59

# Théorie sonde plane - Formation de la gaine « électronique »

Tout dépend de la taille de l'objet !

$$S_{obj.}/S_{reacteur} < \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2)$$



# Théorie sonde plane - Formation de la gaine

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

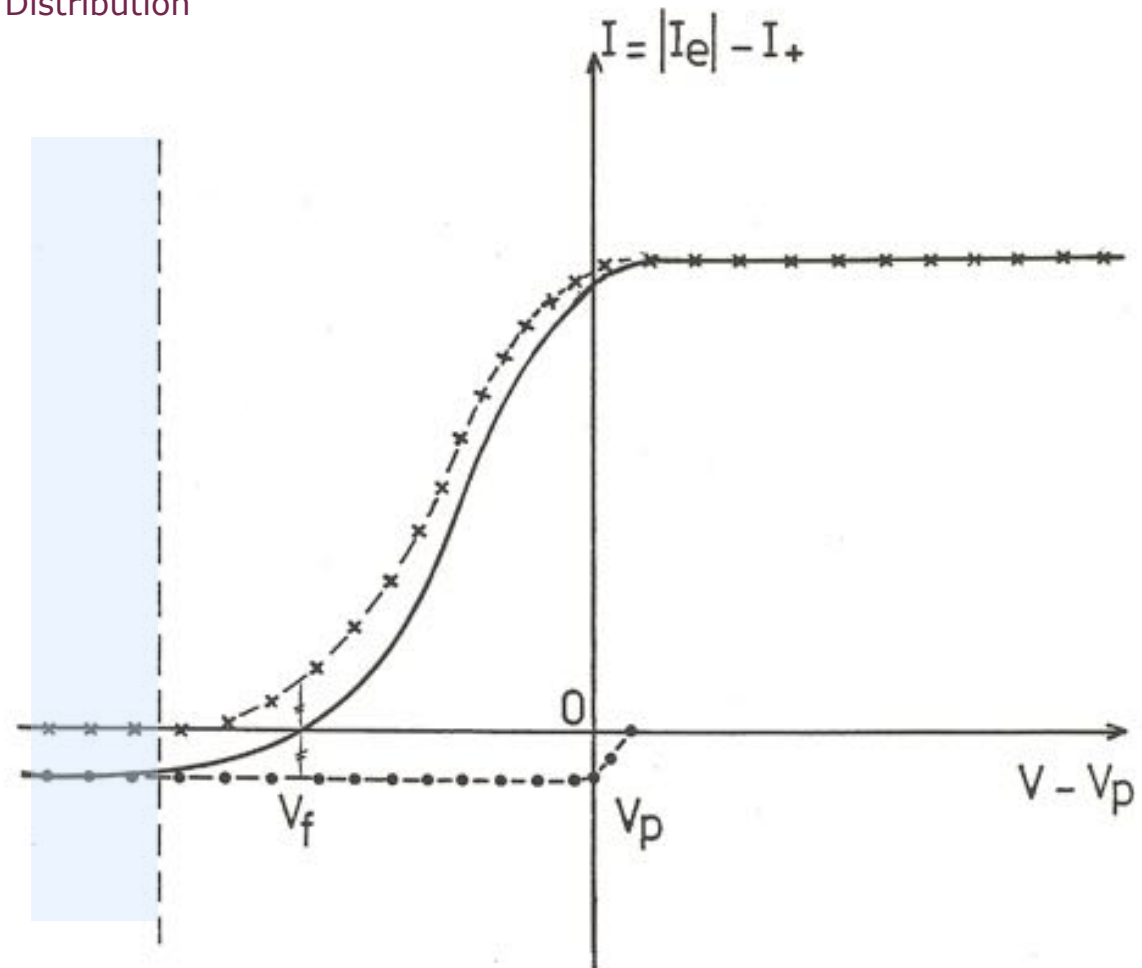
Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution



-x-x-x-  $I_e$   
-.-.-.-  $I_+$   
—  $I = |I_e| - I_+$



## Certains électrons sont repoussés

$$\text{Équation de Poisson : } \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{q}{\epsilon_0} (n_e - n_i)$$

$$\text{Variations des densités : } n_e(x) = n_o e^{\frac{q(\phi(x) - \phi_g)}{k_b T_e}}$$

□ Boltzmann

□ Conservation énergie totale + flux entrée de gaine

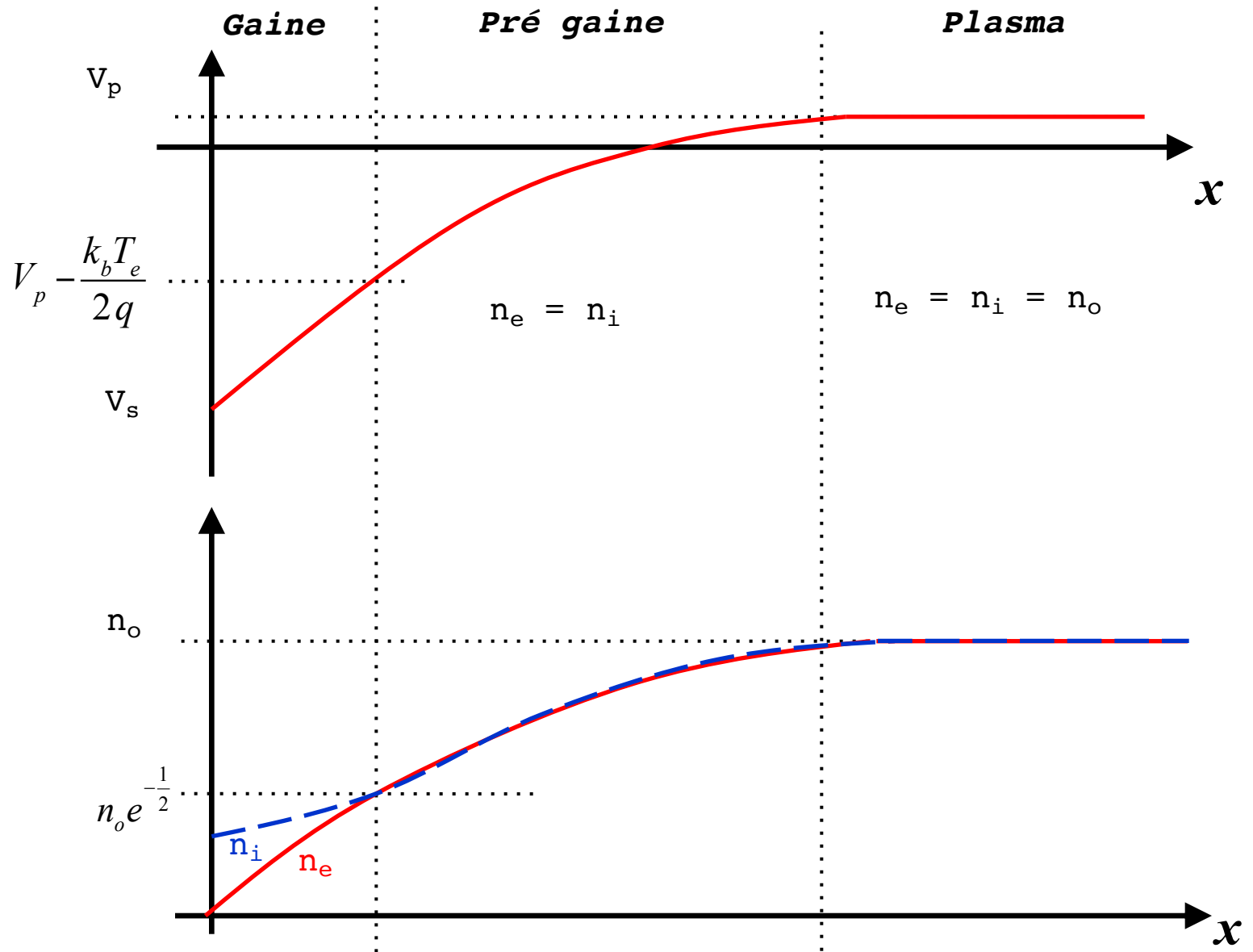
$$n_i(x) = n_o \left[ 1 - \frac{2q(\phi(x) - \phi_g)}{m_i v_g^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

□ Au premier ordre,  $n_i(x) > n_e(x)$  impose

$$v_g \geq \sqrt{\frac{k_b T_e}{m_i}}$$

# Théorie sonde plane - Formation de la gaine « ionique »

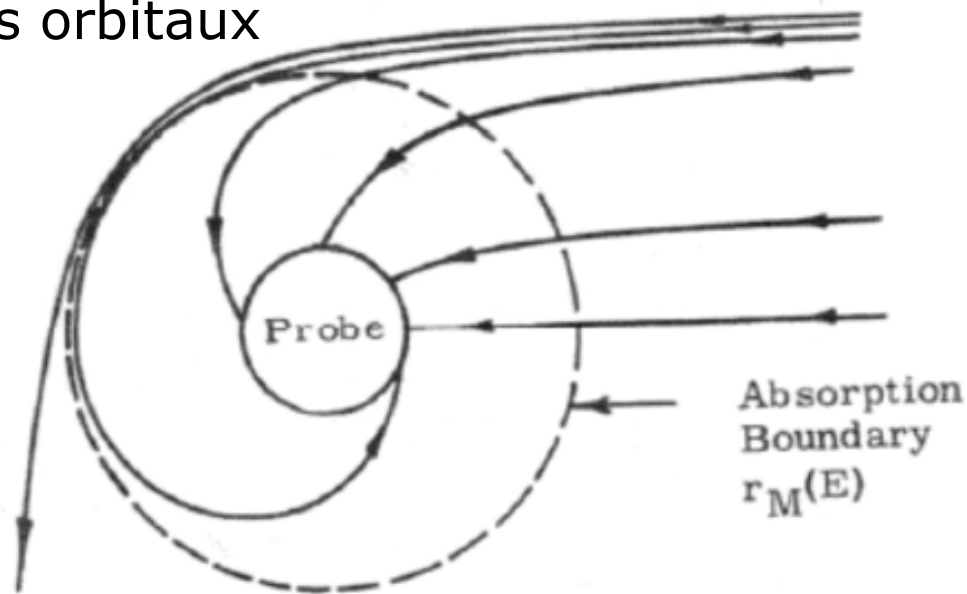
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



# Théorie sonde cylindrique - Formation de la gaine « ionique »

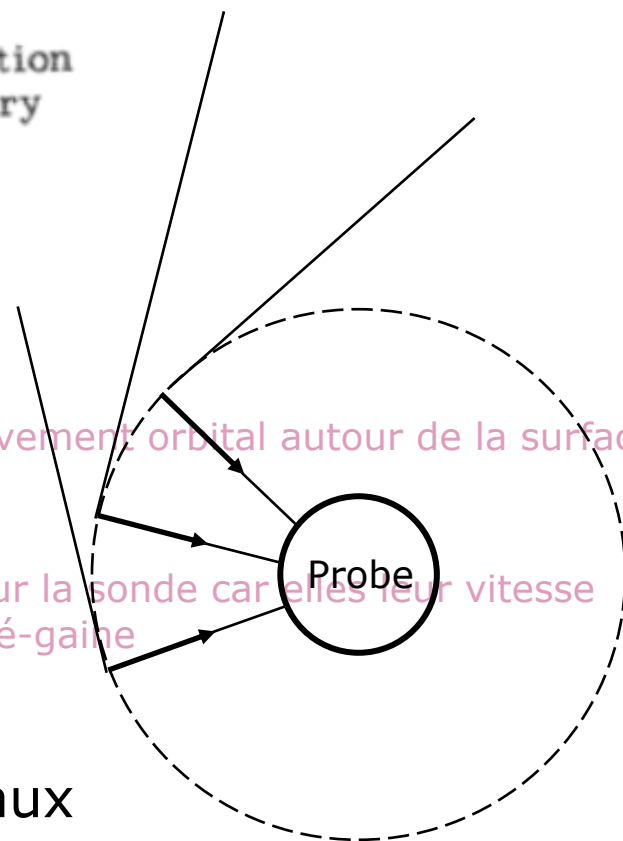
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Mvts orbitaux



es électrons au

- Orbitale : Les particules ont un mouvement orbital autour de la surface de sonde dans la gaine
- Radiale : Les particules "tombent" sur la sonde car elles leur vitesse tangentielle s'est annulée dans la pré-gaine



## Mvts radiaux

# Théorie sonde cylindrique - Formation de la gaine « ionique »

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution

## OML (Orbital Motion Limited – Mott-Smith et Langmuir 1926)

- Courant ionique limité par un mouvement orbital autour de la sonde – géométries cylindrique et sphérique
- Conservation de l'énergie et du moment cinétique
- $\frac{r_S}{\lambda_D} \leq 3$
- Pas de notion de rayon d'absorption qui peut apparaître pour des plasmas denses non-collisionnels.
  - Sonde cylindrique lorsque  $-q_j V_S \gg k_b T_j$  et gaine infinie

$$I_e = A_S q n_o \sqrt{\frac{k_b T_e}{2\pi m_e}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 + \frac{q V_S}{k_b T_e}} \quad I_i = A_S q n_o \sqrt{\frac{k_b T_i}{2\pi m_i}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 - \frac{q V_S}{k_b T_e}}$$

# Théorie – Courants collectés et théories associées

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

Maxwell-Boltzmann Distribution

VOL. 8, NO. 12, DECEMBER 1970

AIAA JOURNAL

2215

## Collisionless Electrostatic Single-Probe and Double-Probe Measurements

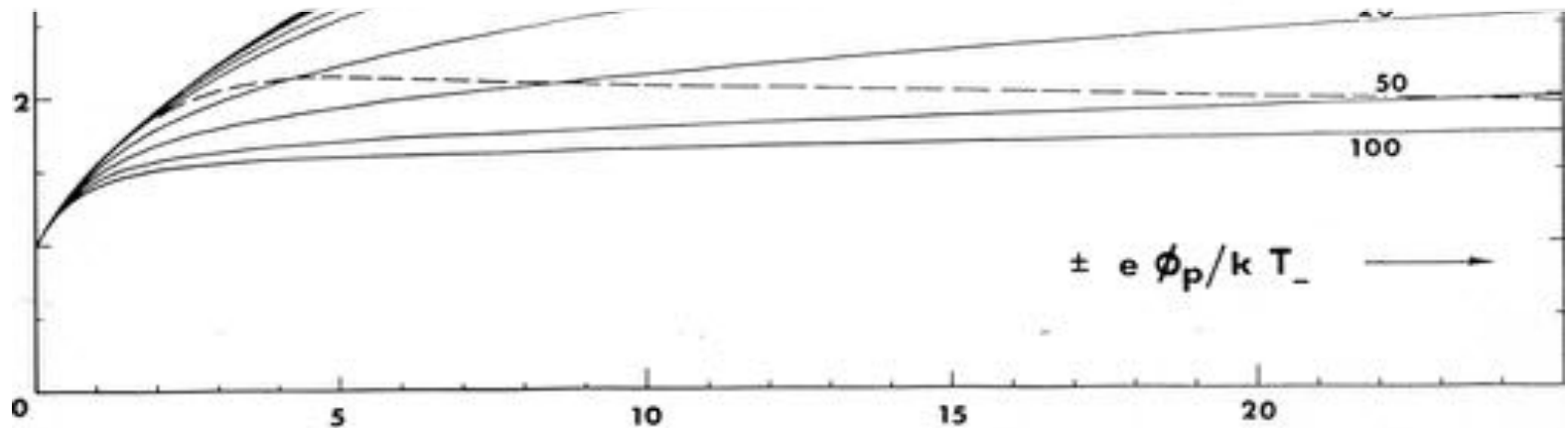
E. W. PETERSON\*

*University of Minnesota, Minneapolis, Minn.*

AND

L. TALBOT†

*University of California, Berkeley, Calif.*



# Théorie – Courants collectés et théories associées

## Maxwell-Boltzmann Distribution

### ■ ABR (Allen – Boyd – Reynolds (1957))

- Mouvement radial des particules

- $0,5 < \frac{r_S}{\lambda_D} < 70$

- Évaluation des courants collectés

- Équation différentielle donnant l'évolution du potentiel dans la gaine jusqu'à la sonde

$$\frac{d^2\eta}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{d\eta}{d\xi} - \frac{J}{\xi} \frac{1}{\sqrt{\eta}} + e^{-\eta} = 0 \quad \eta = \frac{qV}{k_b T_e} \quad \xi = \frac{r_S}{\lambda_{De}}$$

- Fonction analytique approchée (Klugee 1985)

$$I_i = a \left( \frac{qV_S}{k_b T_e} \right)^c$$

# Théorie – Courants collectés et théories associées

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

- Les mesures réalisées en plasmas froids basse pression donnent généralement :  $n_i \approx 1,5 \times n_e$ 
  - Constatation effectuée en plasma H<sub>2</sub> ou Ar
  - Connaissance imparfaite de la masse des ions collectés
- Choix de la 'vraie' densité :
  - $n_i^+ = n_e + n_i^-$
  - Les procédés utilisant l'assistance ionique, pour être efficaces sont dépendants de la densité  $n_i^+$
- Références bibliographiques :
  - M. B. Hopkins, W. G. Graham, Rev. Sci. Instrum. 57 (9) (1986), pp.2210-2217
  - K. Shirai, T. Iizuka, S. I. Gonda, Jpn. J. Appl. Phys., 28, 5, (1989) p. 897

# Théorie – masse des ions

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de  
mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs  
expérimentaux

Bibliographie

## Plasmas de gaz atomiques

- ❑ Peu d'erreur commise **MAIS** possibilité d'ions négatifs (iode)

## Plasmas de gaz moléculaires

- ❑ Connaissance des phénomènes de formation des molécules ( $H_3^+$ ,  $N_2^+$ , ...)

## Plasmas de gaz réactifs

- ❑ Spectrométrie de masse pour estimer les types d'ions présents ( $CH_4^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $CH^+$ , ...)



# Théorie – théories associées développées

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Authors	Hypothesis	Symmetry	Ion current density
Bohm	Thin sheath $r_p/\lambda_d = \infty$	Plane	independent of $V_p$
Allen, Boyd and Reynolds (Chen)	$0.5 \leq r_p/\lambda_d \leq 70$ radial motion $T_i = 0$	Spherical cylindrical	Results presented in graphical form
Mott-Smith and Langmuir	Infinite sheath $T_i = 0$  no absorption radius	Spherical cylindrical	Analytical solution: $j_i \propto (1 - eV_p/kT_i)$ where $V_p < 0$ (spherical probes) $j_i \propto (1 - eV_p/kT_i)^{1/2}$ where $V_p < 0$ (cylindrical probes)
Bohm, Burhop and Massey	Thin sheath monoenergetic ions absorption radius (see figure 1)	Spherical	$J_i = \kappa n e \left( \frac{kT_e}{M} \right)^{1/2}$ where $\kappa$ depends slightly on the ion energy, independent of $V_p$
Bernstein and Rabinowitz (Chen)	Thick sheath $5 \leq r_p/\lambda_d \leq 15$ $T_i = 0$ monoenergetic ions absorption radius	Cylindrical spherical	Results presented in graphical form
Laframboise (Kiel; Peterson and Talbot)	Wide range of: $r_p/\lambda_d, T_i/T_e, V_p$ Maxwellian distribution of ions	Cylindrical spherical	Results presented in graphical form (several approximate analytical fits)

# Théorie – Courants collectés plasma électronégatif

## Bohm (1949)

- Modification de la théorie de Bohm en plasma électronégatif

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

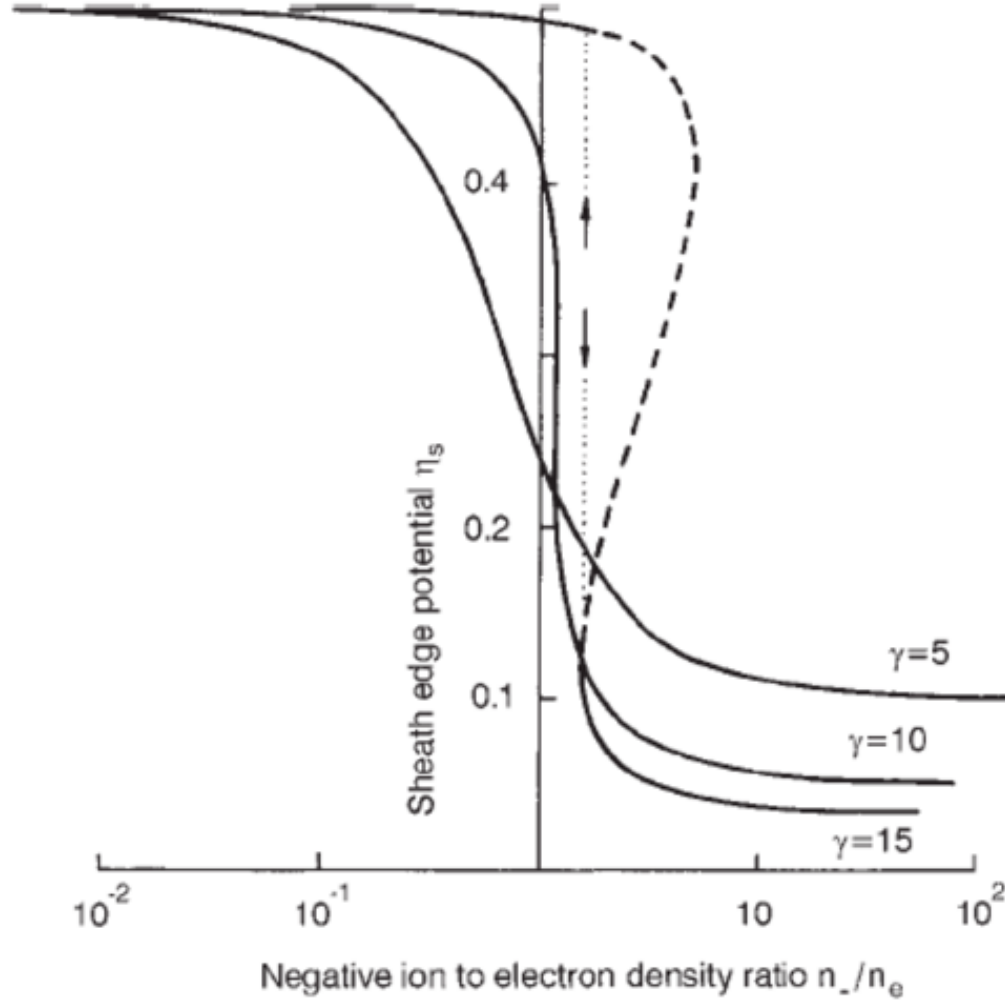
$$v_{BA} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i} \frac{1 + \alpha_s}{1 + \gamma\alpha_s}} = v_{Bohm} \sqrt{\frac{1 + \alpha_s}{1 + \gamma\alpha_s}} \leq v_{Bohm}$$

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

J. Bredin *et al.* Appl. Phys. Lett **102**, 154107 (2013)

# Théorie – Courants collectés plasma électronégatif

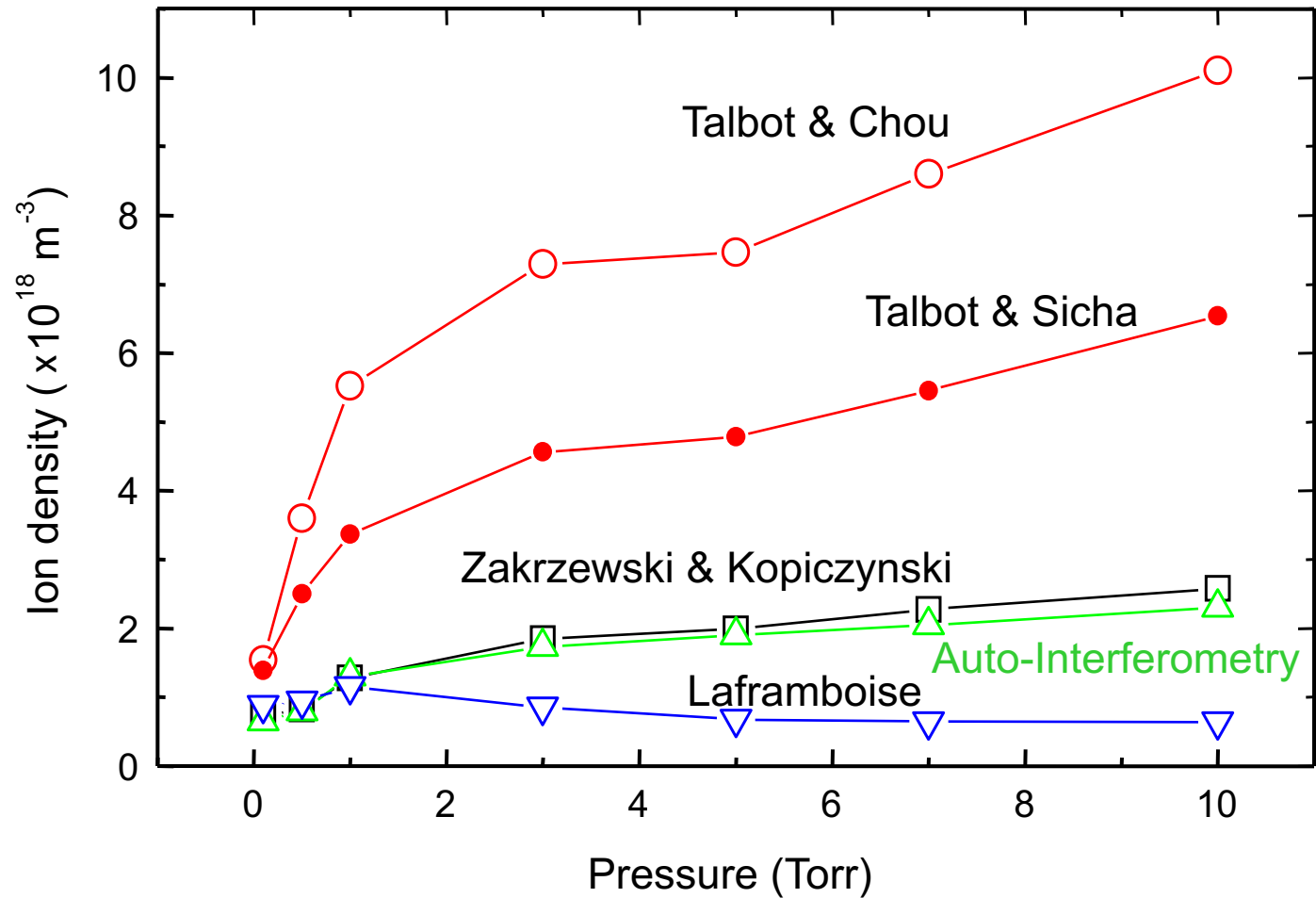
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



$$\gamma = \frac{T_e}{T_-}$$

# Théorie – Courants collectés et théories associées à haute pression > 1 torr

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



# Théorie – Courants collectés et théories associées à haute pression > 1 torr

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

Zakrzewski *et al.* utilisent deux coefficients pour rendre compte des deux phénomènes antagonistes

$I_p = \gamma_1 \gamma_2 I_L$        $I_L$  représente le courant adimensionné de Laframboise

$$X_i < 1 \quad \gamma_1 = 1 + X_i \left( \frac{I_{ABR}}{I_L} - 1 \right) \quad \gamma_2 = \frac{3 - 2 \times \exp(-X_i)}{1 + 2 \times X_i}$$

$$X_i > 1 \quad \gamma_1 = \left( \frac{I_{ABR}}{I_L} \right) \quad \gamma_2 = \frac{3 - \exp(-X_i)}{2 \times (1 + X_i)}$$

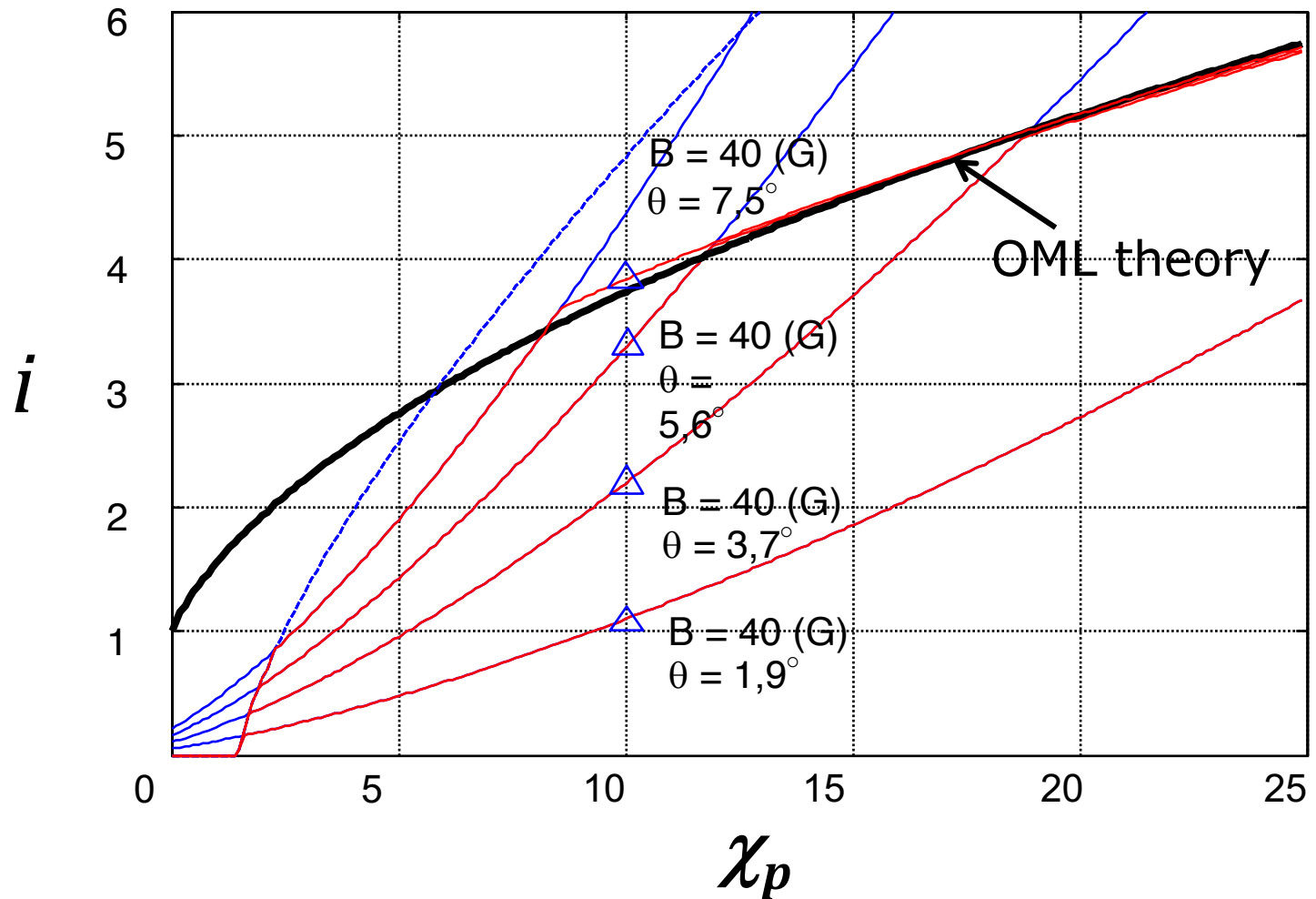
Z. Zakrzewski, T. Kopiczynski, Plasma Phys. 16 (1974), p. 1194

M. Šícha, M. Tichý, V. Hrachový, P. David, T. David, and J. Touš, Jan. 1994, Contrib. to Plasma Phys., vol. 34, no. 1, pp. 51-57.

M. Tichý, M. Šícha, P. David, and T. David, 1994, Contrib. to Plasma Phys., vol. 34, no. 1, pp. 59-68.

# Théorie – Courants collectés et théories associées à la présence de champ magnétique

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie




J. G. Laframboise, J. Rubinstein, Phys. Fluids. 19, 12 (1976) 1900-1908  
J. Rubinstein, J. G. Laframboise, Phys. Fluids. 21, 9 (1978) 1655-1656  
J. G. Laframboise, L. J. Sonmor, J. Geophys. Res. 98 (1993) 337-357  
J. Rubinstein, J. G. Laframboise, , Phys. Fluids. 26, 12 (1983) 3624-3627  
J. Rubinstein, J. G. Laframboise, Phys. Fluids. 25, 7 (1982) 1174-1182

# Théorie – Courants collectés et théories associées à la présence de champ magnétique

$$C_{ste} \frac{d^2 I_S}{dV_S^2} \times f(eV)$$

$$\psi(\varepsilon) = \frac{\psi_0}{\sqrt{\varepsilon}}$$

$$\psi_{\perp}(\varepsilon) = \frac{R_S \ln\left(\frac{\pi L_p}{4R_p}\right)}{16\gamma R_L(\varepsilon, B)}$$

$\psi_0 \geq 100$  &  $B$  perpendicular 


$$f(\varepsilon) = \frac{3\sqrt{2m_e R_p} \ln\left(\frac{\pi L'}{4R_s}\right) dI}{32q^3 S R_L(\varepsilon, B) V} \frac{dI}{dV}$$

$$\gamma = 0.71 + 0.25 \frac{\lambda_e}{R_p} \quad \psi_{//}(\varepsilon) = \frac{\pi L_p}{64\gamma R_L(\varepsilon, B)}$$

$R_L$  : Larmor radius

$\lambda_e$  : electron mean freepath

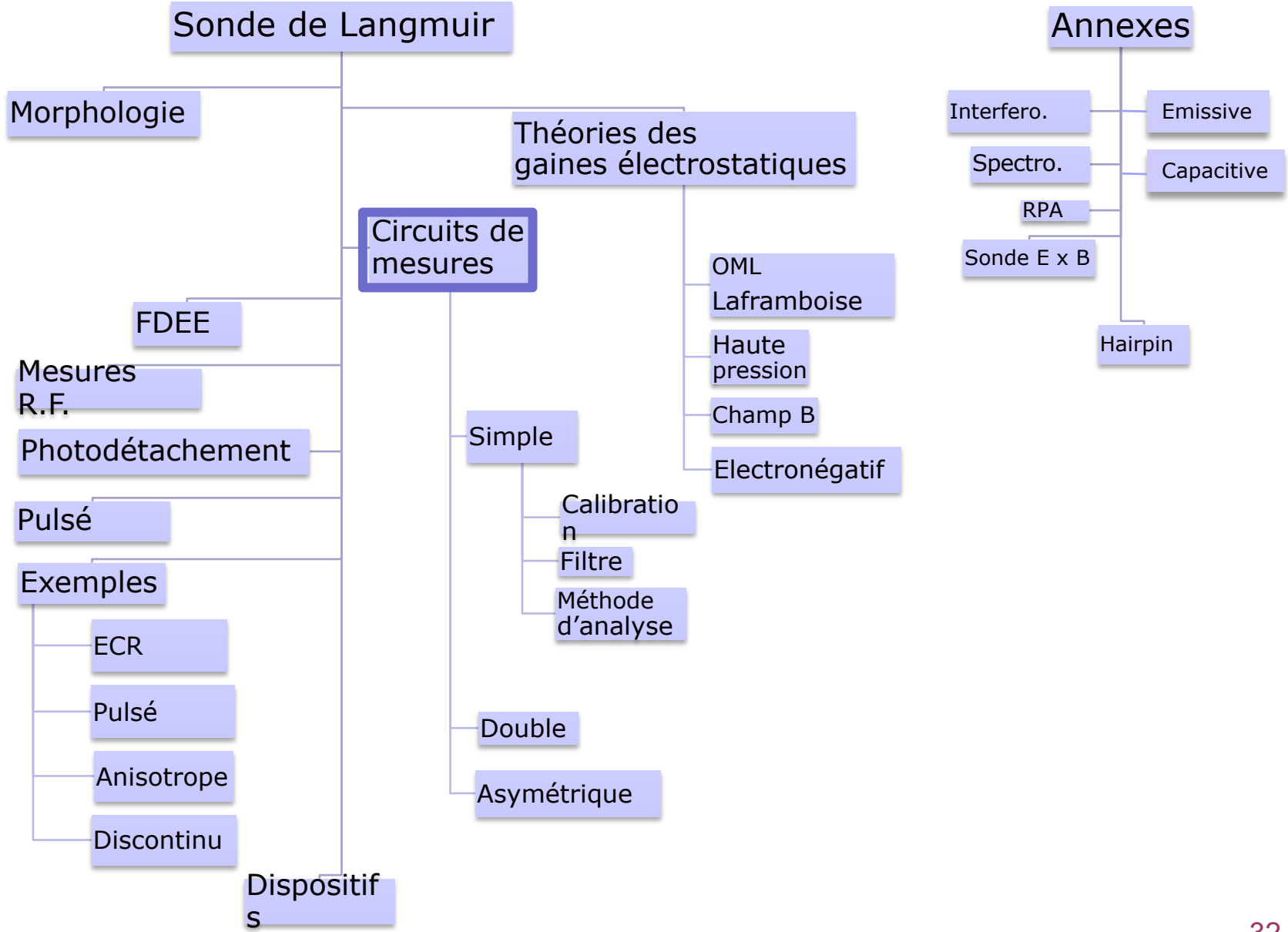
$R_p; L_p$  : Probe radius and length

$\psi_0 \approx 1$  

$$C_{ste} \frac{d^2 I_S}{dV_S^2} = f(eV) - \int_{eV}^{+\infty} K_v''(\varepsilon, V) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad K_v''(\varepsilon, V) = \frac{2\psi(\varepsilon)}{\varepsilon(1+\psi(\varepsilon))^3}$$

Arslanbekov et al, Plasma Sources Sci. Technol. **3** (1994) pp 528-538  
 Popov et al, Plasma Phys. Control. Fusion **51** (2009) 065014

# Sommaire

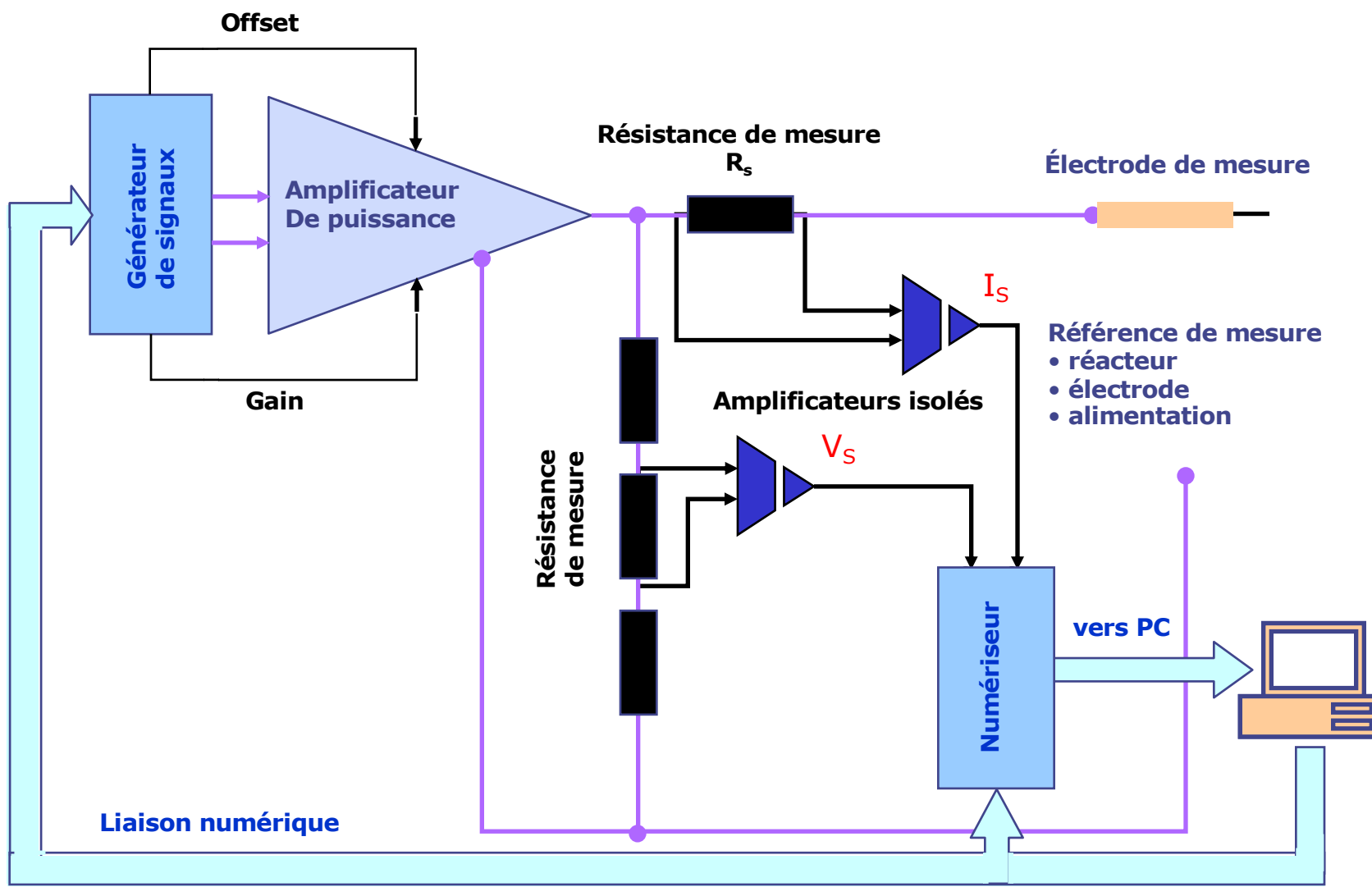




# Circuits de mesures – cas général

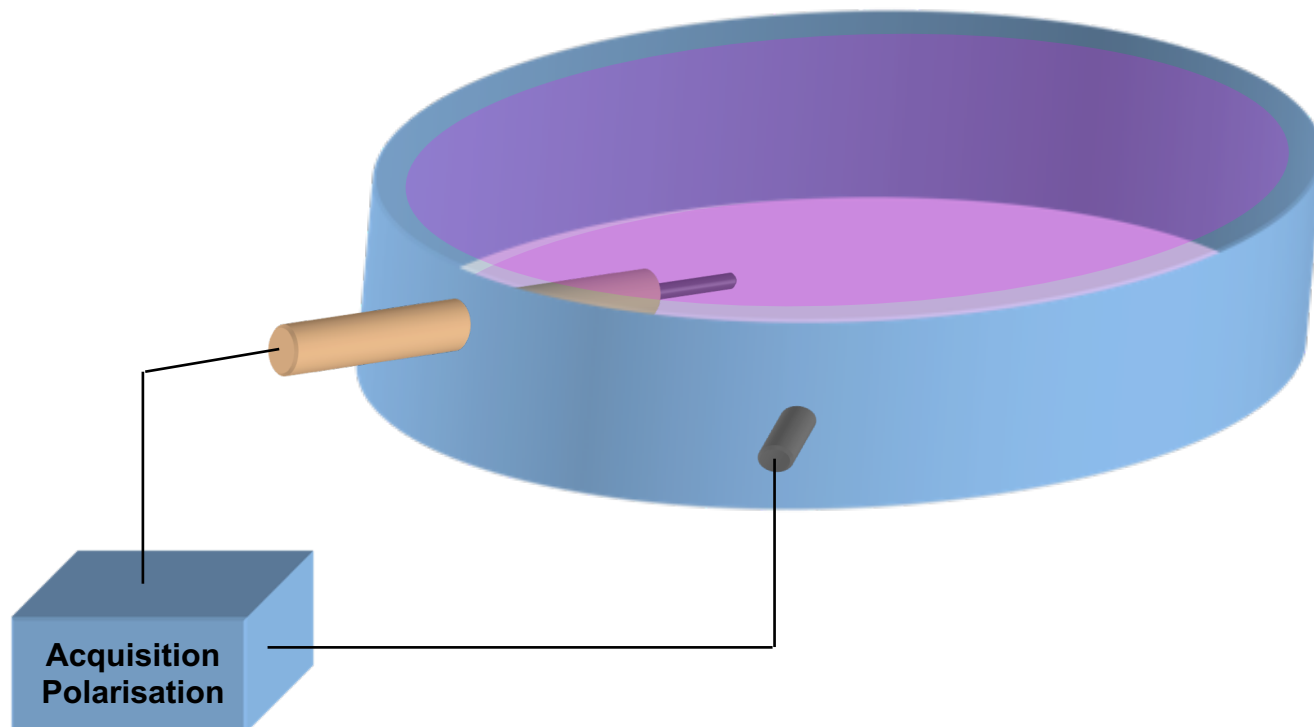
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## ■ Classique (DC – DC pulsé et MW)



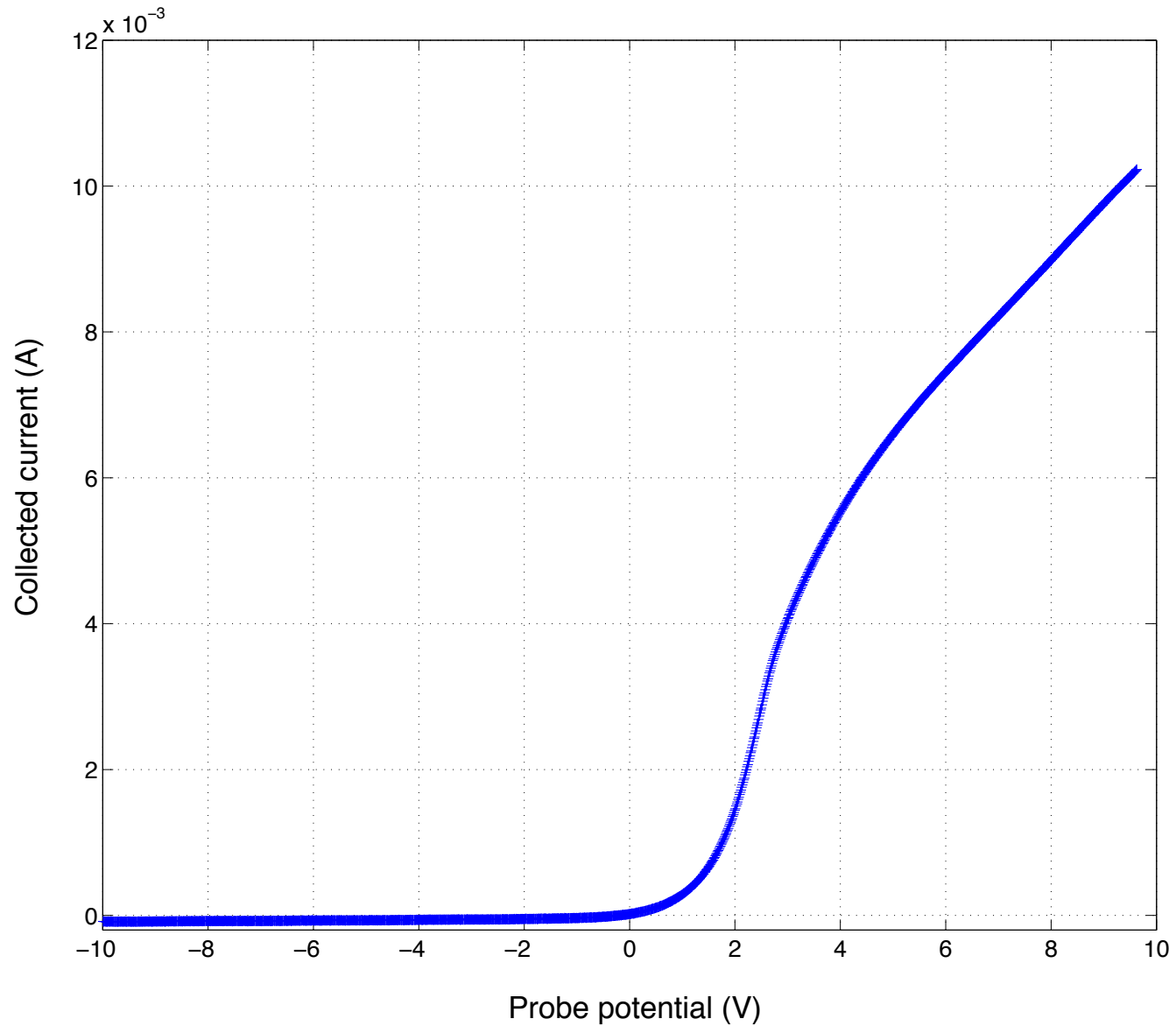
## Doubles

- Simple :  $V_p$ ,  $V_f$ ,  $N_e$ ,  $N_i$ ,  $T_{e\text{ froids}}$ ,  $T_{e\text{ chauds}}$ ,  $V_{\text{dérive}}$ , FDEE
  - Mise en œuvre simple, coût limité
  - La référence électrique doit être bonne



# Circuits de mesures – sonde double asymétrique (simple)

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

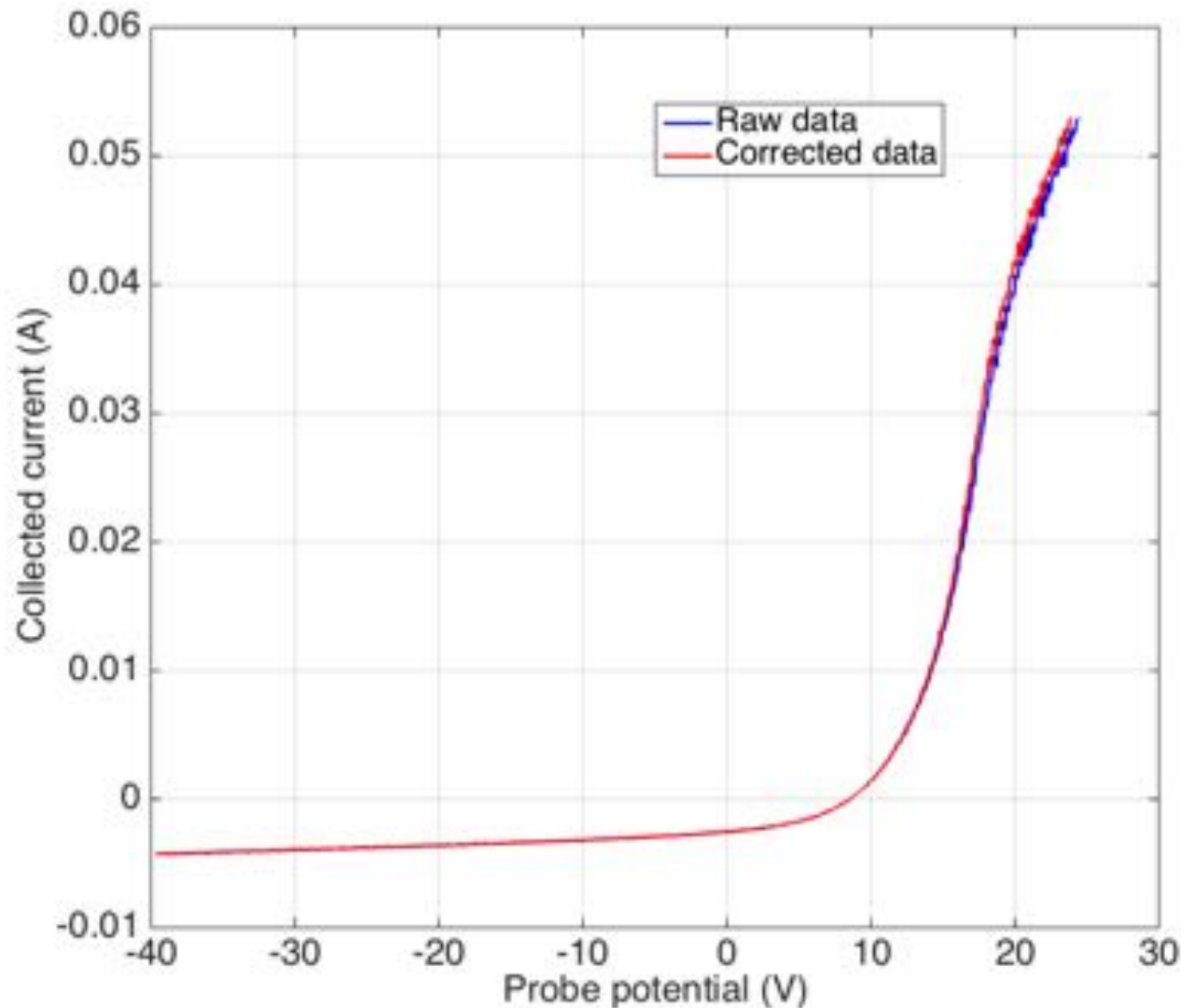


# Influence de la résistance de mesure $R_s$

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

$$V_{\text{corrigée}} = V_s - I_s \times R_s$$

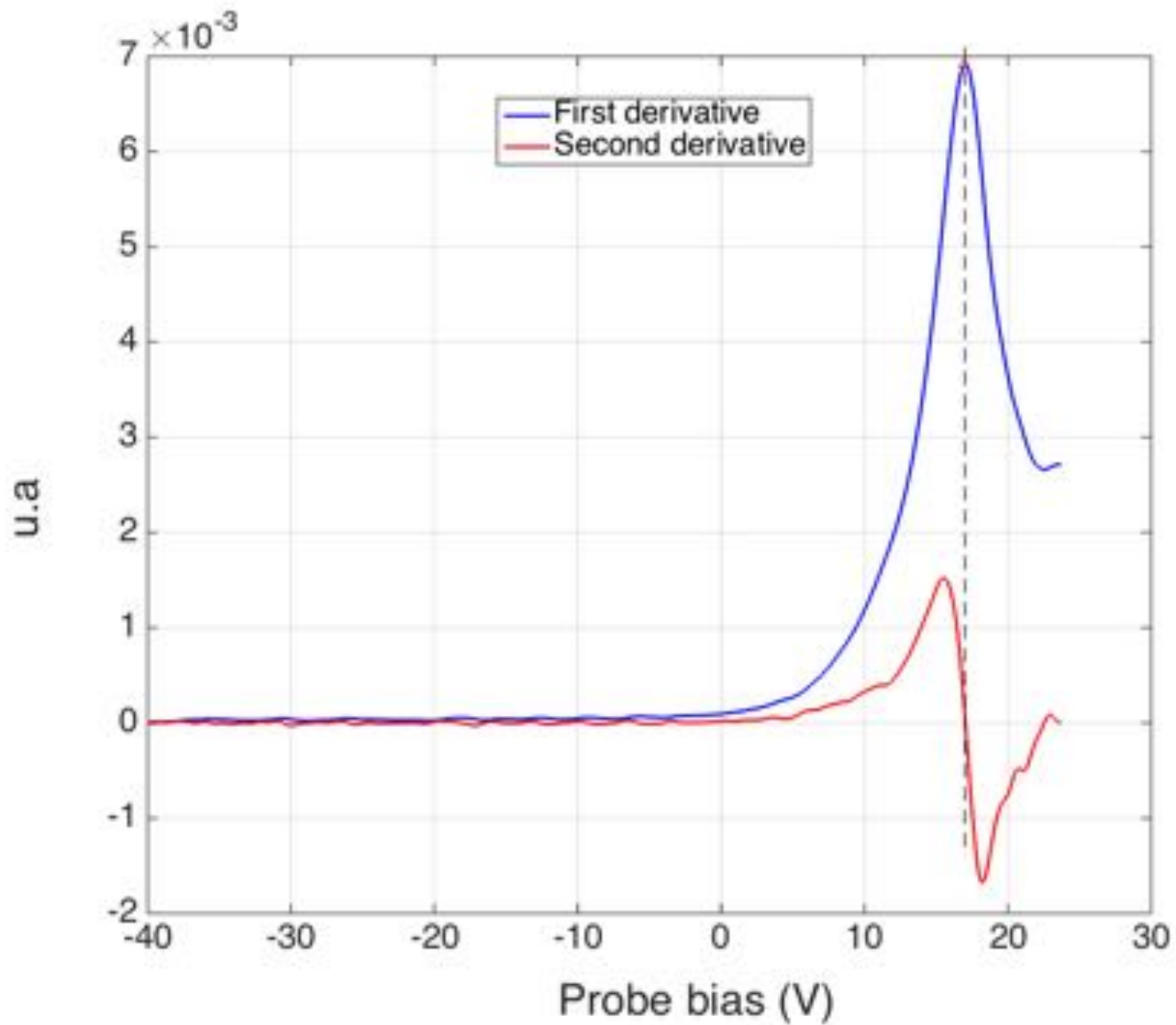
Pas de modification  
courant



# Méthodes d'analyse des courbes $I_s(V_s)$

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Proc  
point  
Déte  
Réfé  
Estir



des

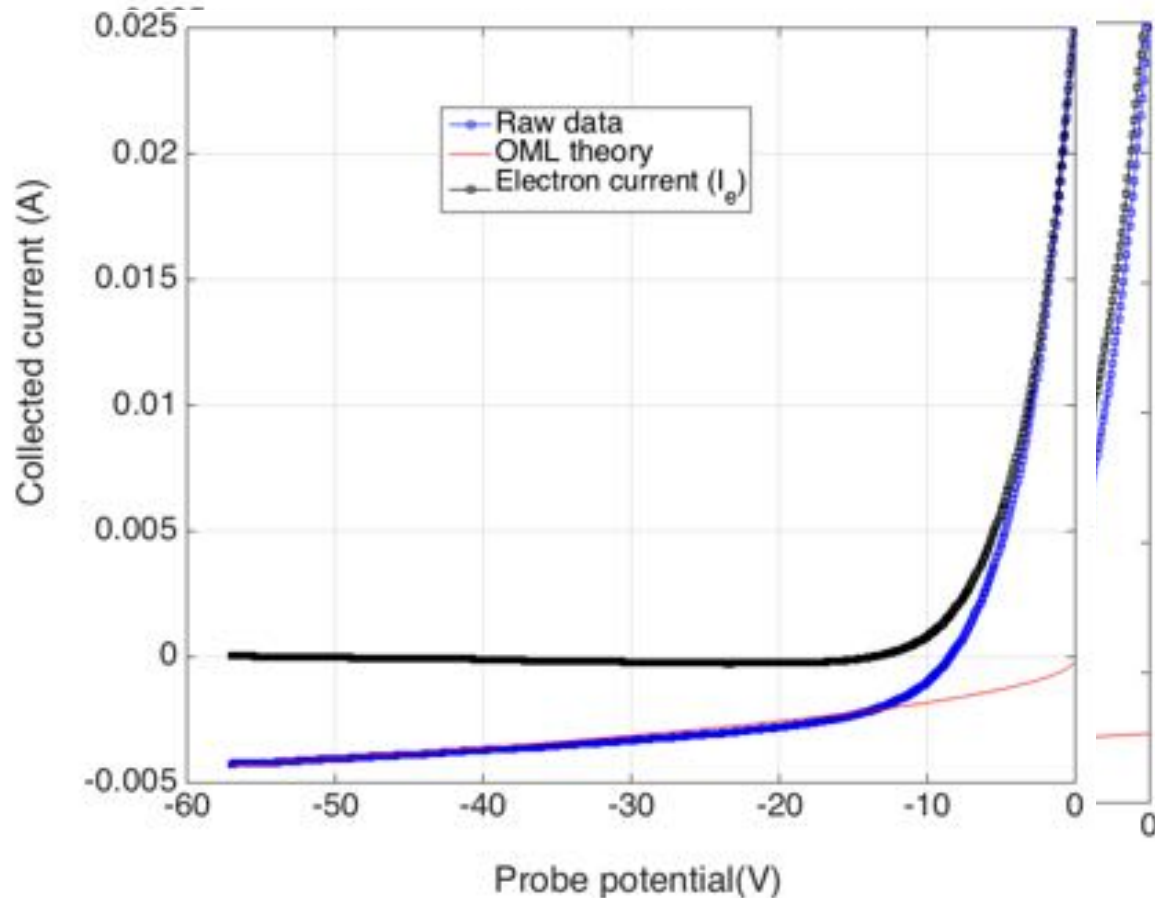
)

# Méthodes d'analyse des courbes $I_s(V_s)$

Calcul du courant ionique sur  $V_s < 0$

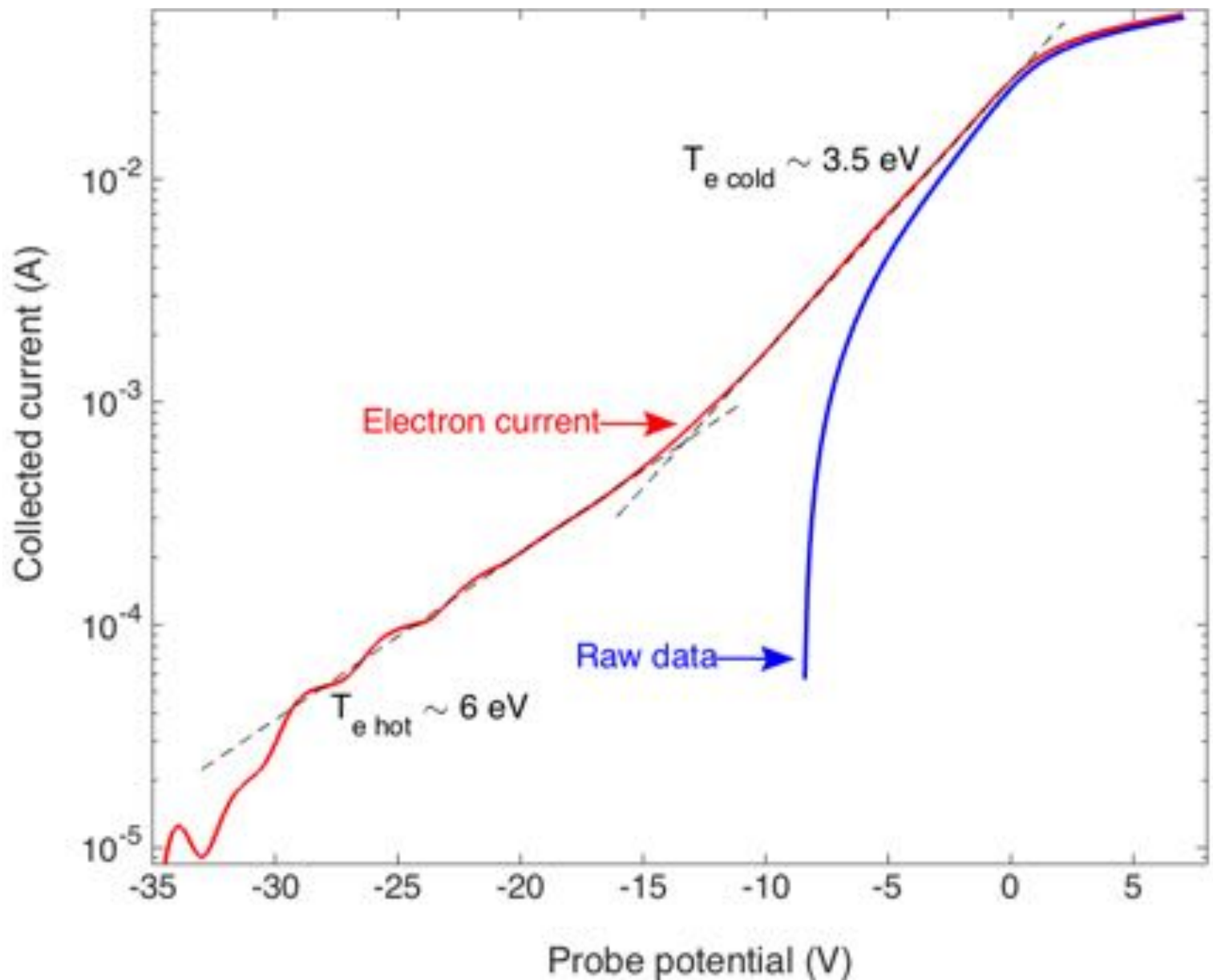
⇒ Soustraction de  $I_e$  calculé avec  $\{T_{el\ arb.} \text{ et } n_e(V_p)\}$

⇒ Ajustement de  $n_i$  sur  $V_s < 0$  avec  $\{T_{el\ arb.} \text{ et } n_e(V_p)\}$



# Méthodes d'analyse des courbes $I_s(V_s)$

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



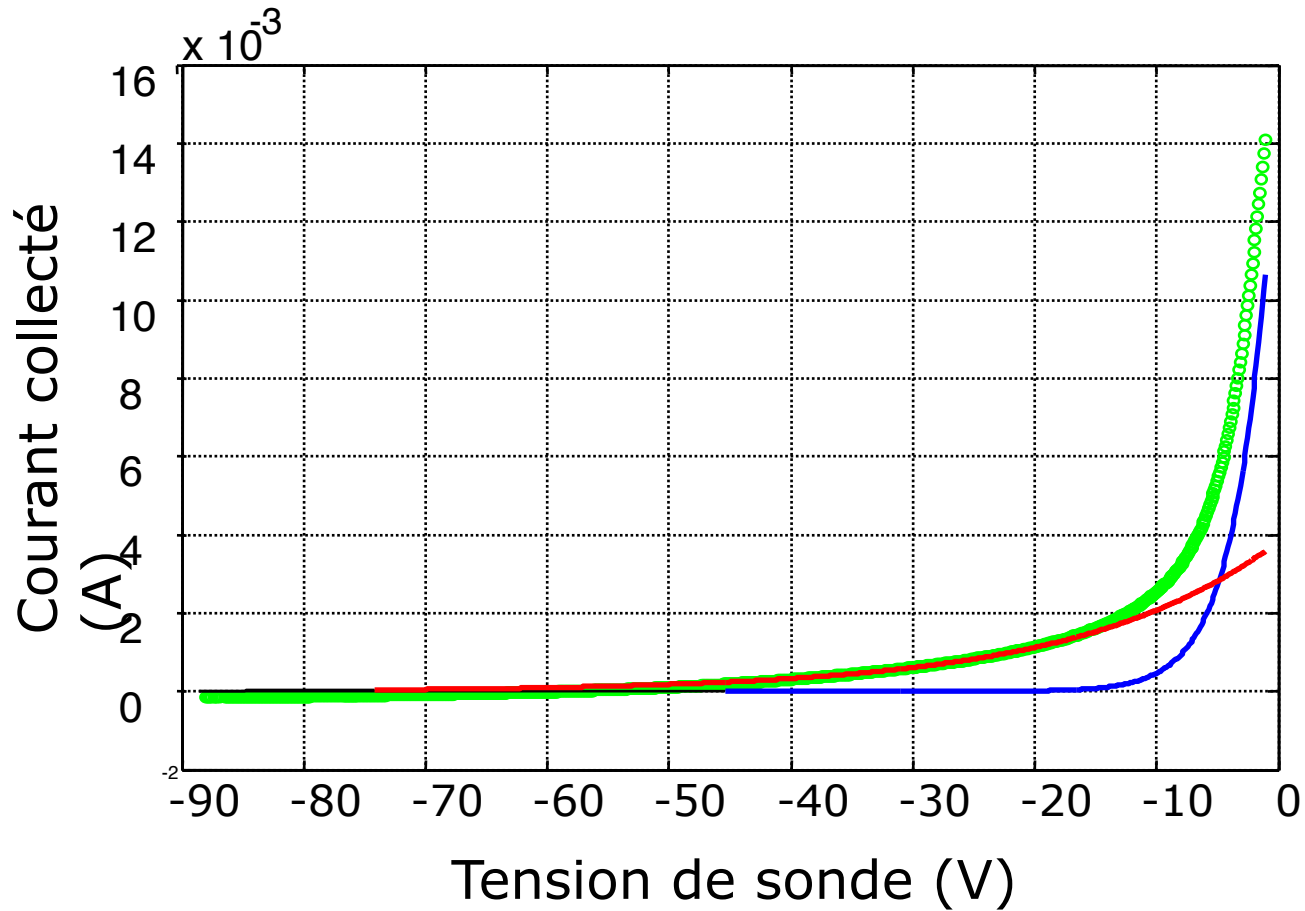
# Méthodes d'analyse des courbes $I_s(V_s)$

Calcul des températures électroniques  $T_{e1}$  et  $T_{e2}$

⇒ Ajustement de  $T_{e1}$  et  $n_{e1}$  sur  $V_s < 0$  avec  $\{T_{e1 \text{ arb.}} \text{ et } n_{e(V_p)}\}$

⇒ Soustraction de cette population à  $I_e(V_s)$

⇒ Ajustement de  $T_{e2}$  et  $n_{e2}$  sur  $V_s < 0$  avec  $\{T_{e2 \text{ arb.}} \text{ et } n_e(V_p)/10\}$





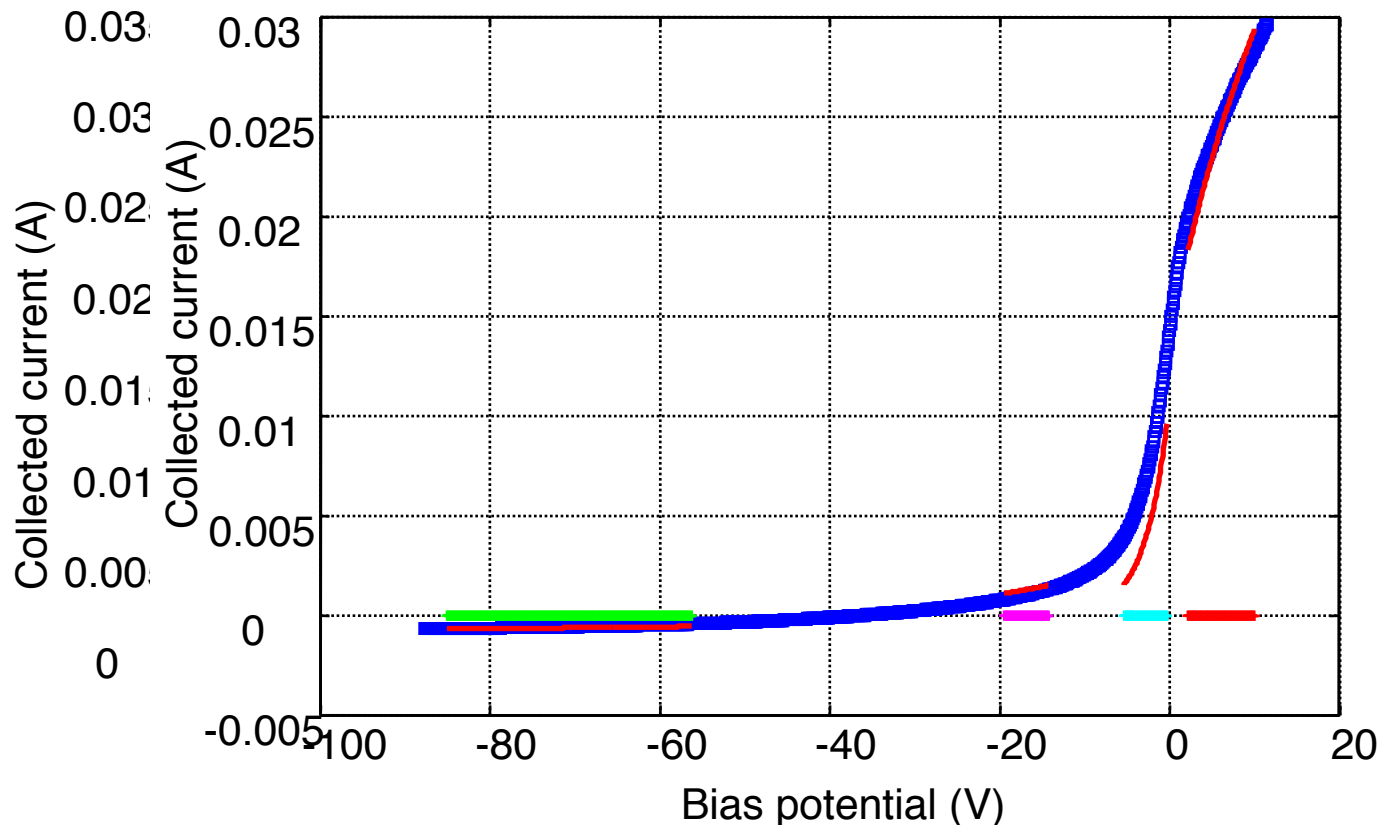
# Méthodes d'analyse des courbes $I_s(V_s)$

**Re** - calcul du courant ionique sur  $V_s < 0$

⇒ Soustraction de  $I_e$  calculé avec  $\{T_{e1}, n_{e1}$  et  $T_{e2}, n_{e2}$

}

→ Ajustement de  $n$  sur  $V_s < 0$  avec  $\{T_{e1}$  et  $T_{e2}\}$



Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

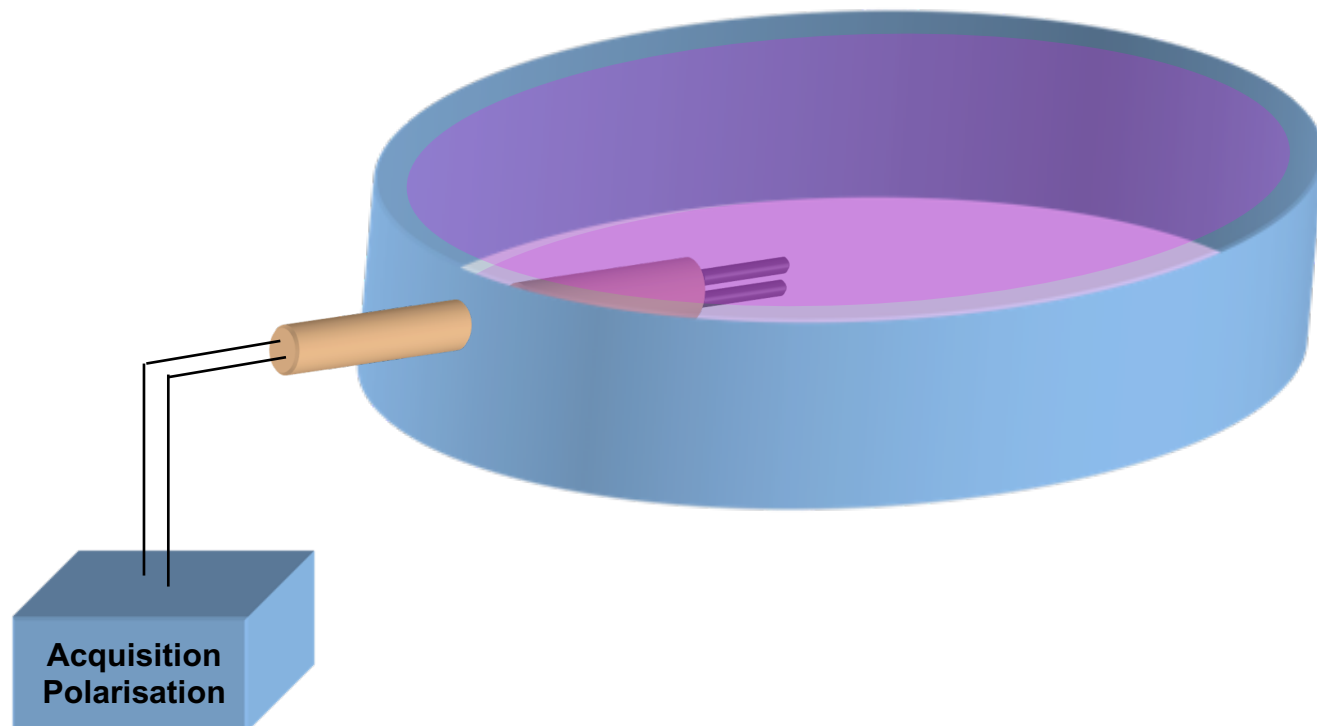
Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

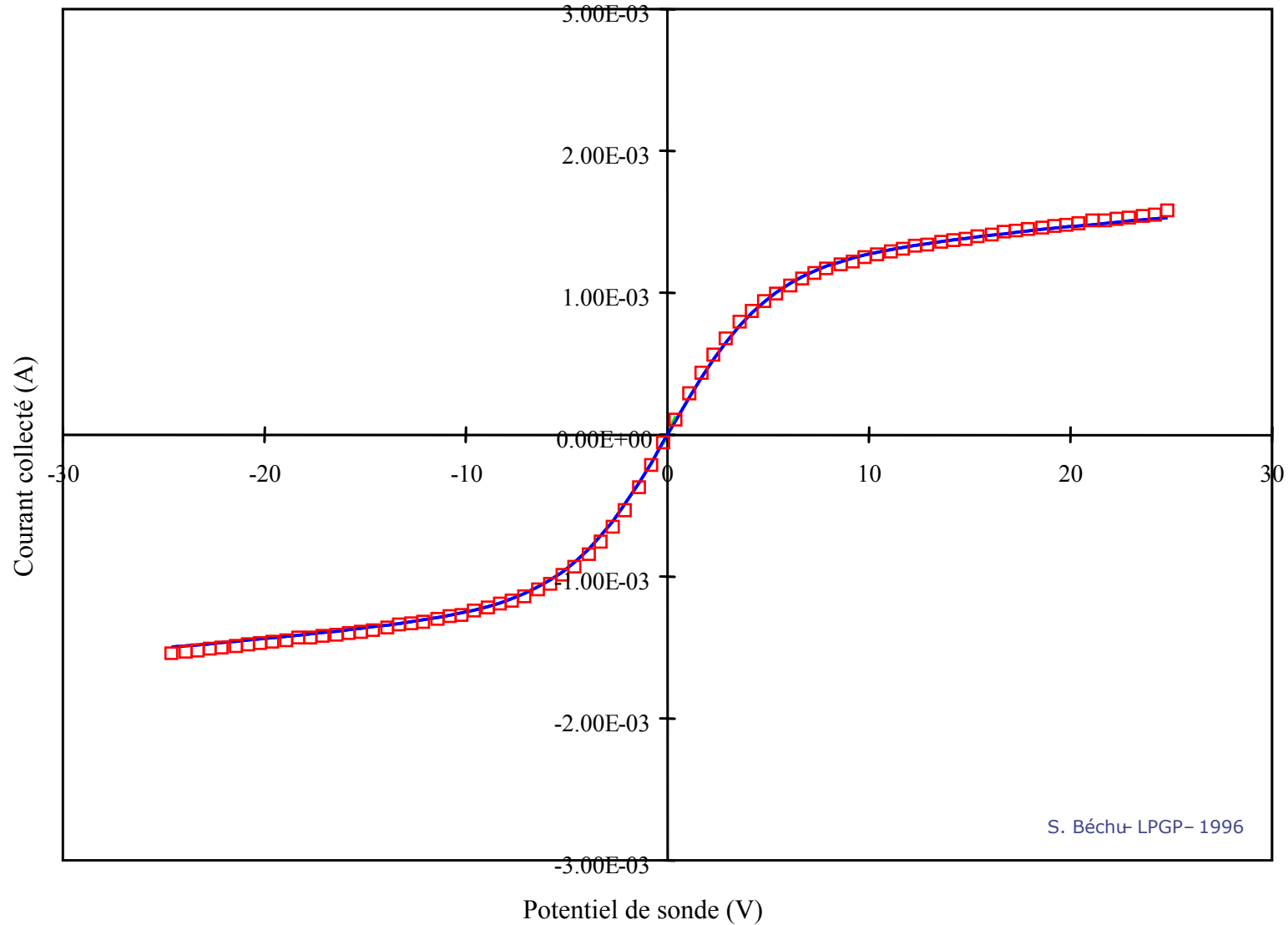
## Doubles

- Double symétrique : Ni, Te chauds
  - Très peu de perturbation du plasma
  - Peu d'informations collectées



# Circuits de mesures – sonde double symétrique

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



# Circuits de mesures – sonde double asymétrique (simple)

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

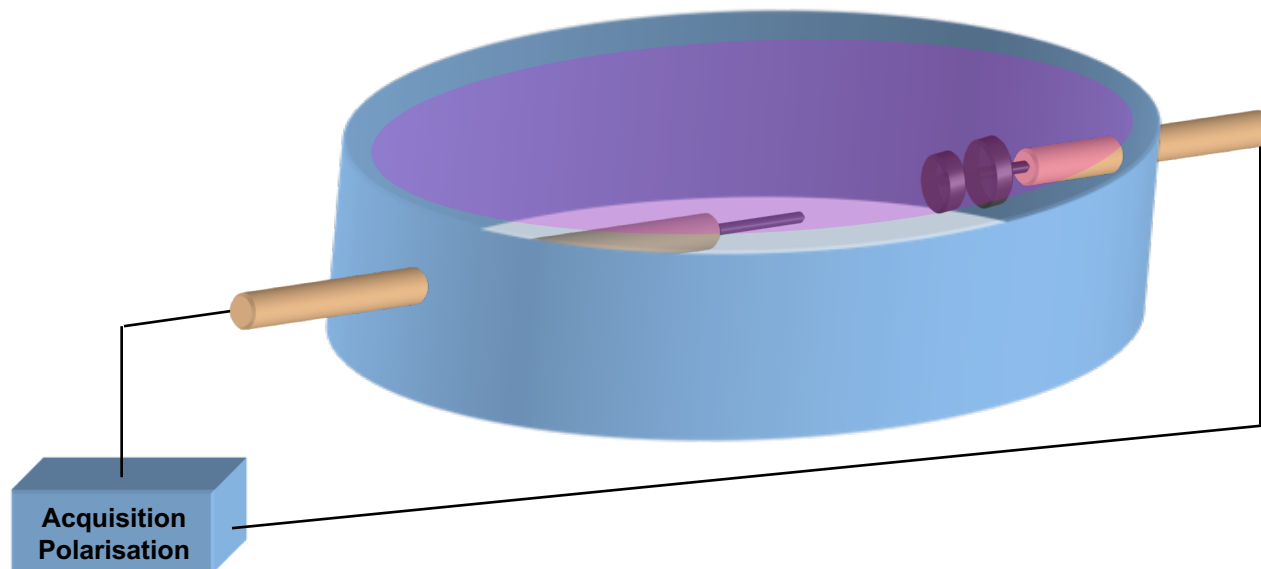
Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

## Doubles

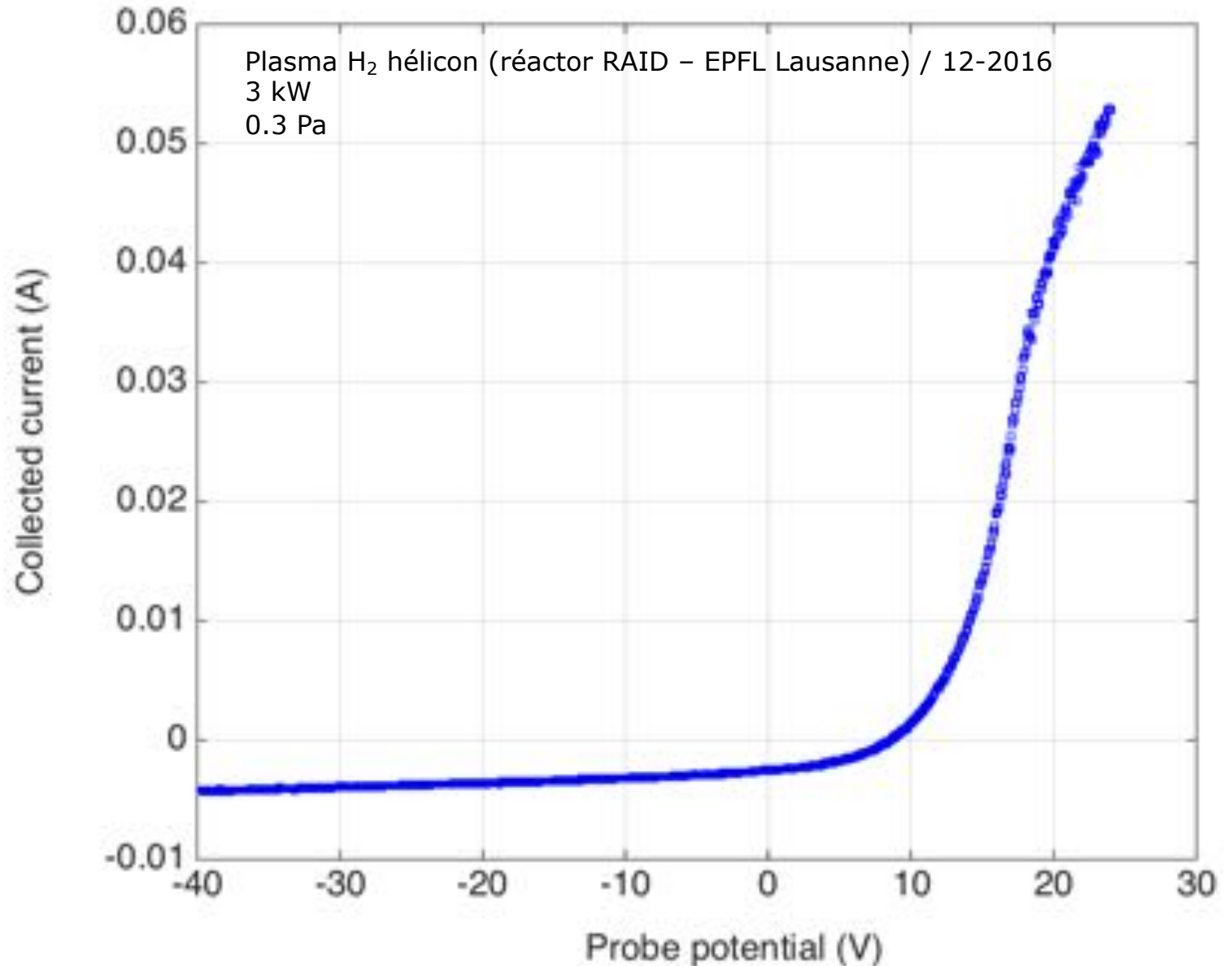
- Double asymétrique :  $V_p$ ,  $V_f$ ,  $N_e$ ,  $N_i$ ,  $T_e$  froids,  $T_e$  chauds,  $v$  dérive, FDEE
  - Plus efficace que les systèmes symétriques
  - Contre électrode perturbatrice



Triples (pour information ...)

# Circuits de mesures – sonde double asymétrique (simple)

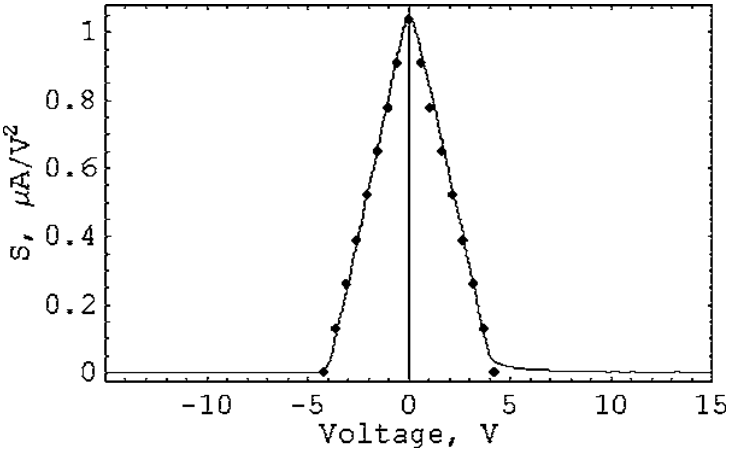
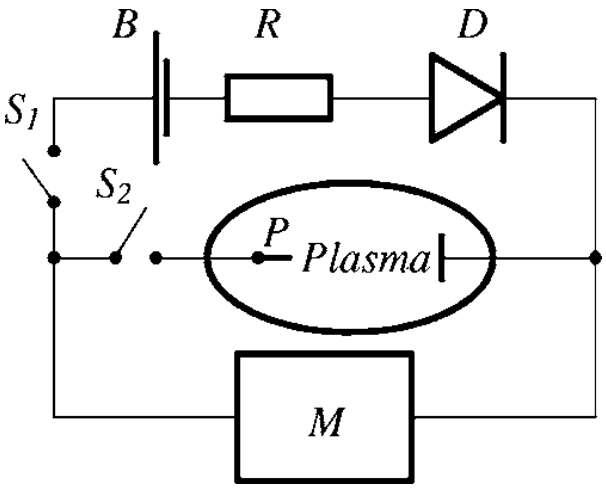
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



# Méthodes de mesures – Fonction d'appareil

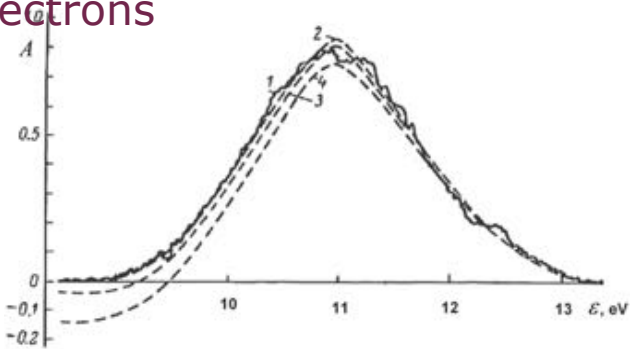
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Utilisation d'une diode

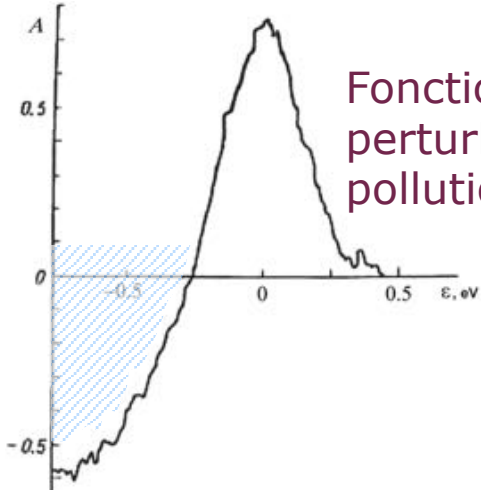


C. A. Jr. DeJoseph et al, *Rev. Sci. Instrum.* **76** 086105, 2005

## Utilisation d'un faisceau d'électrons

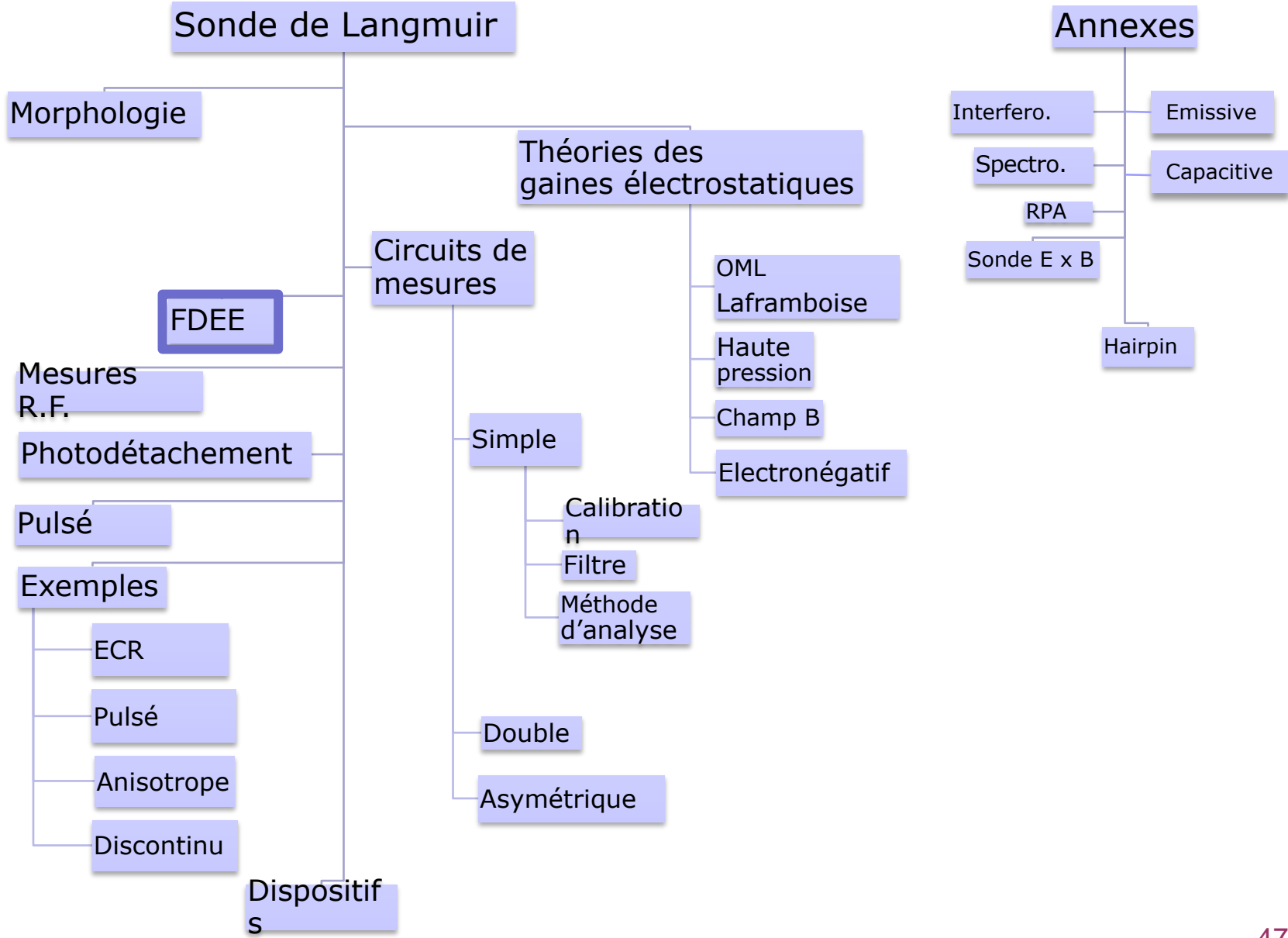


V. I. Demidov et al. *Sov. Phys. – Tech. Phys.* **29** 230.



Fonction d'appareil perturbée par de la pollution

# Sommaire



# Fonctions de répartition quelconques

- Cas de la géométrie plane (analyseur à champs retardateurs et distribution quelconque anisotrope )

- Les lignes équipotentielles sont parallèles à la surface de la sonde et l'intégrale se réduit alors à :

$$I_e = qA_S \int_{-\infty}^{+\infty} dw_x \int_{-\infty}^{+\infty} dw_y \int_{\sqrt{\frac{2qV_S}{m_e}}}^{+\infty} w_z f(w) dw_z \quad I_e = q A_S \int_{\sqrt{\frac{2qV_S}{m_e}}}^{+\infty} v_z f(v) dv_z$$

- La différentiation de par rapport à  $V_S$  donne :

$$f(V_S) = - \frac{m_e}{q^2 A_S} \frac{dI_e}{dV_S}$$

$$G(\varepsilon) = \frac{1}{q^2 A_S} \sqrt{\frac{m_e}{2qV_S}} \frac{dI_e}{dV_S} \quad (\text{eV}^{-1} \text{ m}^{-3})$$



# Fonctions de répartition quelconques

- Cas d'une géométrie cylindrique (convexe et une distribution quelconque isotrope)

- Les lignes équipotentielles sont parallèles à la surface de la sonde et l'intégrale se réduit alors à :

$$I_e = qA_S \int_{-\infty}^{+\infty} dw_x \int_{-\infty}^{+\infty} dw_y \int_{\sqrt{\frac{2qV_S}{m_e}}}^{+\infty} w_z f(w) dw_z \quad I_e = \frac{2\pi q^3}{m_e^2} A_S \int_{V_S}^{+\infty} (\varepsilon - V_S) f(w) d\varepsilon$$

- La différentiation par rapport à  $V_S$  donne :

$$g_e(V_S) = \frac{2m_e}{q^2 A_S} \sqrt{\frac{2qV_S}{m_e}} \frac{d^2 I_e}{dV_S^2} \quad (\text{eV}^{-1} \text{ m}^{-3})$$

$$g_p(\varepsilon) = \varepsilon^{-\frac{1}{2}} g_e(\varepsilon)$$

$$g_p(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} n_e T_e^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{T_e}\right) \quad (\text{eV}^{-3/2} \text{ m}^{-3})$$

# Mesure de la fonction de répartition en énergie

## Utilisation de la méthode de Druyvesteyn (1930)

- Sonde de géométrie convexe quelconque pour un plasma isotrope
- Sonde sphérique pour un plasma anisotrope
- Dérivée seconde du courant collecté proportionnellement à la fonction de distribution en énergie des électrons

## ■ Méthode numérique par filtres différentiels

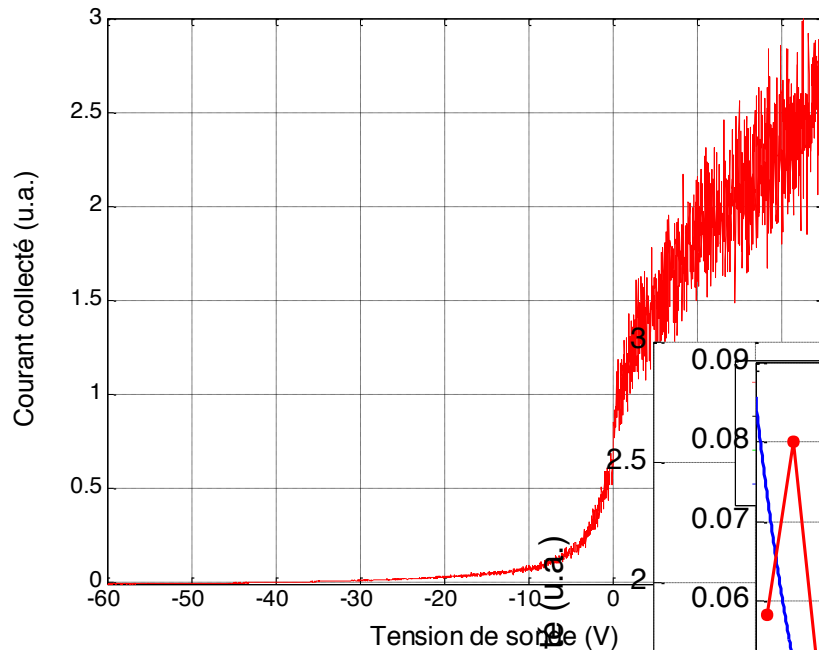
- Kimura (1991)
- Fujita (1990)
- Jacobson (1990)
- Palop (1995)

F. Fujita, H. Yamazaki, 'Determination of electron energy distribution function of plasmas by digital processing from Langmuir probe characteristic', Japanese Journal of Applied Physics, 29 (10) (1990), pp. 2139-2144  
T. Kimura, A. Y. Yonega, K. Ohe, 'Detection of EEDF by finite impulse response filter', Japanese Journal of Applied Physics, 30 (8) (1991), pp. 1877-1881  
T. Kimura, K. Ohe, 'Electron energy distribution function in fluctuating plasmas', Japanese Journal of Applied Physics, 30 (4) (1991), pp. 848-853

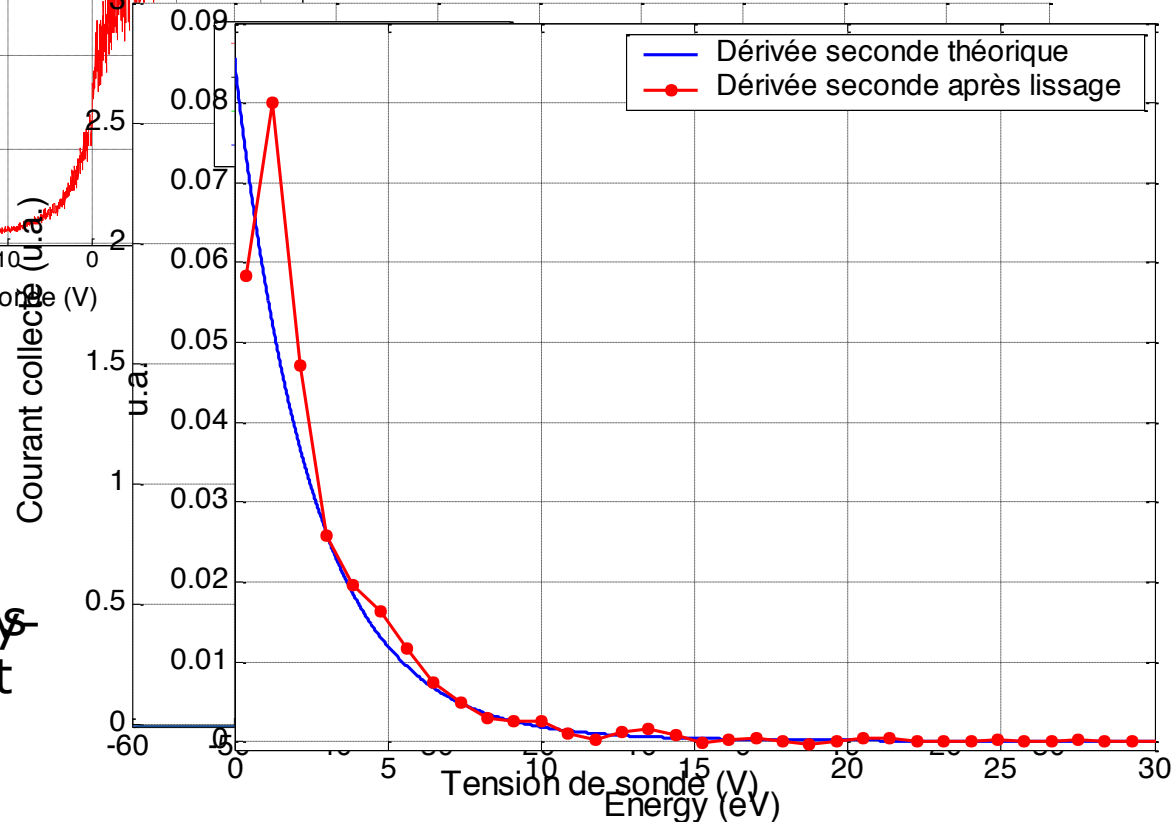
- Méthode analogique par superposition d'une tension alternative à la tension de sonde
  - La FDEE est proportionnelle au second harmonique du courant de sonde

# Fonctions de répartition quelconques

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Méthodes R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



Courbe synthétique I(V) bruitée  
 $n_{e1} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_{e1} = 1,5 \text{ eV}$ ,  
 $n_{e2} = 0,1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_{e2} = 15 \text{ eV}$   
 bruit Gaussien appliqué  $\sigma = 0,1$



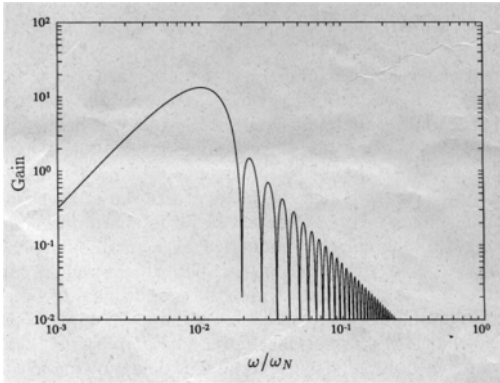
Résultat de l'utilisation de la fonction `filtfilt.m` de Matlab en utilisant différents paramètres de lissage (Gaussien, Kaiser et Flat Top).

# Méthodes de mesures – Filtrage numérique

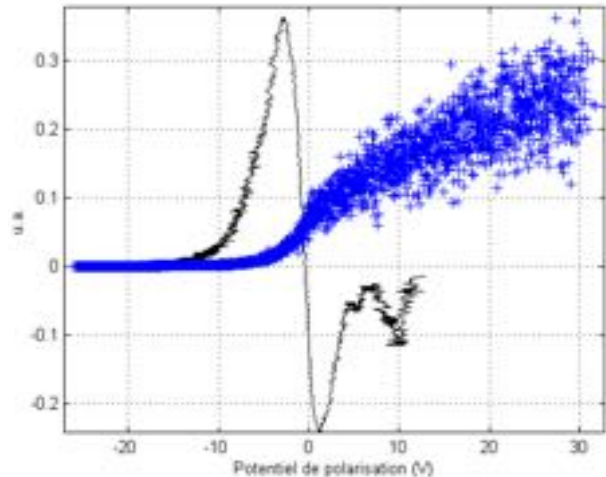
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Différentiels

- ❑ Kimura (1991)
- ❑ Fujita (1990)
- ❑ Jacobson (1990)
- ❑ Palop (1995)



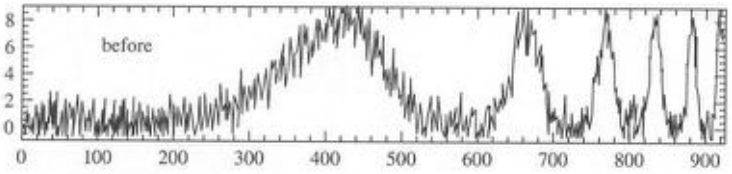
Kimura et al. JJAP (1991)



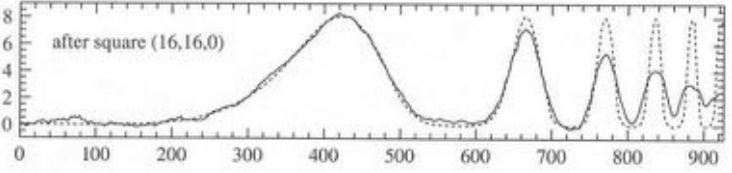
## Méthode de Savitzky-Golay

$$I_S(V_{i,i+1}) = a_0 + a_1 V_{i,i+1} + a_2 V_{i,i+1}^2$$

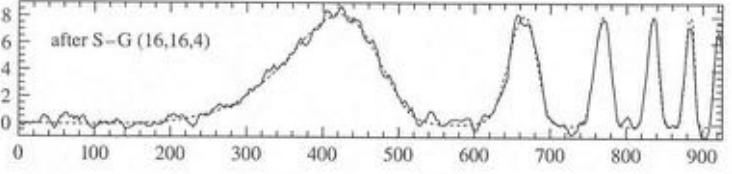
Signal initial



Lissage par fenêtrage



Méthode de S-G



# FDEE – Distributions particulières ( $g_e$ quelconque)

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de  
mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs  
expérimentaux

Bibliographie

## Plasmas isotropes

### ❑ Sondes convexes

–  $g_e(\varepsilon) \propto d^2 I_S / d V_S^2$

### ❑ Sonde plane

–  $g_e(\varepsilon) \propto d I_S / d V_S$



## Plasmas anisotropes (faisceaux, champ B)

### ❑ Sonde sphérique

–  $g_e(\varepsilon) \propto d^2 I_S / d V_S^2$

– *Pas de sélectivité angulaire*

### ❑ Sonde plane / RPA

–  $g_e(\varepsilon) \propto d I_S / d V_S$

– Sélectivité angulaire

### ❑ Sonde cylindrique

–  $g_e(\varepsilon) \propto d I_S / d V_S$

– *Faible encombrement*



Distribution non maxwellienne estimation de  $n_e$  et  $T_e$

$$n_e = \int_0^{+\infty} g_e(\varepsilon) d\varepsilon$$

$$T_{eff} = \frac{2}{3} \frac{1}{n_e} \int_0^{+\infty} \varepsilon g_e(\varepsilon) d\varepsilon \quad \langle \varepsilon \rangle = \frac{\int_0^{+\infty} \varepsilon g_e(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{+\infty} g_e(\varepsilon) d\varepsilon}$$

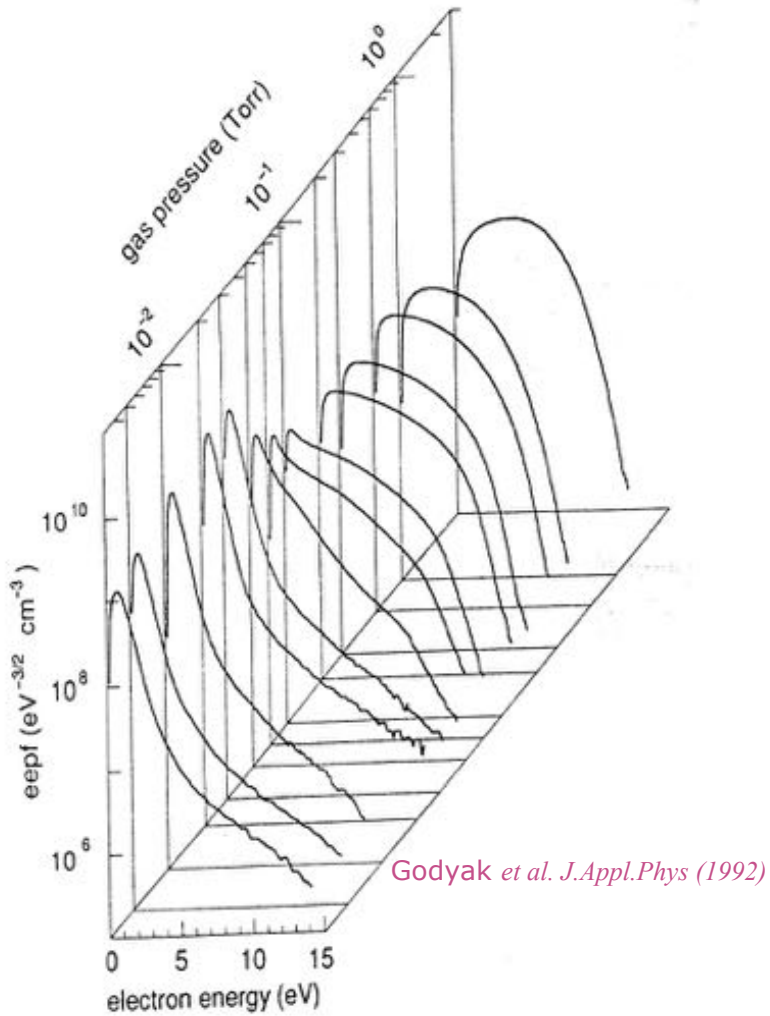
Calcul des coefficients d'excitations

$$k_x = \sqrt{\frac{2}{m_e}} \int_0^{+\infty} \sigma_x(\varepsilon) \varepsilon g_e(\varepsilon) d\varepsilon$$

# Exemples de FDEE – R.F. et ECR

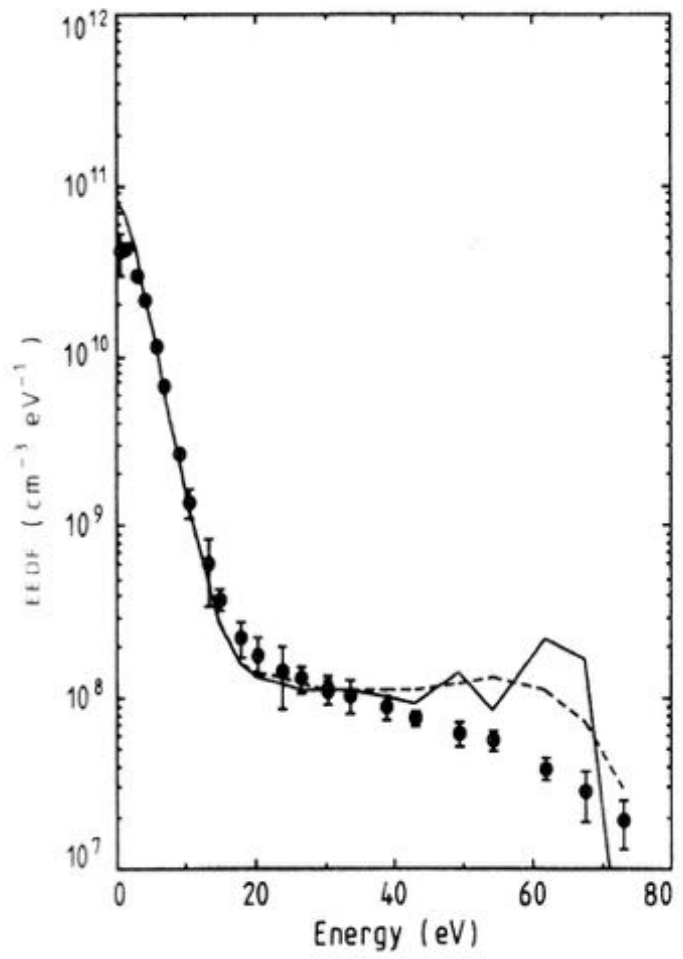
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Morphologies particulières



Plasma RF capacitif argon, entre 3 mTorr et 3 Torr

Bretagne et al. JPhysD (1991)

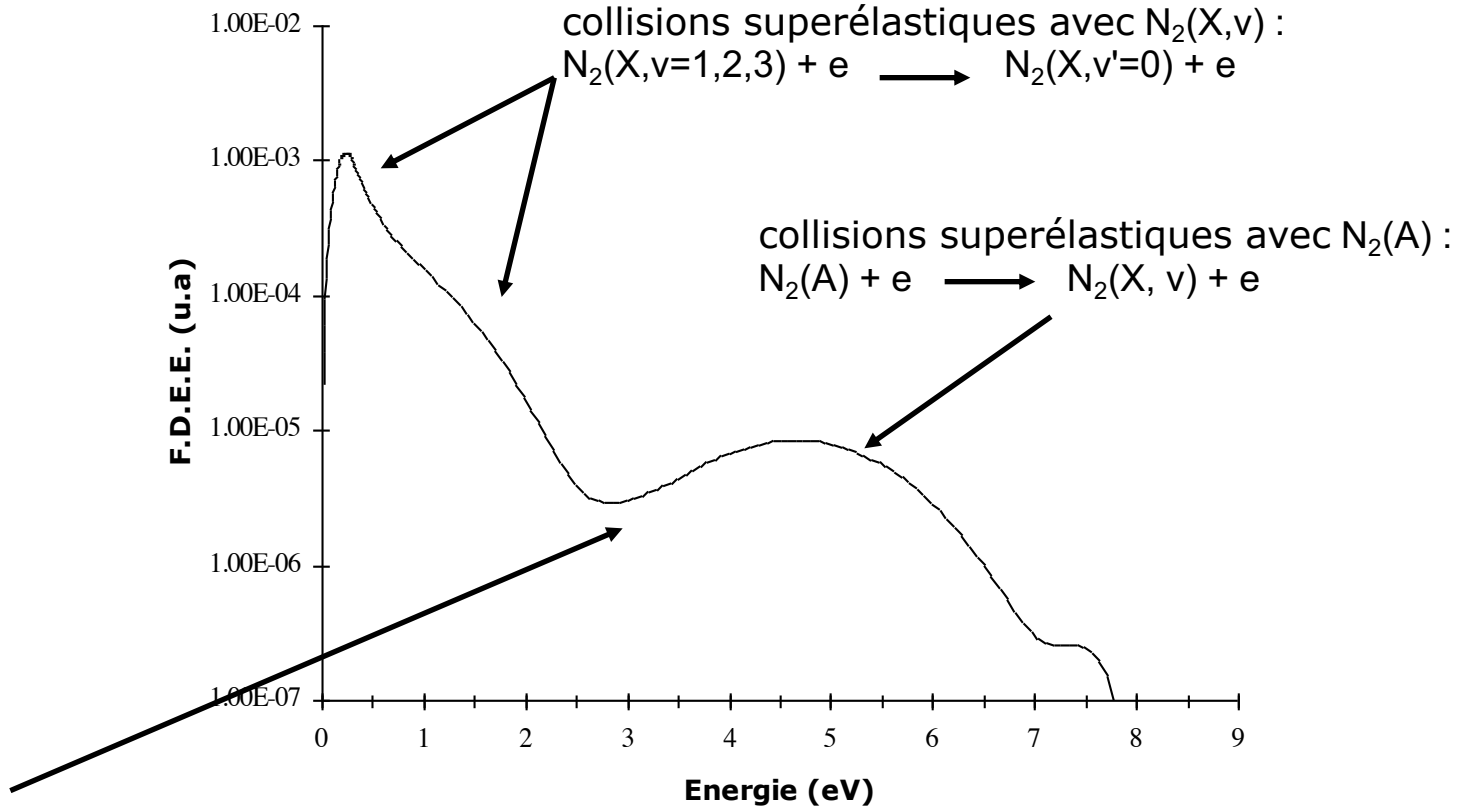


Plasma Multipolaire hydrogène, 3 mTorr

# Exemples de FDEE

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

plasma DC pulsé d'azote  
 160 Hz ; 1.76 % (RC) ;  
 durée de la phase de décharge : 110  $\mu$ s  
 durée de la post-décharge : 6.14 ms  
 1300 V ; 120 mA ; 0.5 torr



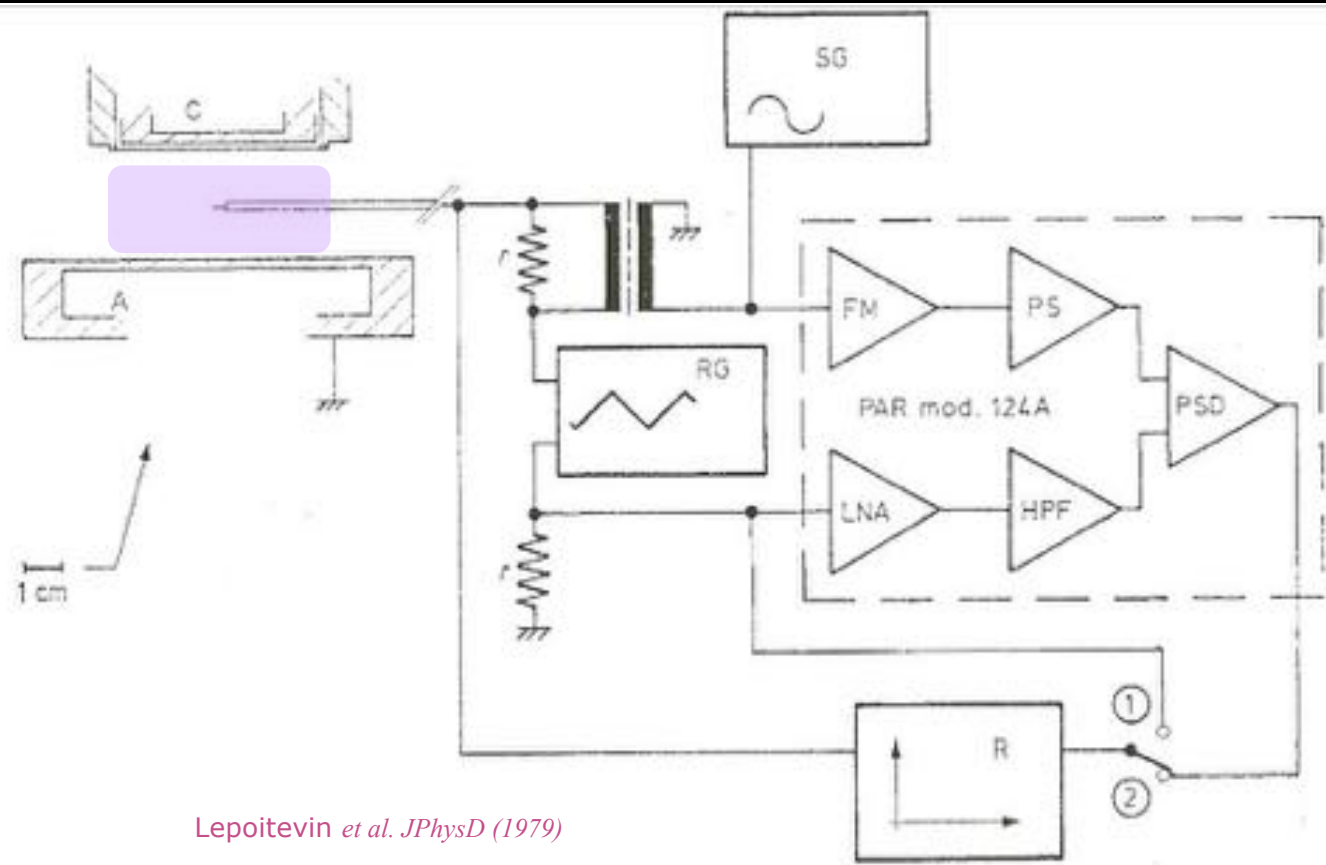
pompage des vibrations de  $N_2(X)$   
 $N_2(X,v=0) + e \longrightarrow N_2(X,v'>0) + e$

Henrion et al. Surface and Coating Technology 97 (1997) 729-733



# Méthodes de mesures – Analogique

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

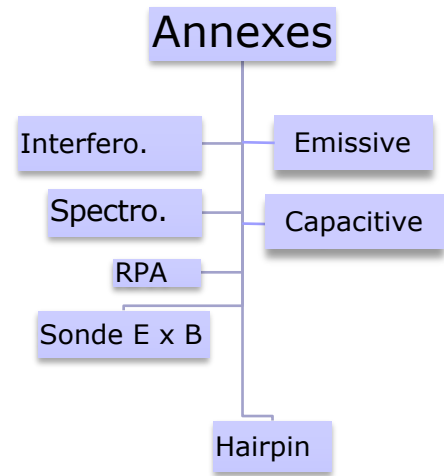
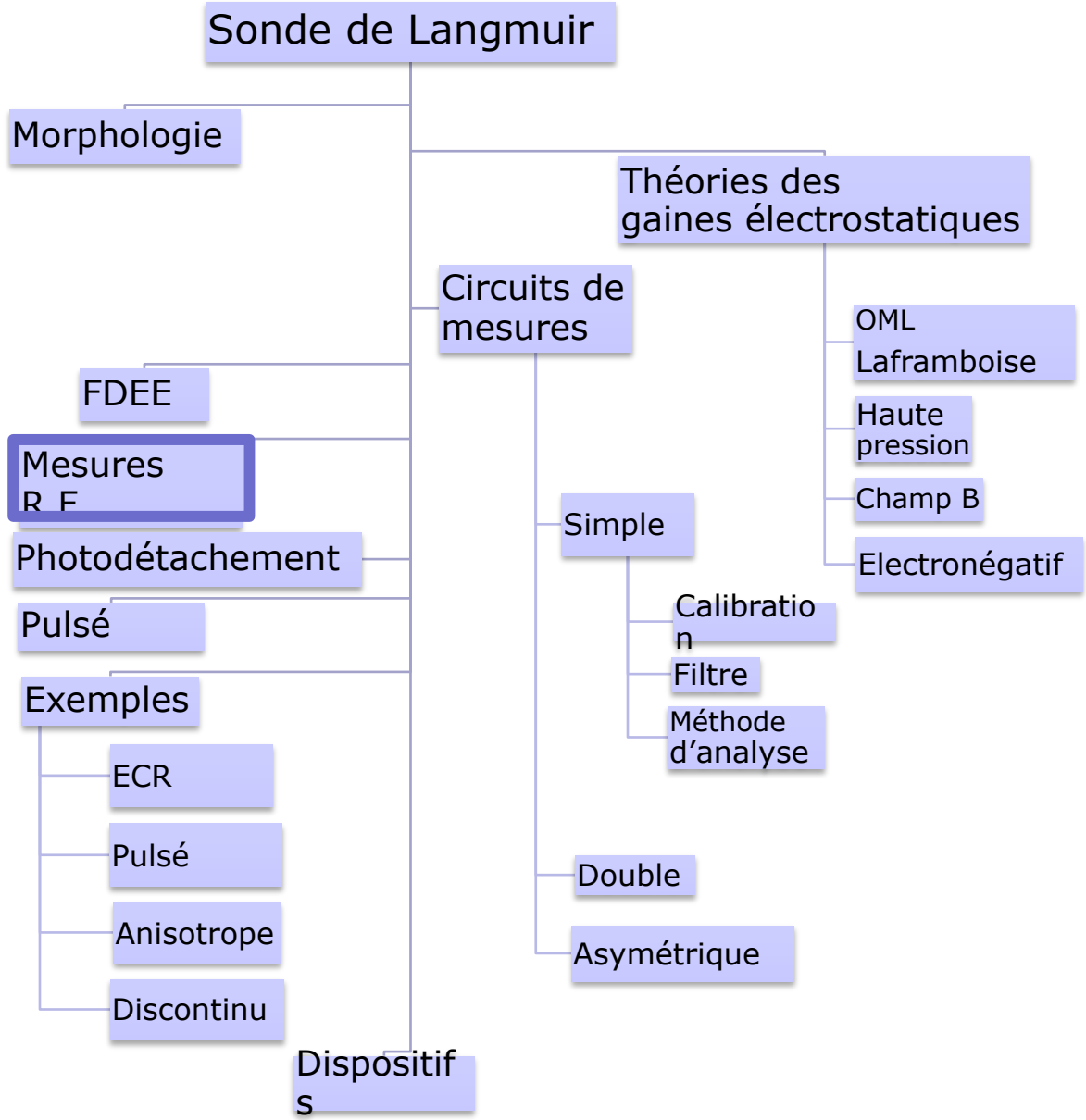


Lepoitevin *et al.* *JPhysD* (1979)

Figure 1. Schéma du montage. A, anode; C, cathode; RG, générateur de rampe TBF; SG, générateur sinusoïdal,  $f_0 = 1322$  Hz; FM + PS, voie de référence; LNA + HPF, voie du signal; FM, doubleur de fréquence; PS, mise en phase des deux voies; LNA, pré-amplificateur à faible bruit; HPF, filtre passe haut,  $f \geq 2f_0$ ; PSD, détecteur de phase;

$$I(V) = I(V_o + \partial(t)) = I(V_o) + \partial(t) \frac{dI(V_o)}{dV} + \frac{1}{2} (\partial(t))^2 \frac{d^2I(V_o)}{dV^2} + \dots$$

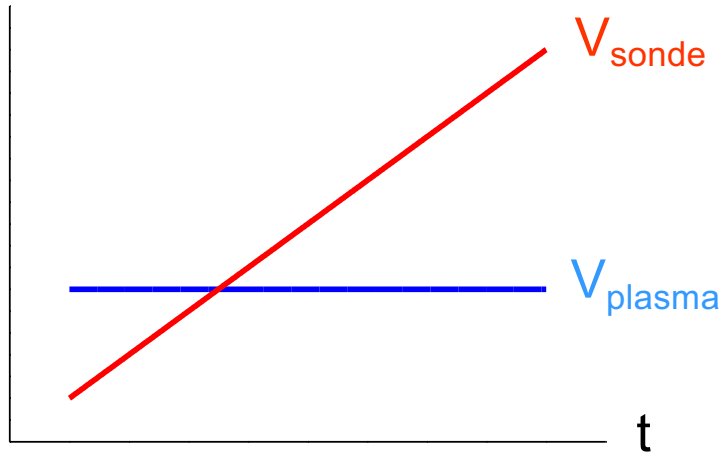
# Sommaire



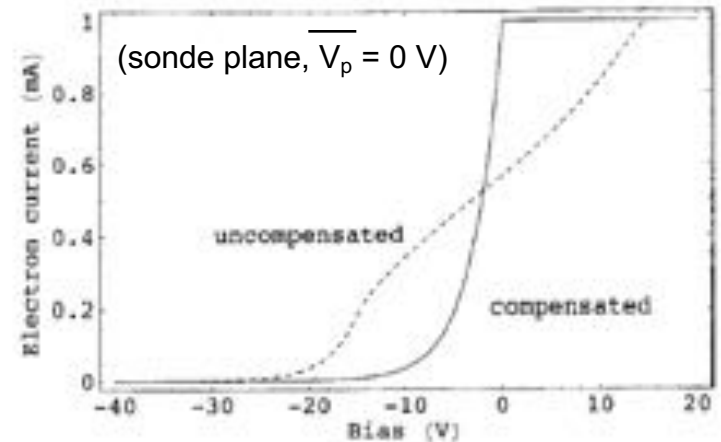
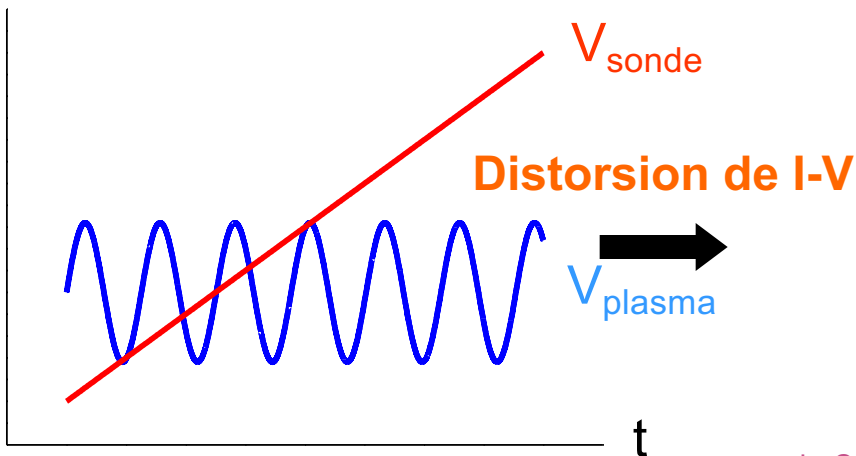
# RF – plasmas radiofréquence

Jérôme Pulpytel – Atelier sonde (2006)

## La théorie est pour les plasmas DC



## Oscillation du potentiel plasma dû à la tension RF appliquée

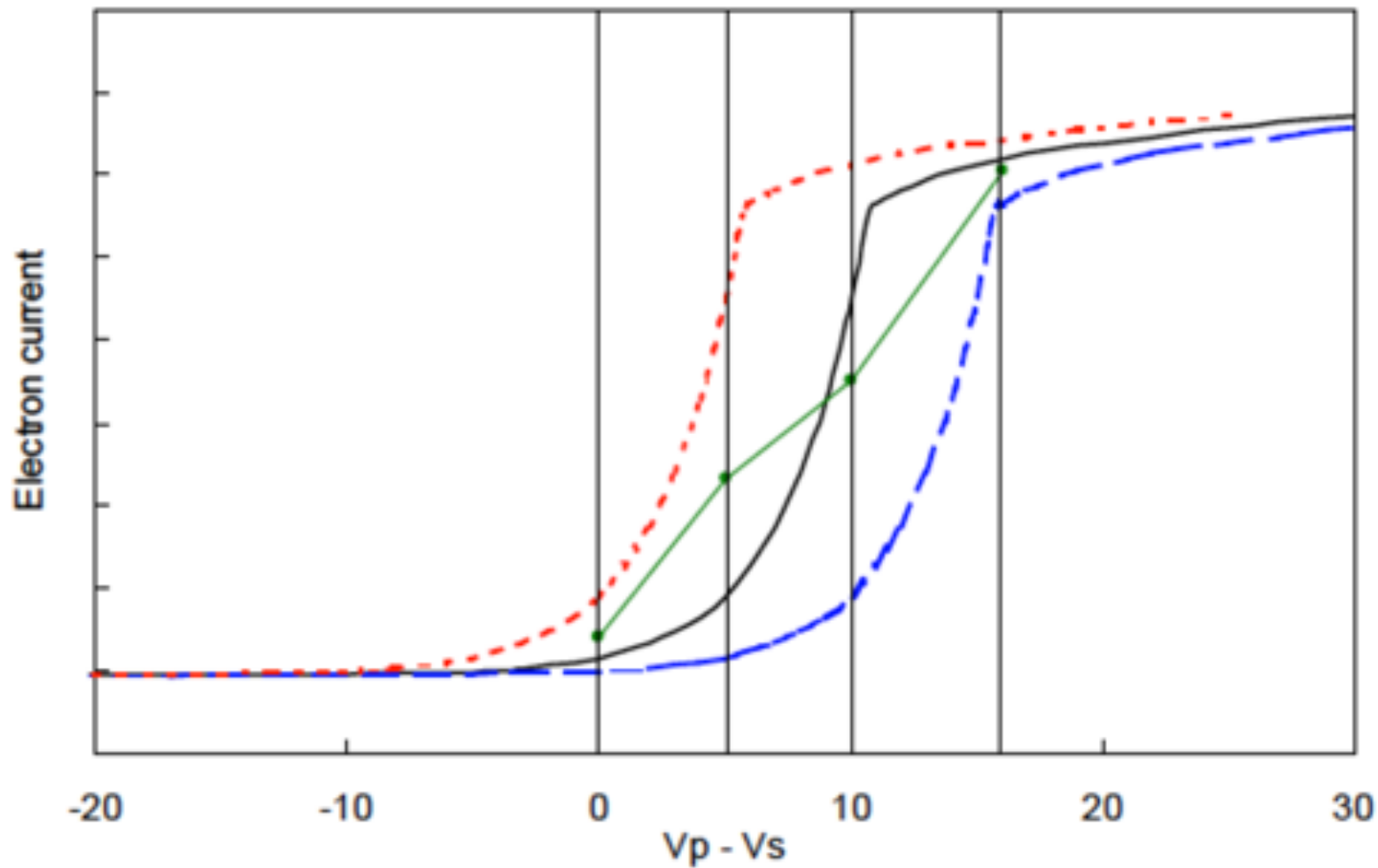


L. Okusz et al., J. Appl. Physics 99, 013304-1 (2006)

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

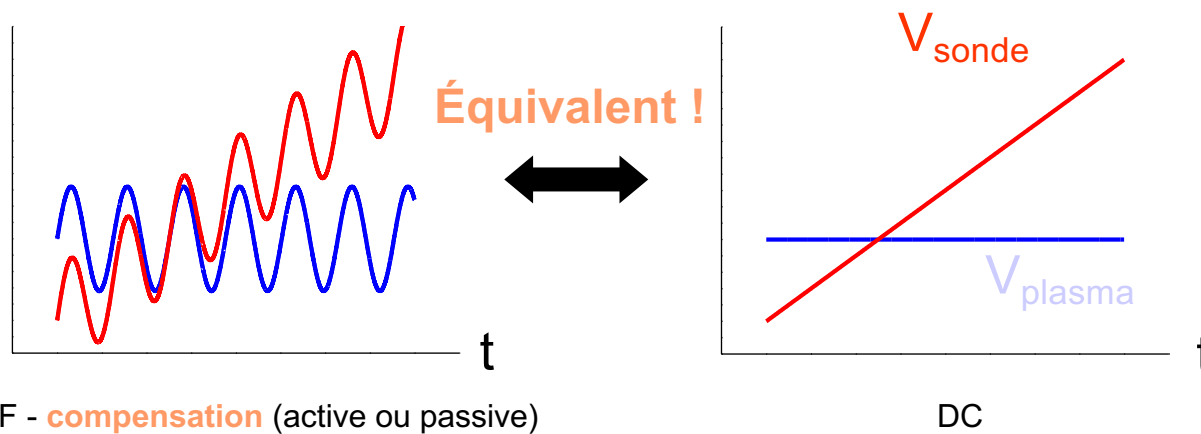
# RF- plasmas radiofréquence

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



## Compensations : active ou passive

- ❑ Active : ajouter une composante sinusoïdale à la polarisation de la sonde
- ❑ Passive : forcer la sonde à suivre le potentiel plasma  $\leftrightarrow$   
 $Z_{\text{plasma-sonde}} \ll Z_{\text{sonde-masse}}$



Analogie avec une décharge DC

# RF – plasmas radiofréquence

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

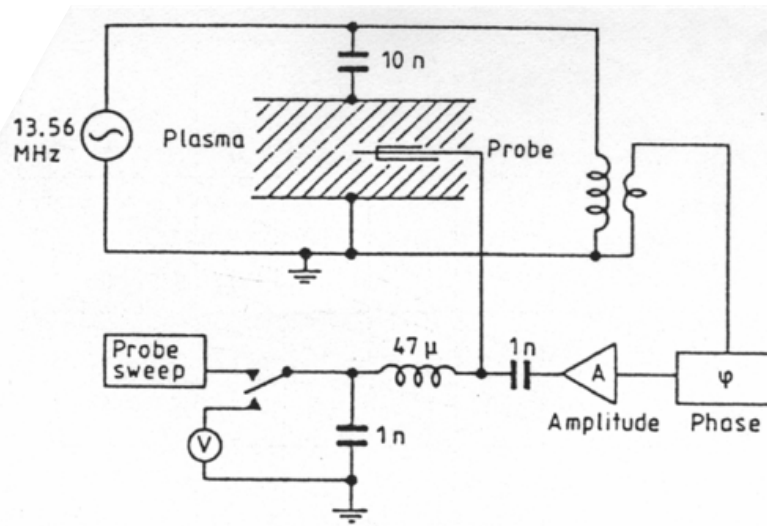
Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

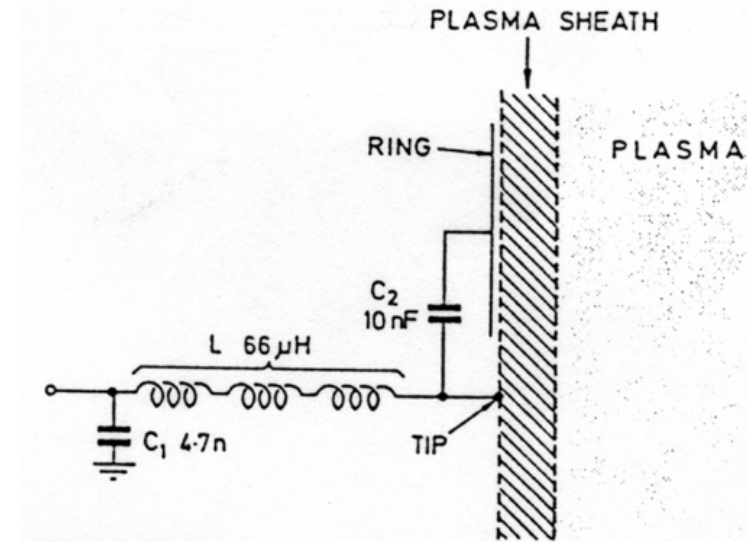
## Compensation active (RF)



- ✓ La sonde est pilotée à la même fréquence que le générateur plasma

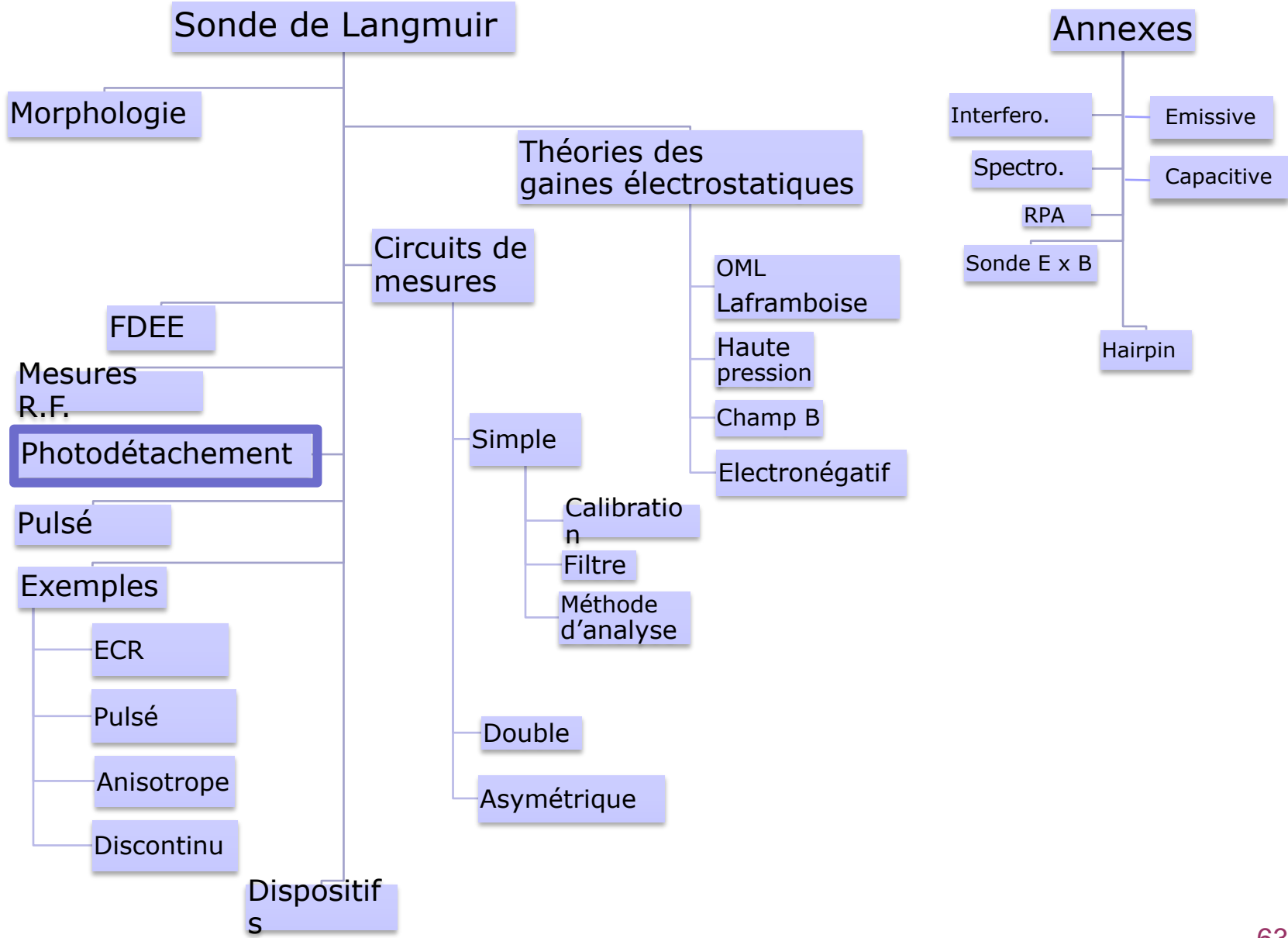
Le réglage est effectué sur la composante fondamentale, les harmoniques sont négligées

## Compensation passive (RF)



- ✓ Le couplage entre la sonde et le plasma est favorisé par rapport à celui avec la masse
- ✓ Solution plus simple que la compensation active

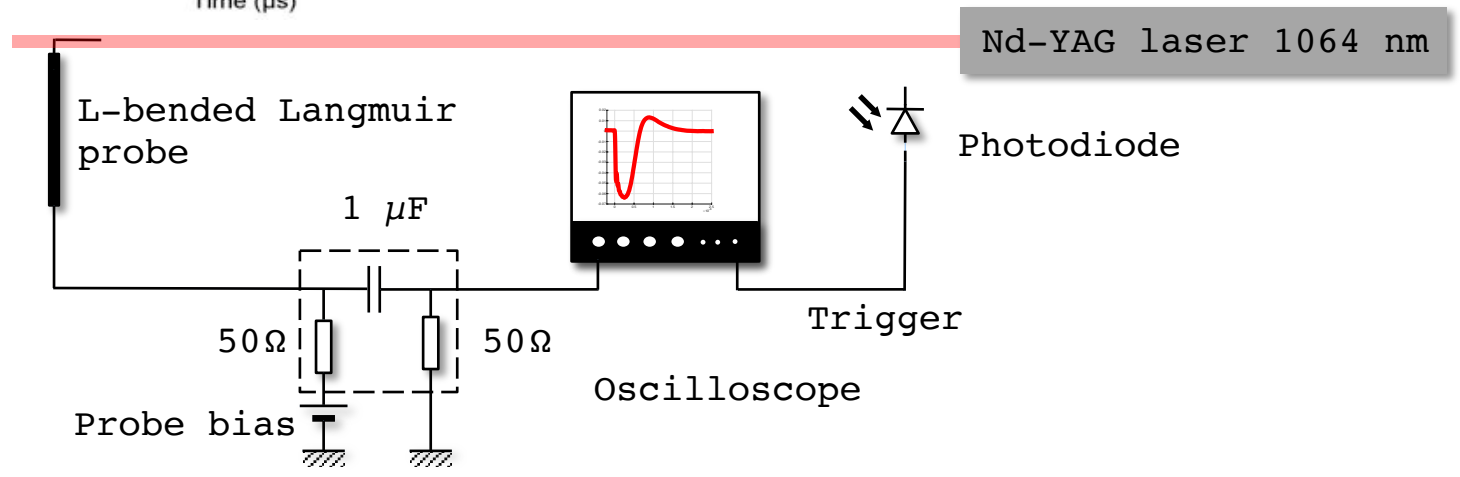
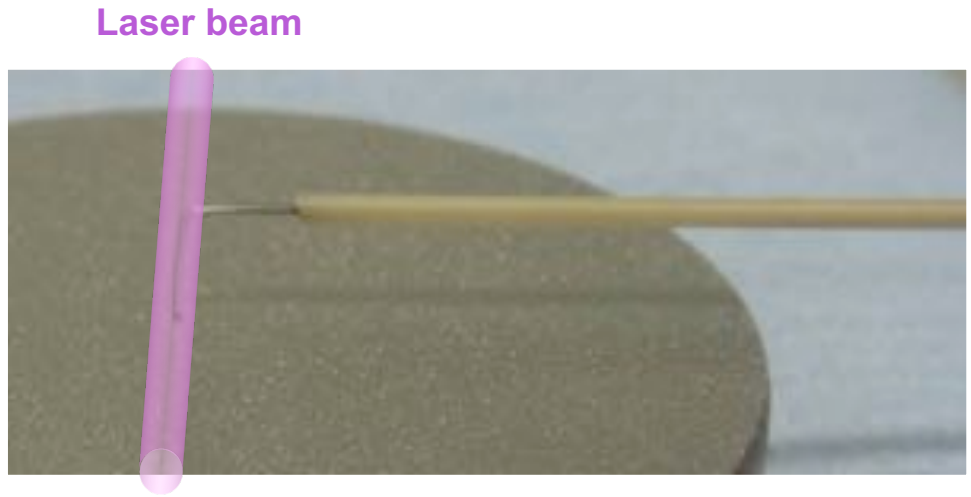
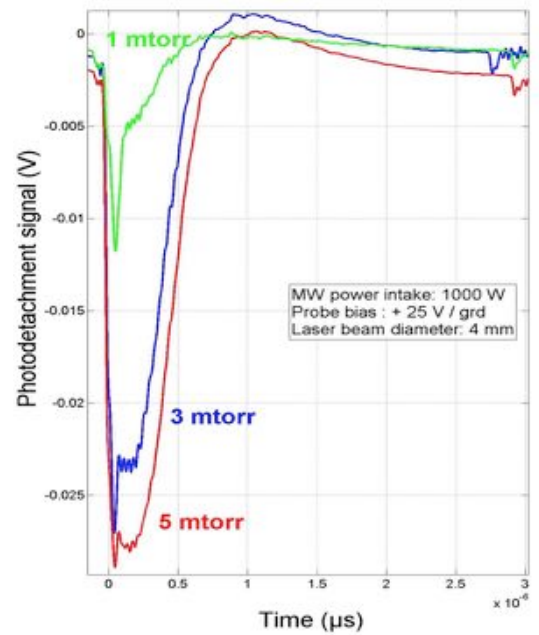
# Sommaire



# Photodétachement laser – plasmas électronégatifs

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

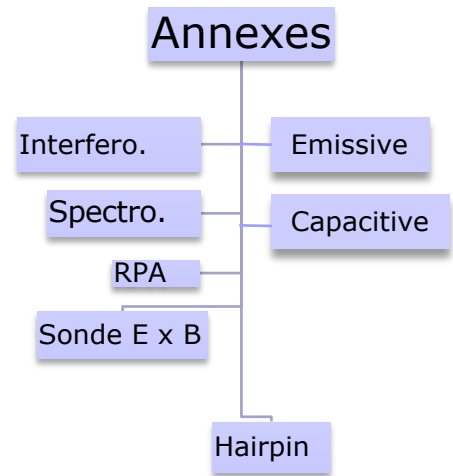
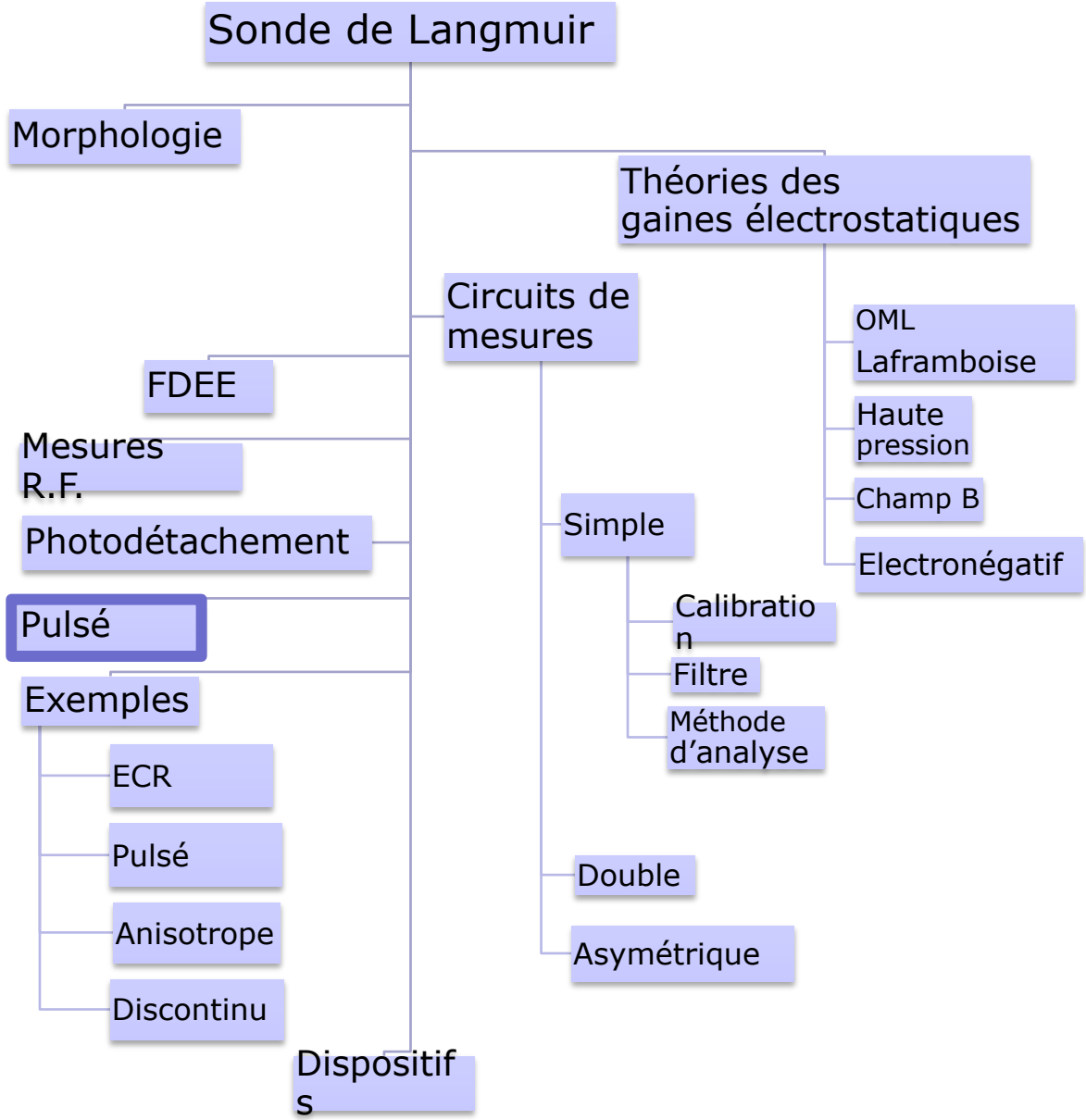
## Photodétachement laser (Nd-YAG 1064 nm) ions H<sup>-</sup>



M. Bacal, 2000, Rev. Sci. Instrum., vol. 71, no. 11, pp. 3981-4006.



# Sommaire

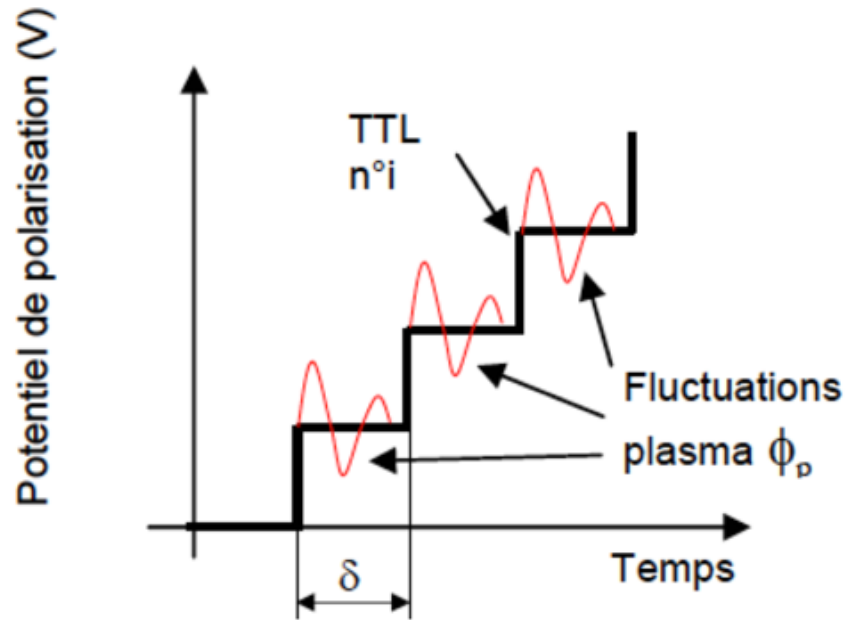


# Mesures en plasmas pulsés

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Hypothèses :

- Tous les événements plasma sont identiques. Leur occurrence peut-être aléatoire ou périodique.
- Un observable (courant-tension) est impératif pour déclencher l'acquisition (TTL)

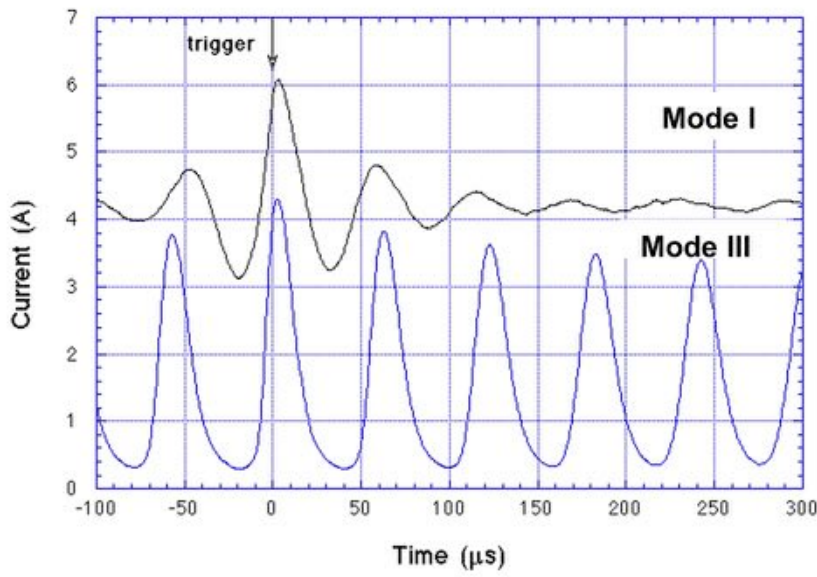


Mode I

Mode III

Voltage : 240 V  
Current : 3 A  
Flow : 5 mg/s  
Freq : 16.7 kHz

Voltage : 300 V  
Current : 4 A  
Flow : 3 mg/s  
Freq : 30 kHz



# Mesures en plasmas pulsés

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

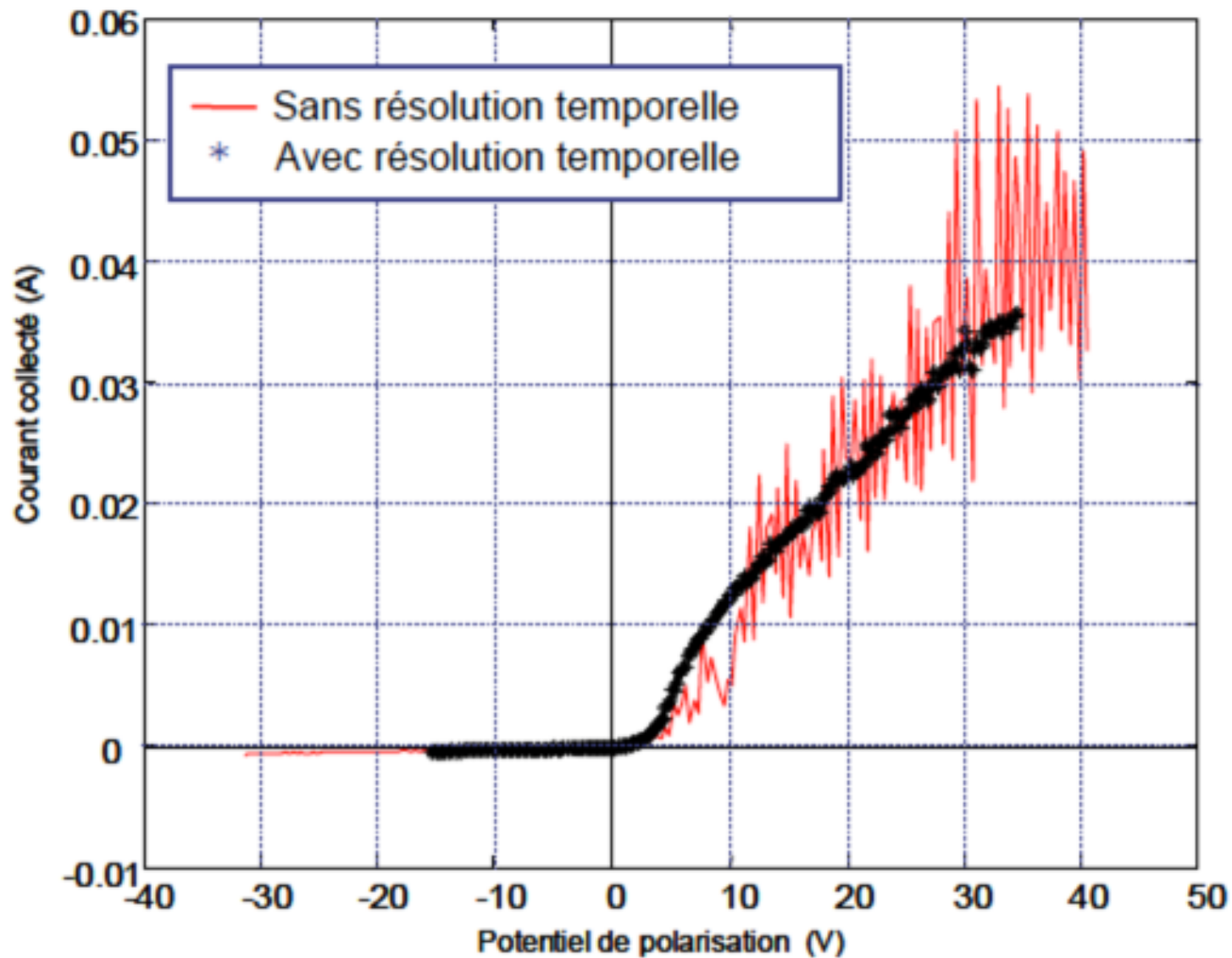
Photodét.

Pulsé

Exemples

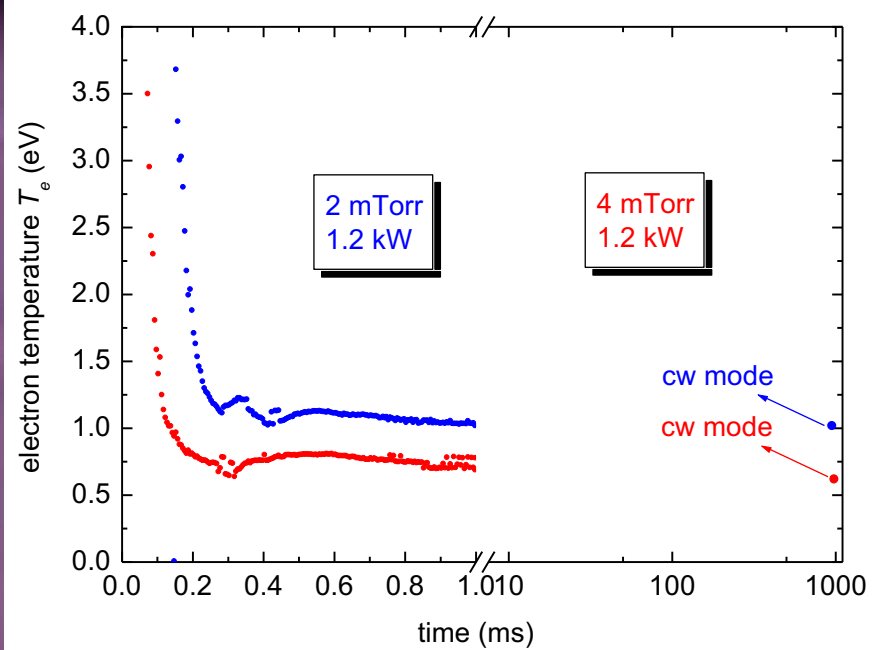
Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

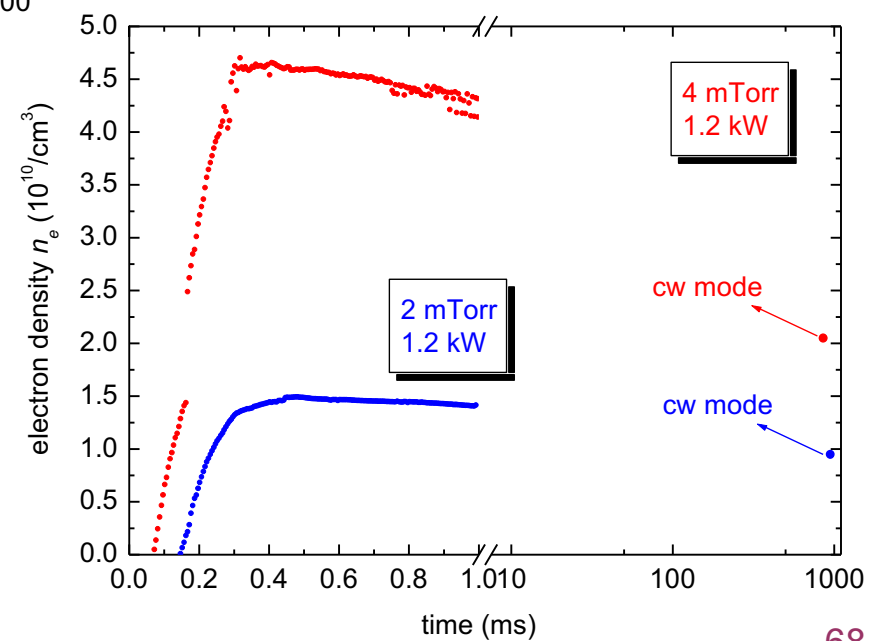


# Mesures en plasmas pulsés

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



Plasma ECR (2.45 GHz)  
Camembert III



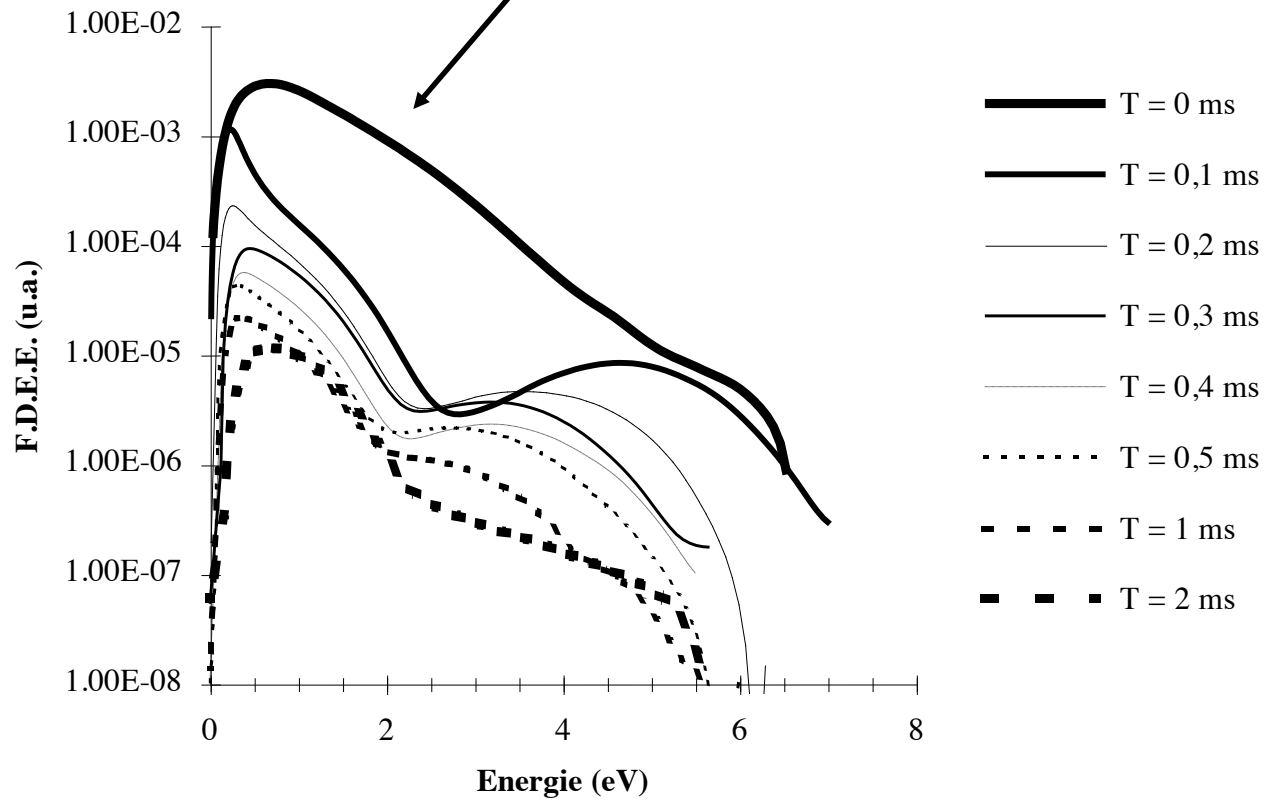
Svarnas et al. 11<sup>th</sup> ICIS conference (2005)

# Mesures en plasmas pulsés

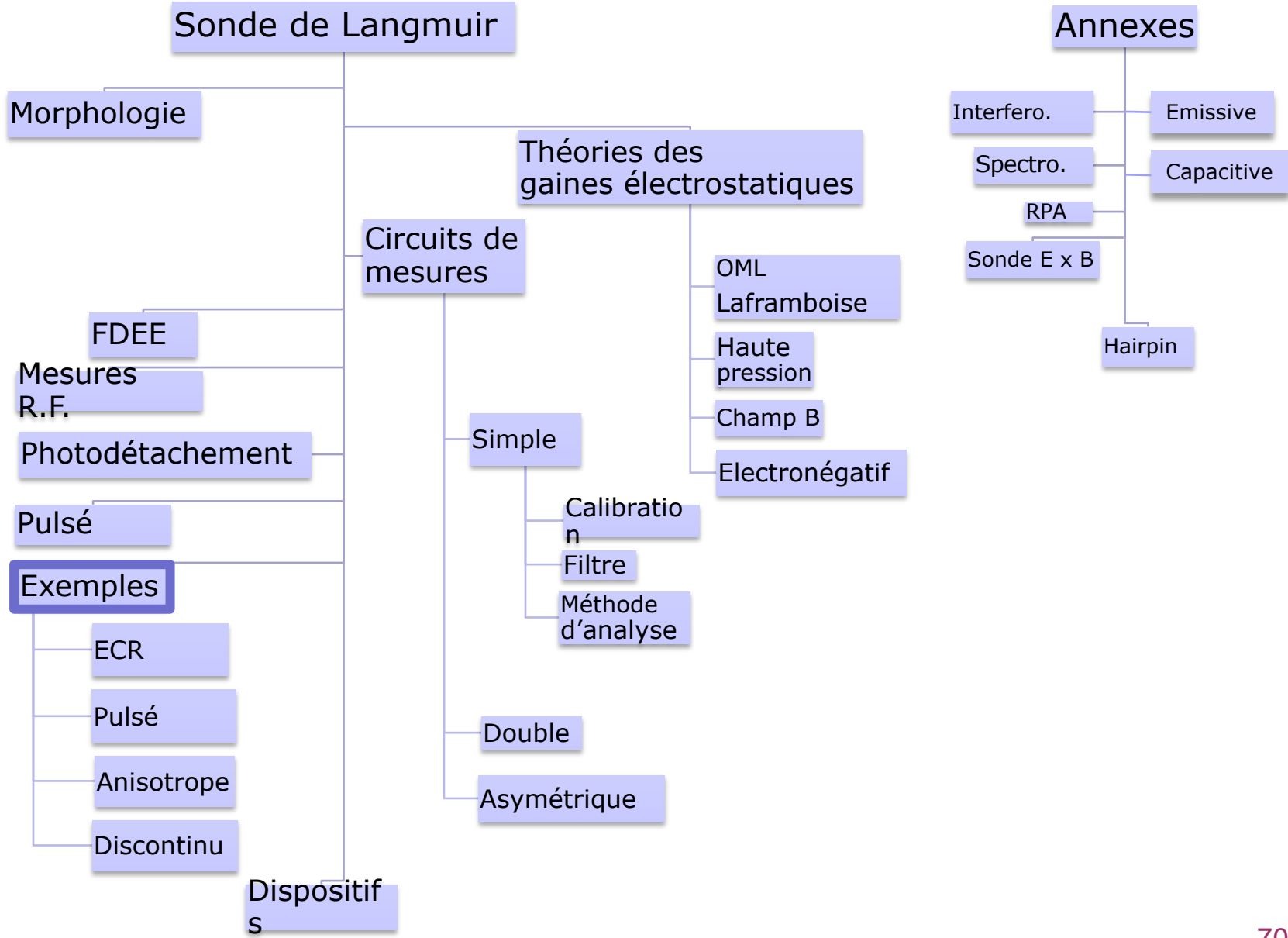
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

plasma DC pulsé d'azote  
1300 V ; 0.5 torr

en décharge : fdee quasi maxwellienne



# Sommaire



# Exemples d'utilisation d'une sonde de Langmuir

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de  
mesures

Mesures R.F.

Photodét.

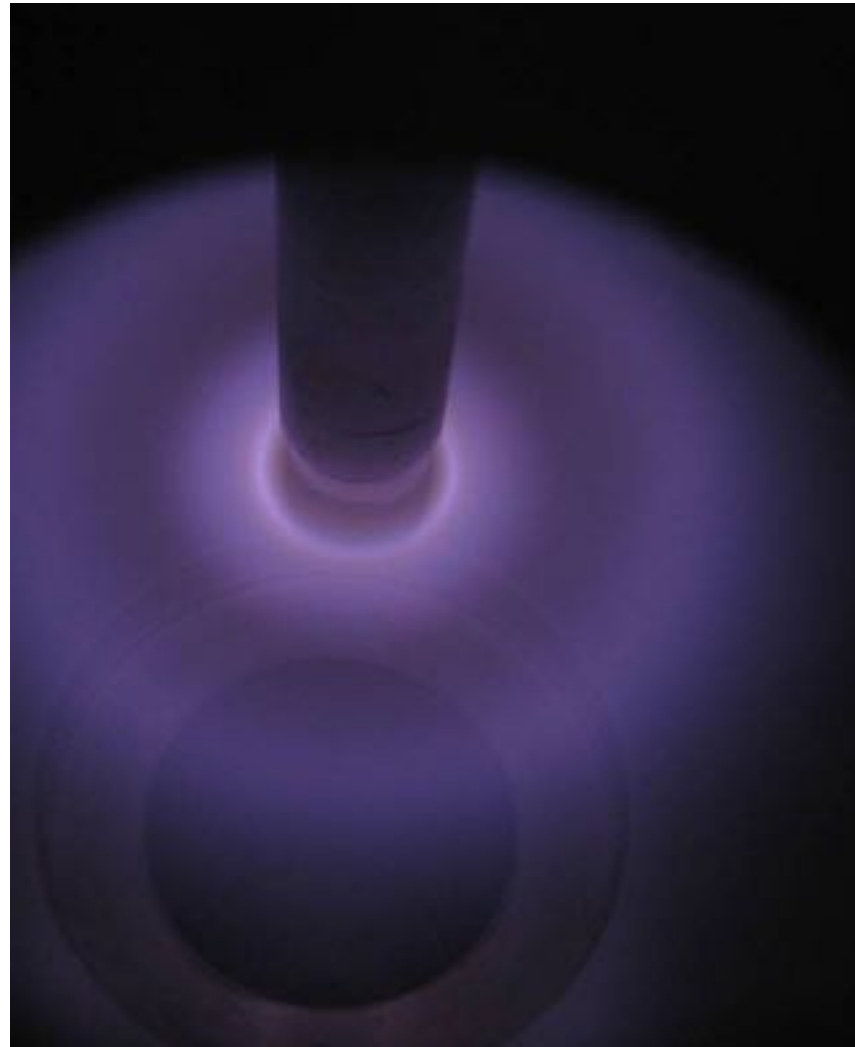
Pulsé

Exemples

Dispositifs  
expérimentaux

Bibliographie

## Exemple #1: plasma ECR



Source de plasma dipolaire – LPSC Grenoble

# Exemples d'utilisation des sondes – plasma ECR

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

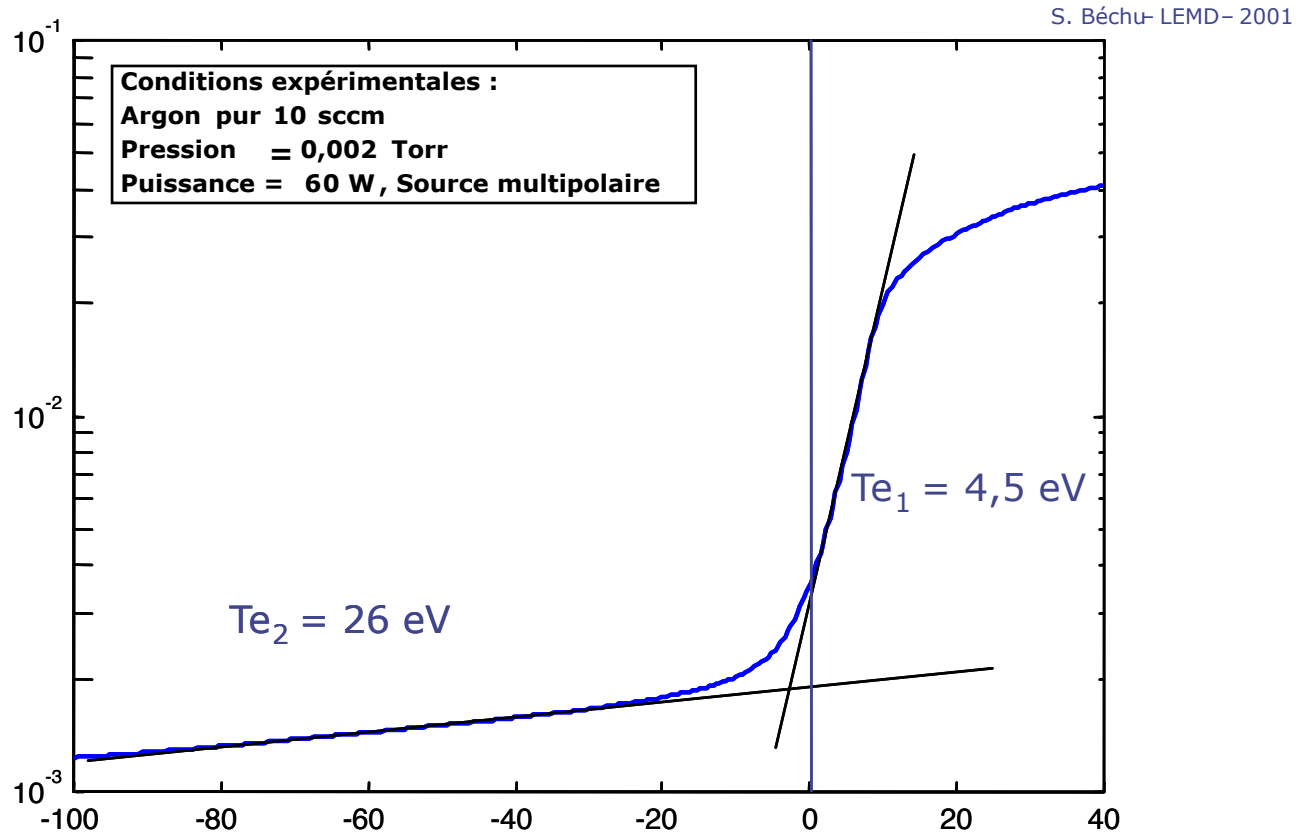
Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

## FDEE double Maxwellienne plasma RCE, 2 mTorr

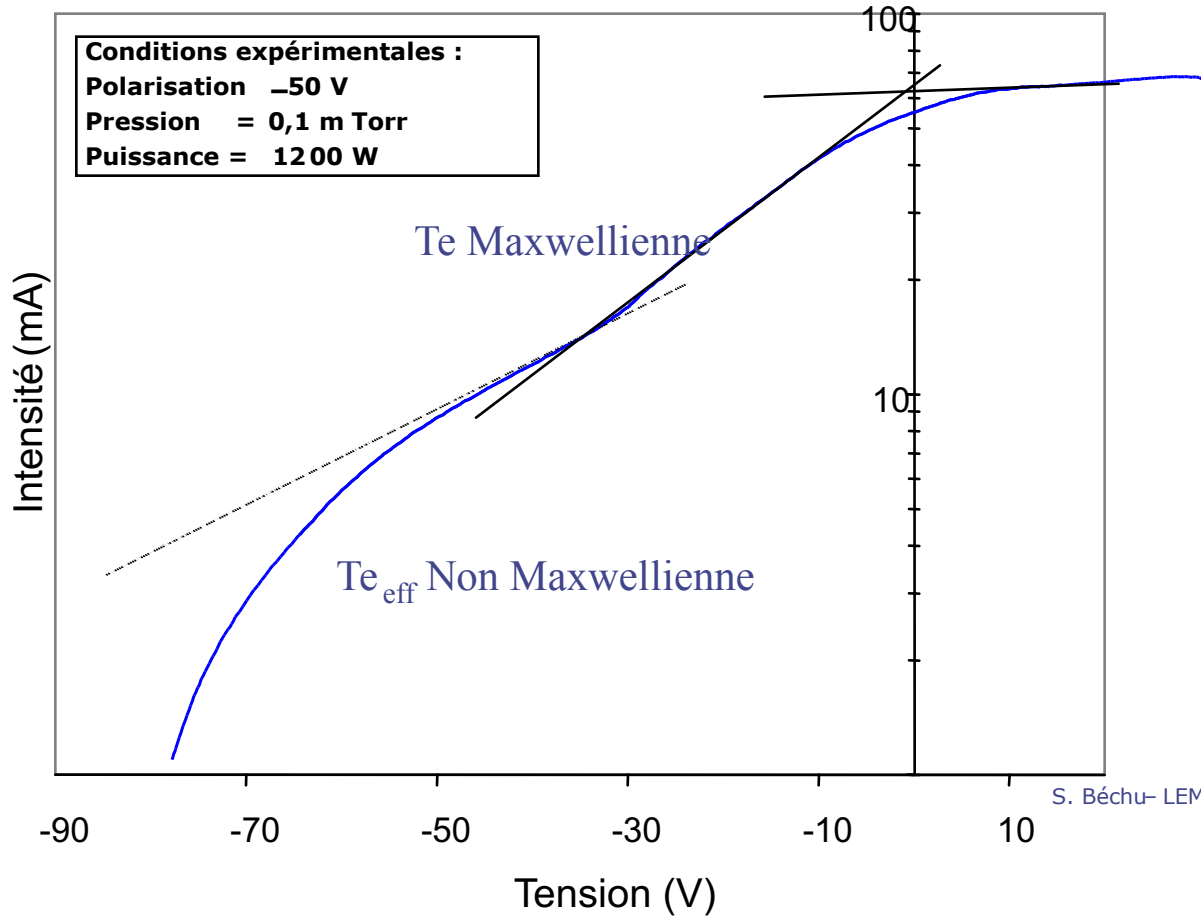
- Méthode de la tangente
- Intégration de la FDEE pour obtenir les deux températures
- Utilisation d'une fonction test pour séparer les deux populations lorsque les températures sont voisines (Ruscanu *et al.* 1997)





# Exemples d'utilisation des sondes – plasma ECR

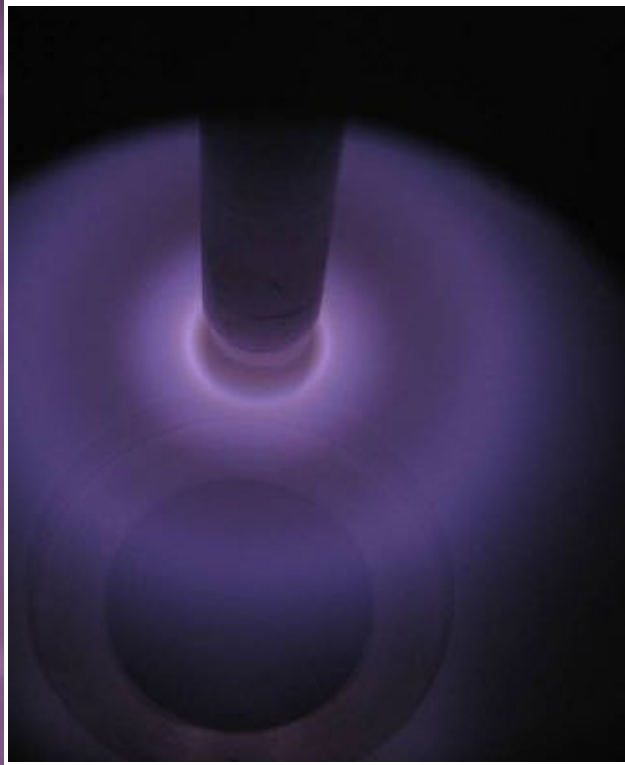
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



S. Béchu- LEMD - 2002

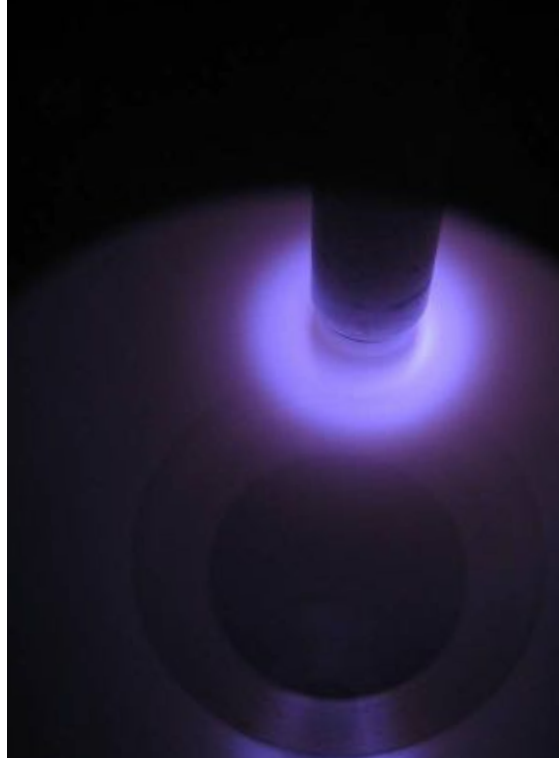
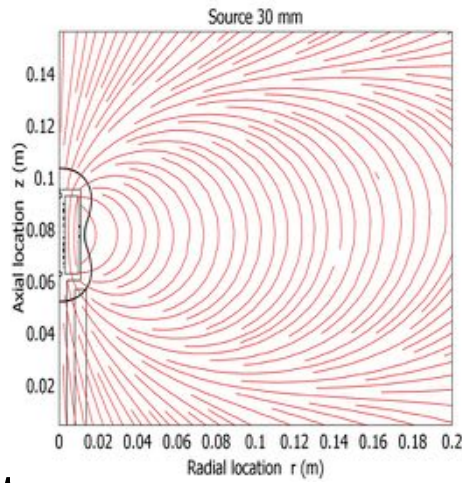
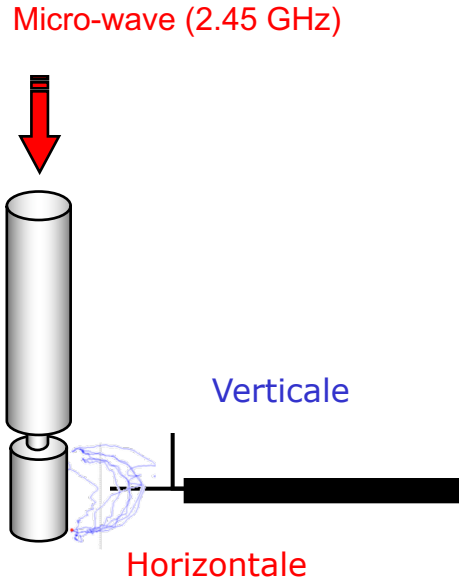
# Exemples de FDEE – Plasma magnétisé + vitesse de dérive

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Modes R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



Mode double anneau (Db\_Ring)

$$\left. \begin{array}{l} P_{inc} = 150 \text{ W} \\ P_{ref} = 56 \text{ W} \end{array} \right\} 94 \text{ W}$$



Mode simple anneau (S\_Ring)

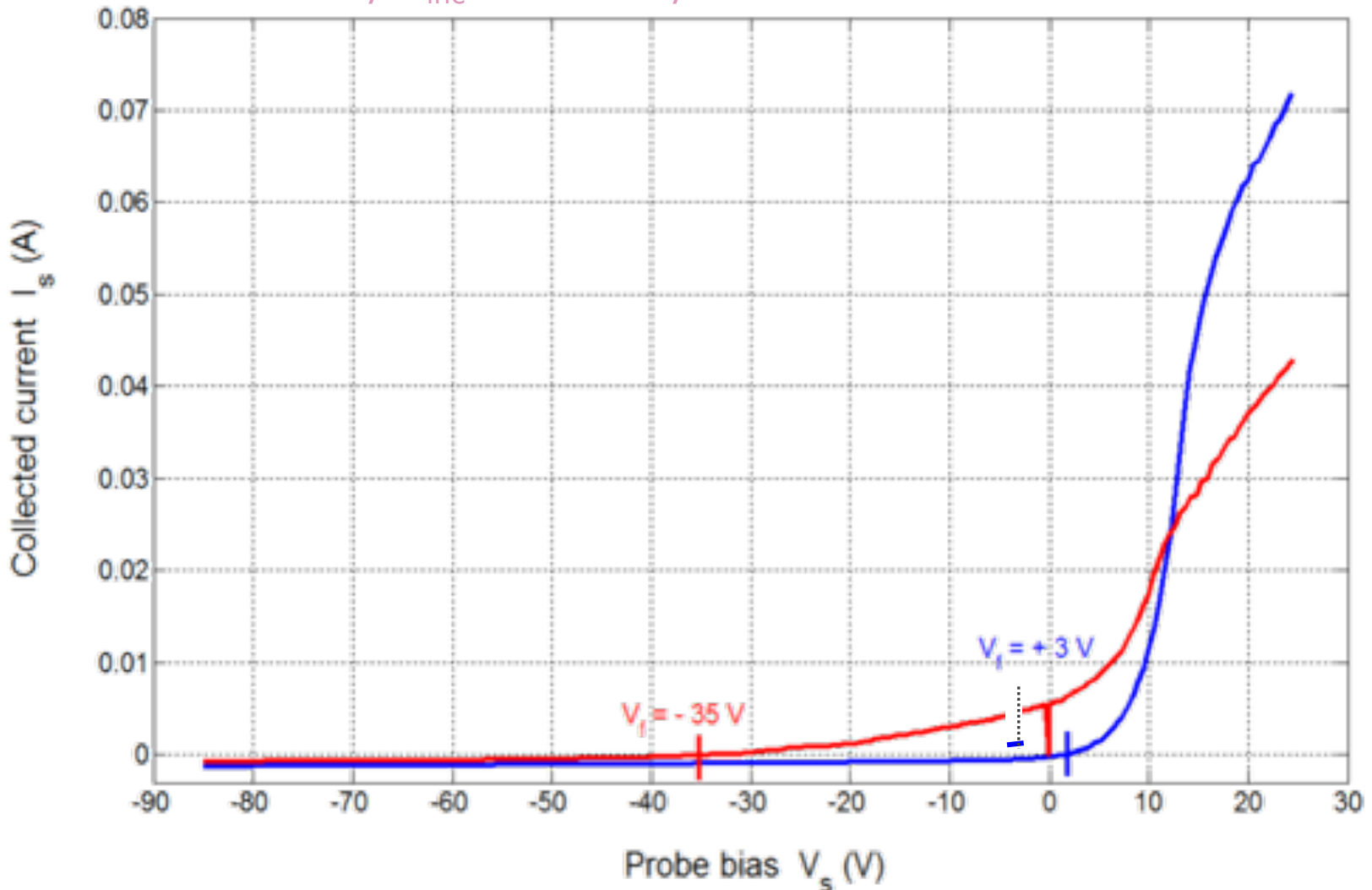
$$\left. \begin{array}{l} P_{inc} = 150 \text{ W} \\ P_{ref} = 7 \text{ W} \end{array} \right\} 143 \text{ W}$$

# Exemples de FDEE – Plasma magnétisé + vitesse de dérive

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Courbe $I_s(V_s)$ expérimentale (sonde cylindrique)

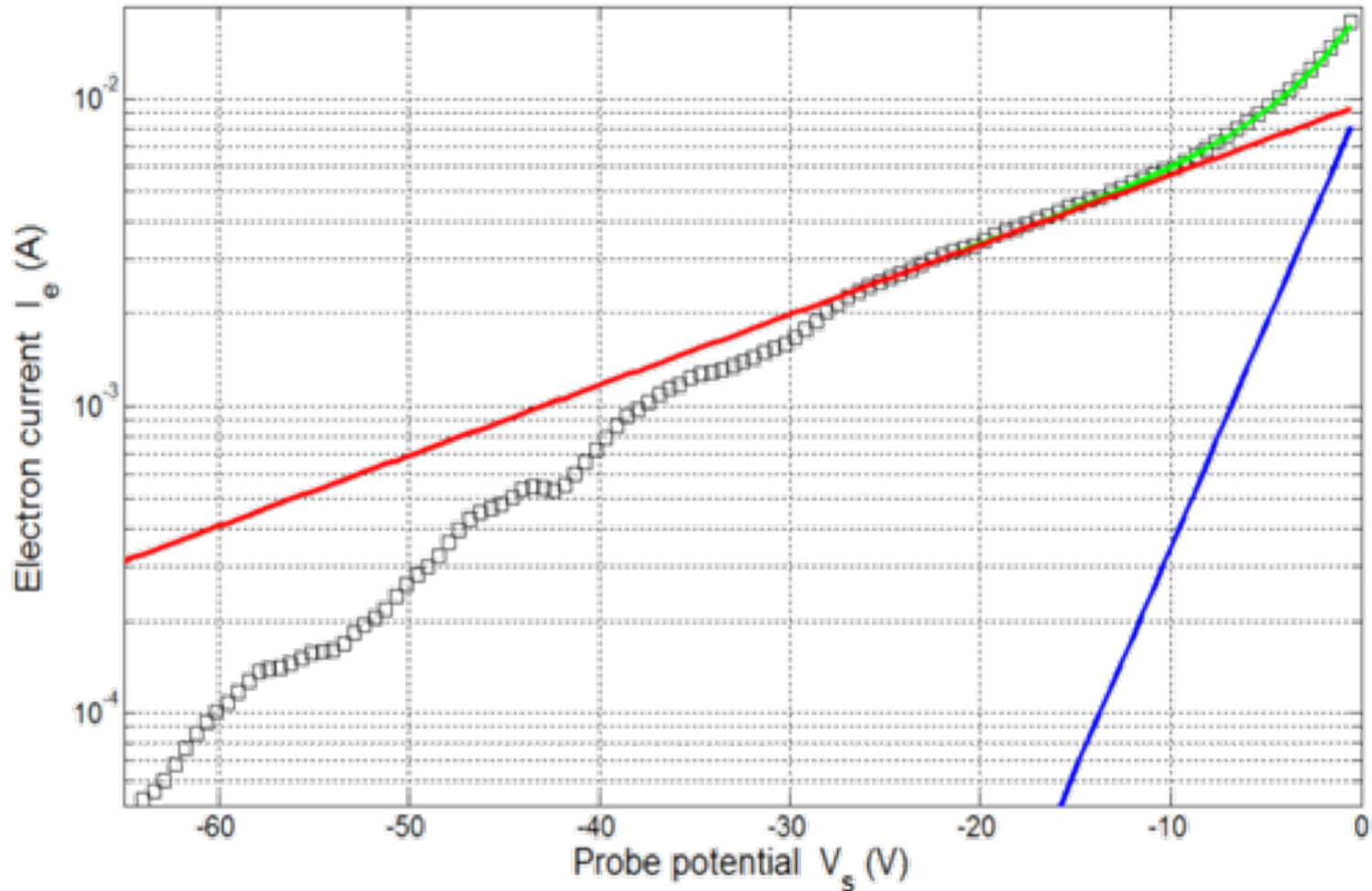
– 2 mtorr /  $P_{inc} = 150$  W / Ar



# Exemples de FDEE – vitesse de dérive

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

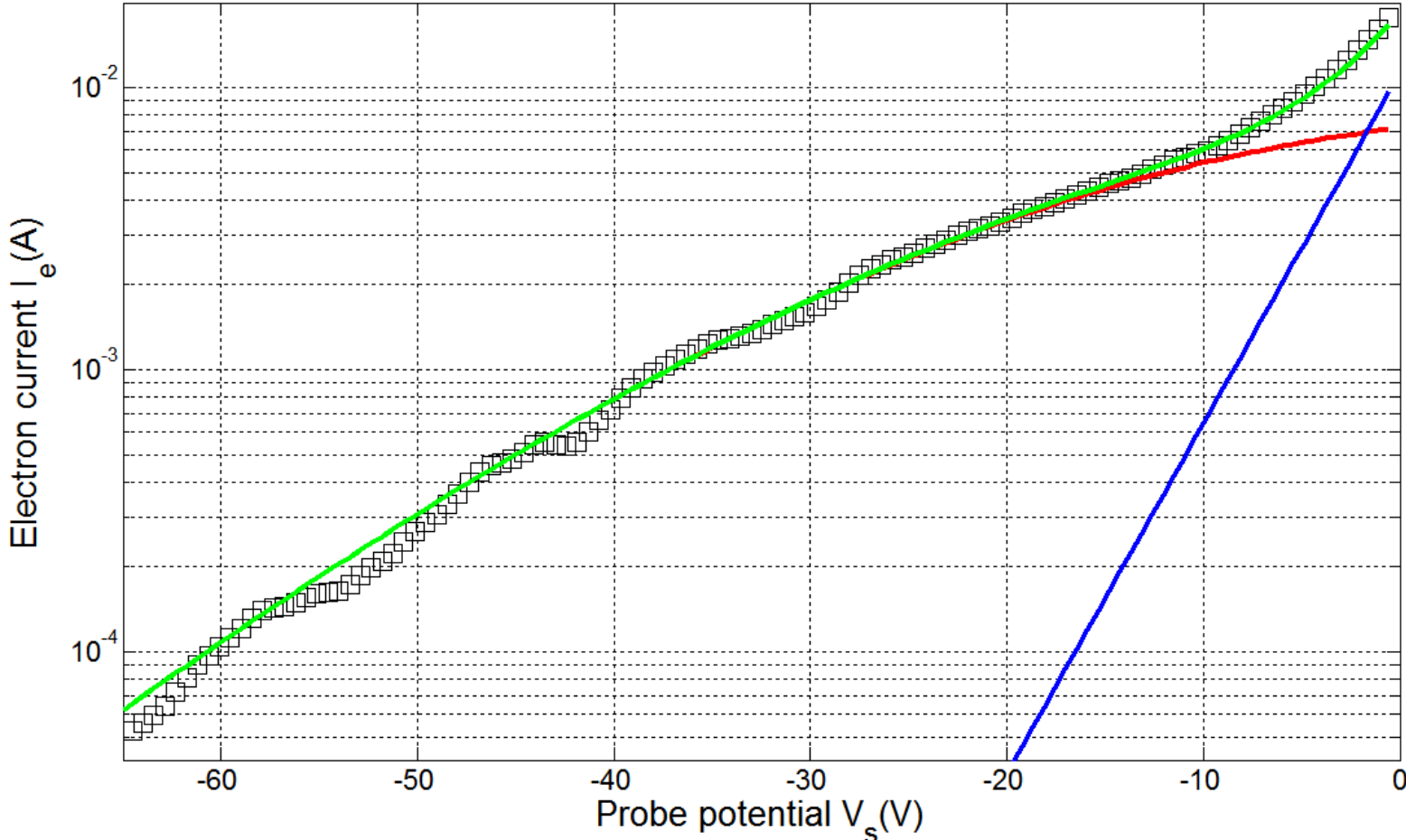
Analyse effectuée avec 2 populations d'électrons isotropes



# Exemples de FDEE – vitesse de dérive

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Méthodes R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Analyse effectuée avec 2 populations d'électrons : isotrope et anisotrope

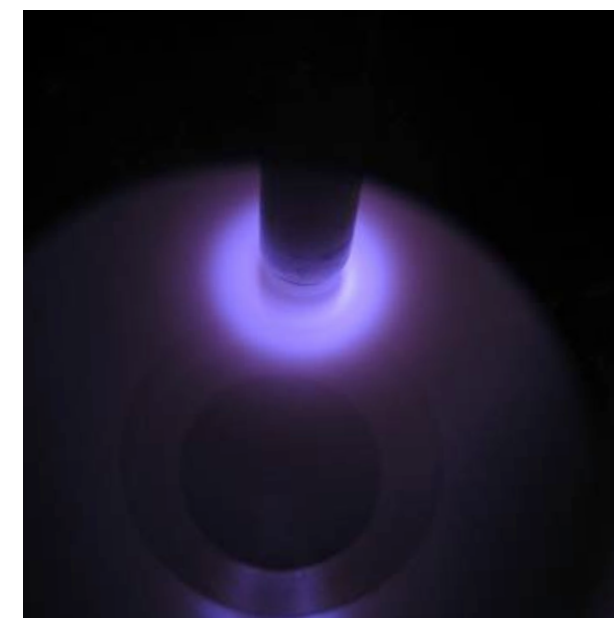
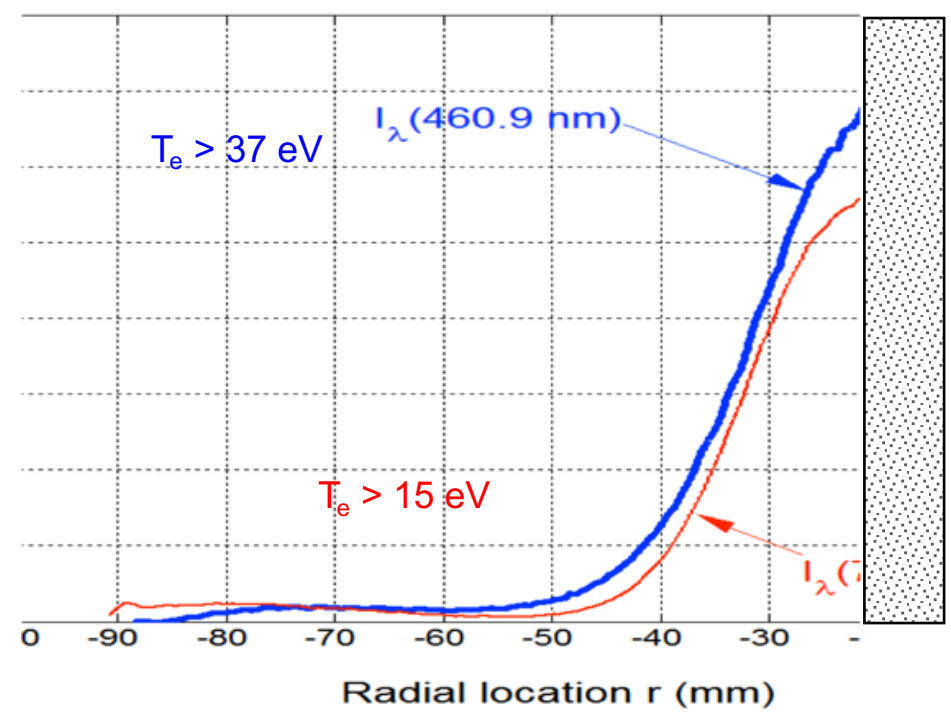


# Étude d'une source plasma dipolaire

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Premier anneau  
 $r \approx 20$  mm

Inversion d'Abel



Mode simple anneau (S\_ring)

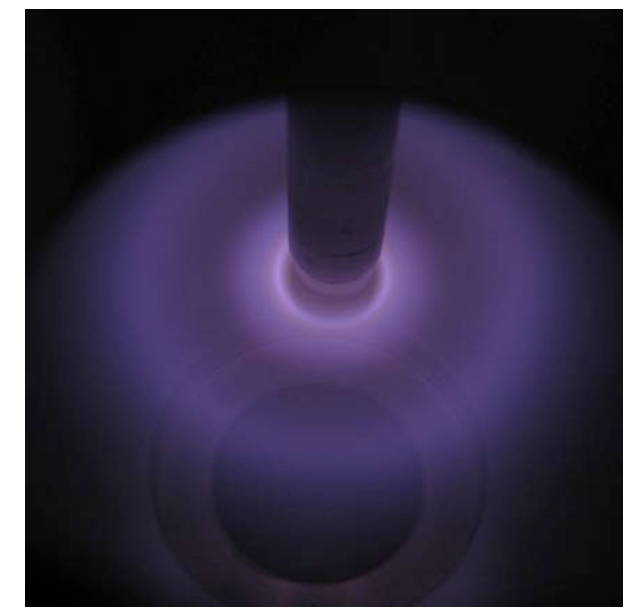
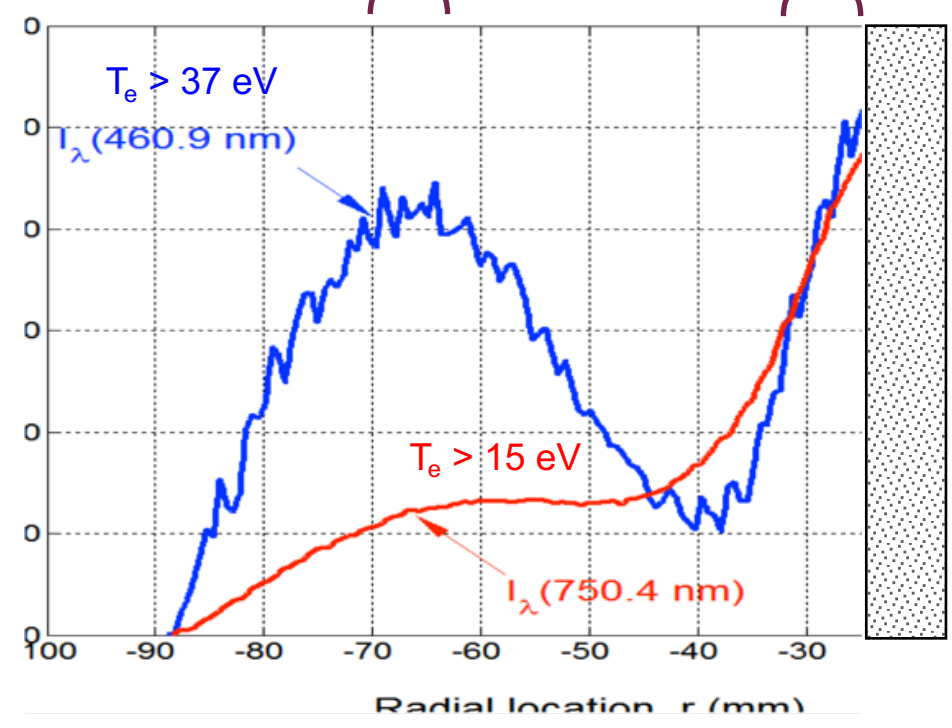
# Étude d'une source plasma dipolaire

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

Inversion d'Abel

Deuxième anneau  $r \approx 65$  mm

Premier anneau  $r \approx 20$  mm

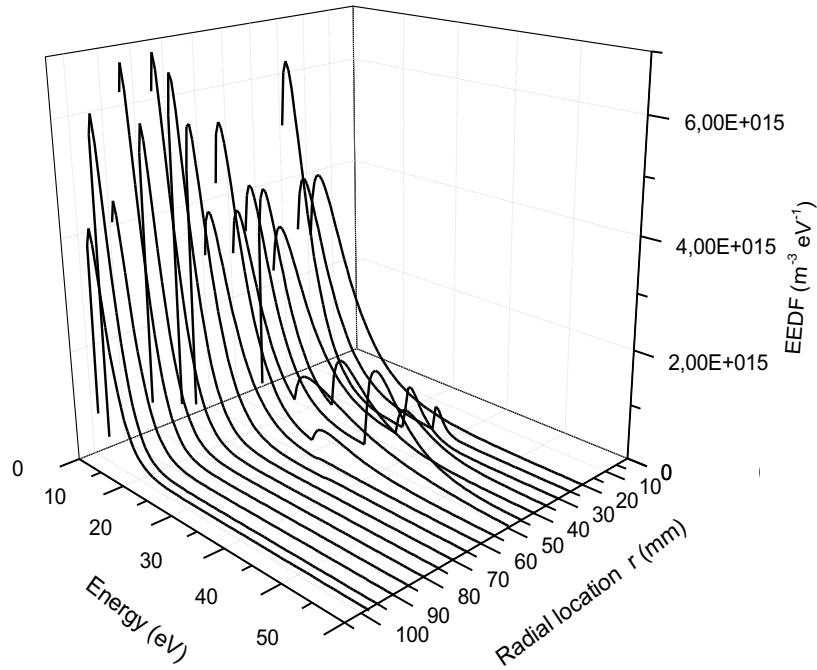


Mode double anneau

# Exemples de FDEE – Plasma magnétisé + vitesse de dérive

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Modèles R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## FDEE reconstruites



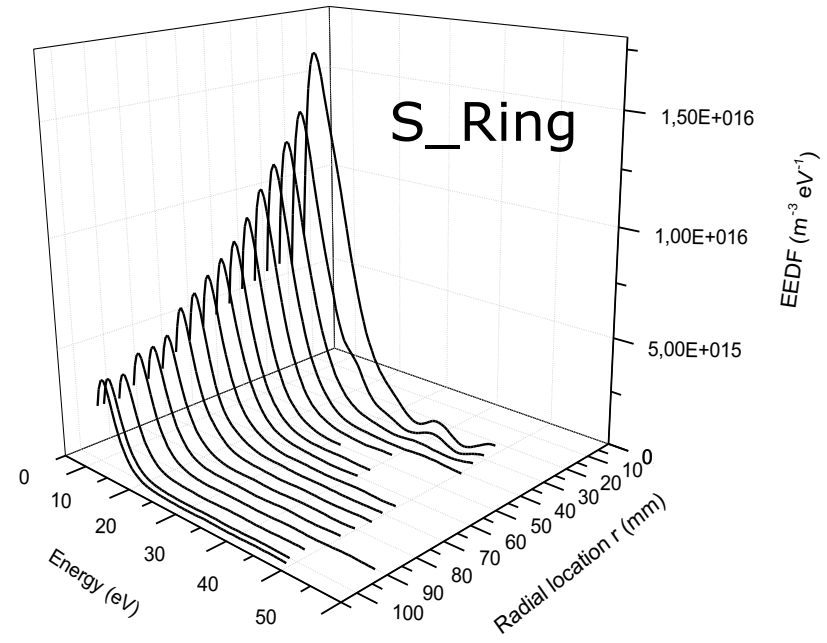
Db\_Ring

## FDEE

- Reconstruction des FDEE à partir des paramètres plasma ( $n_e, T_e, n_b, T_b$  et  $E_b$ )

## FDEE

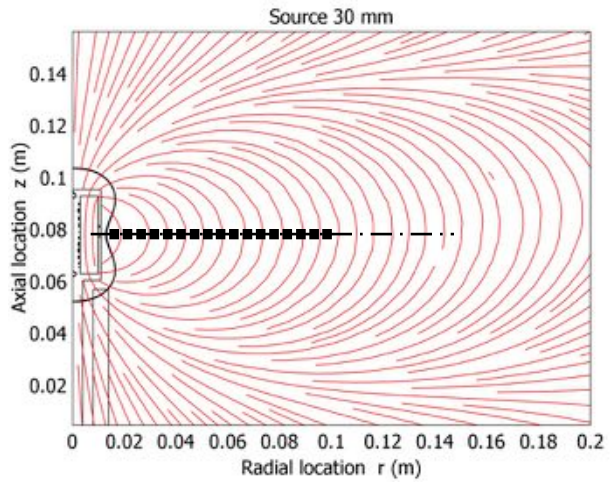
- Méthode de Druyvesteyn ( $d^2I_s/dV_s^2$ ) pour les plasmas isotropes



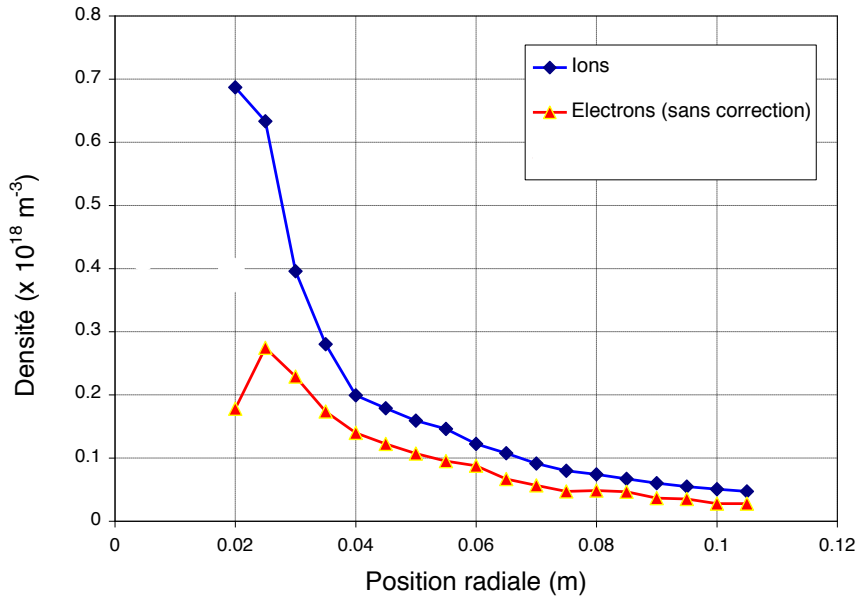


# Exemples de FDEE – plasma magnétisé

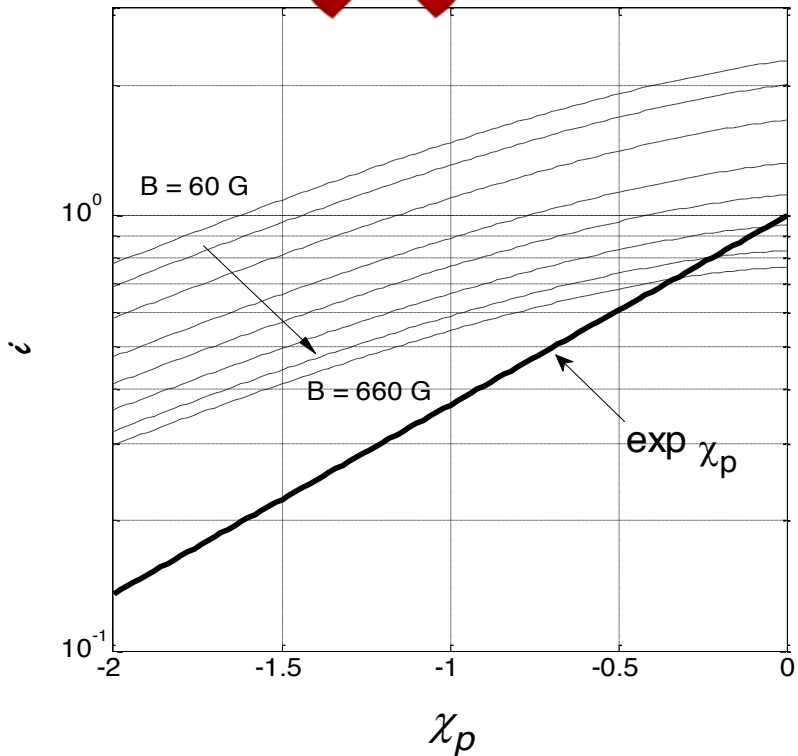
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



Intensité de **B** entre 650 G et 0 G



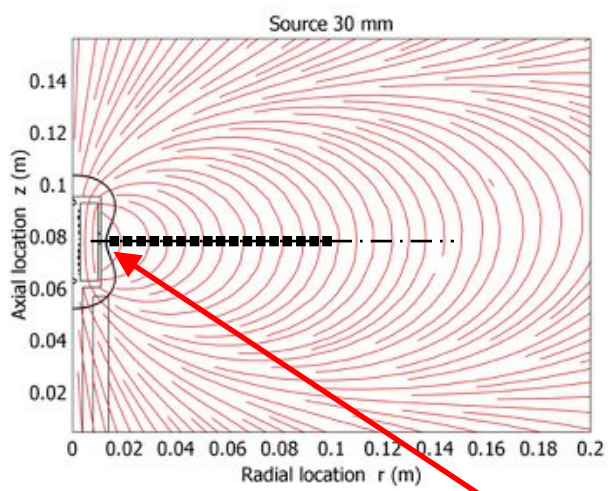
~~Courbes de Rubinstein & Laframboise (1978)~~



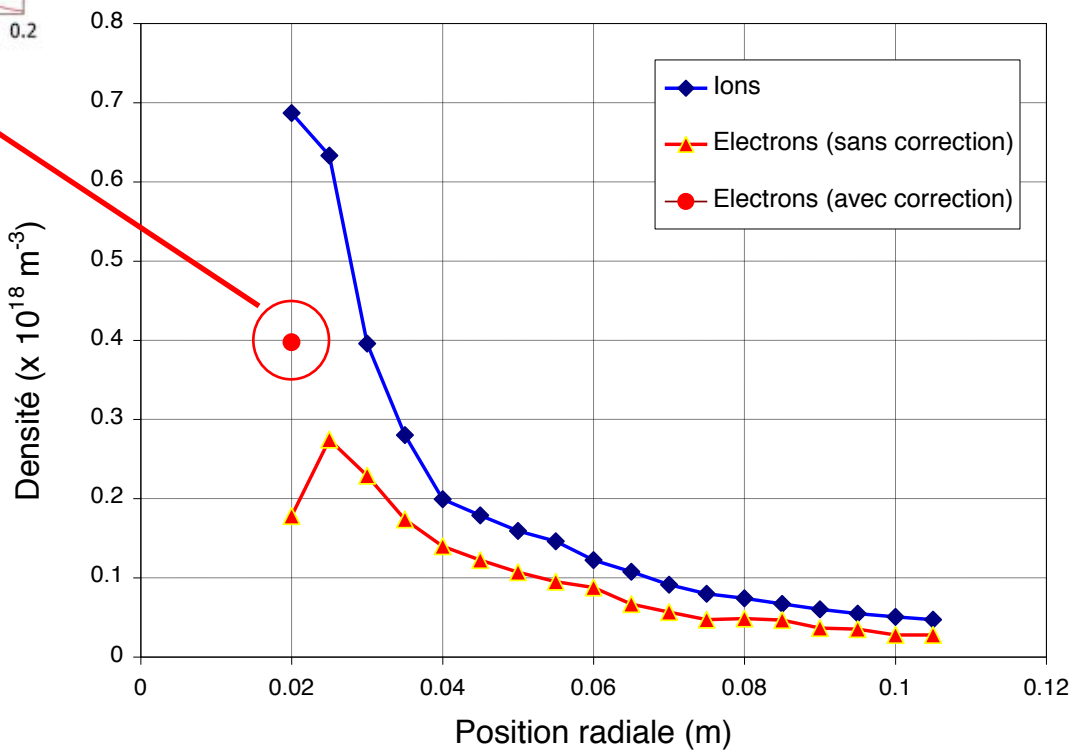
D'après Rubinstein *et al.*  
pas de correction  
 nécessaire !

# Exemples de FDEE – plasma magnétisé

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



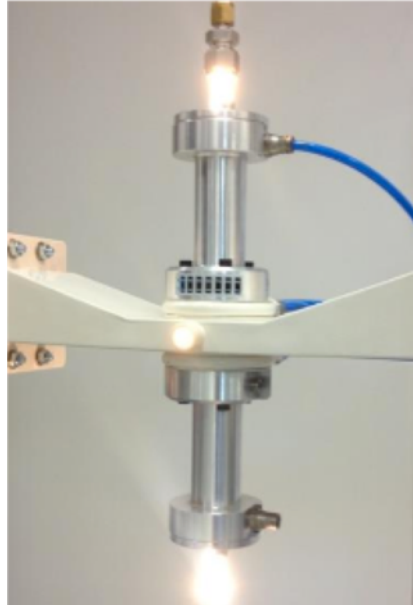
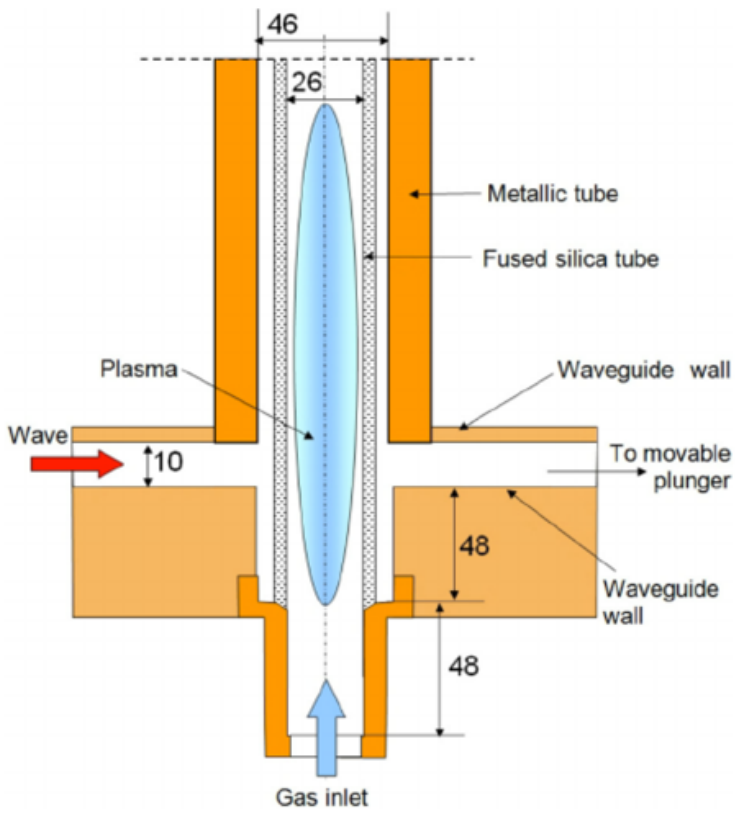
Intensité de **B** entre 650 G et 0 G



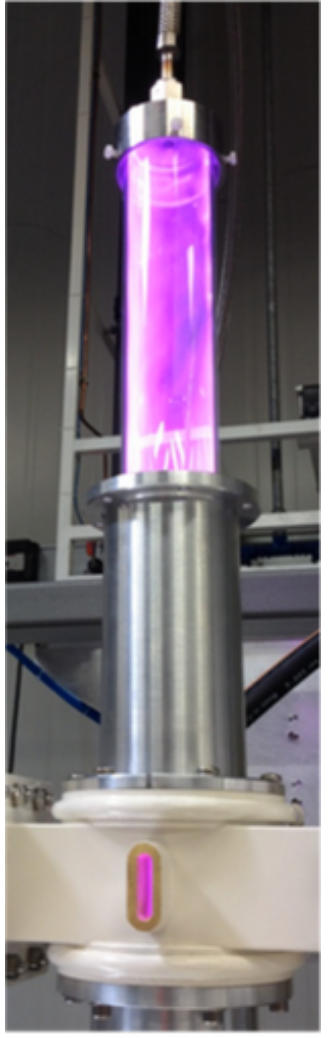
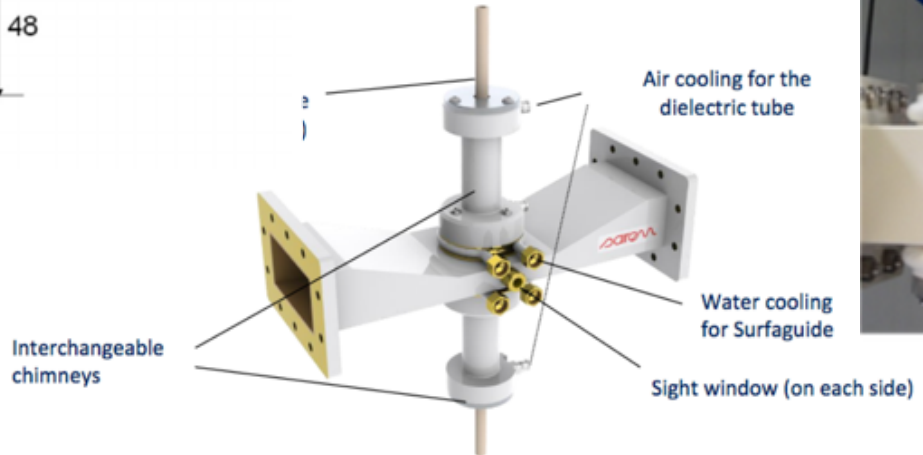
# Exemples d'utilisation d'une sonde de Langmuir

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Exemple #2: plasma MW

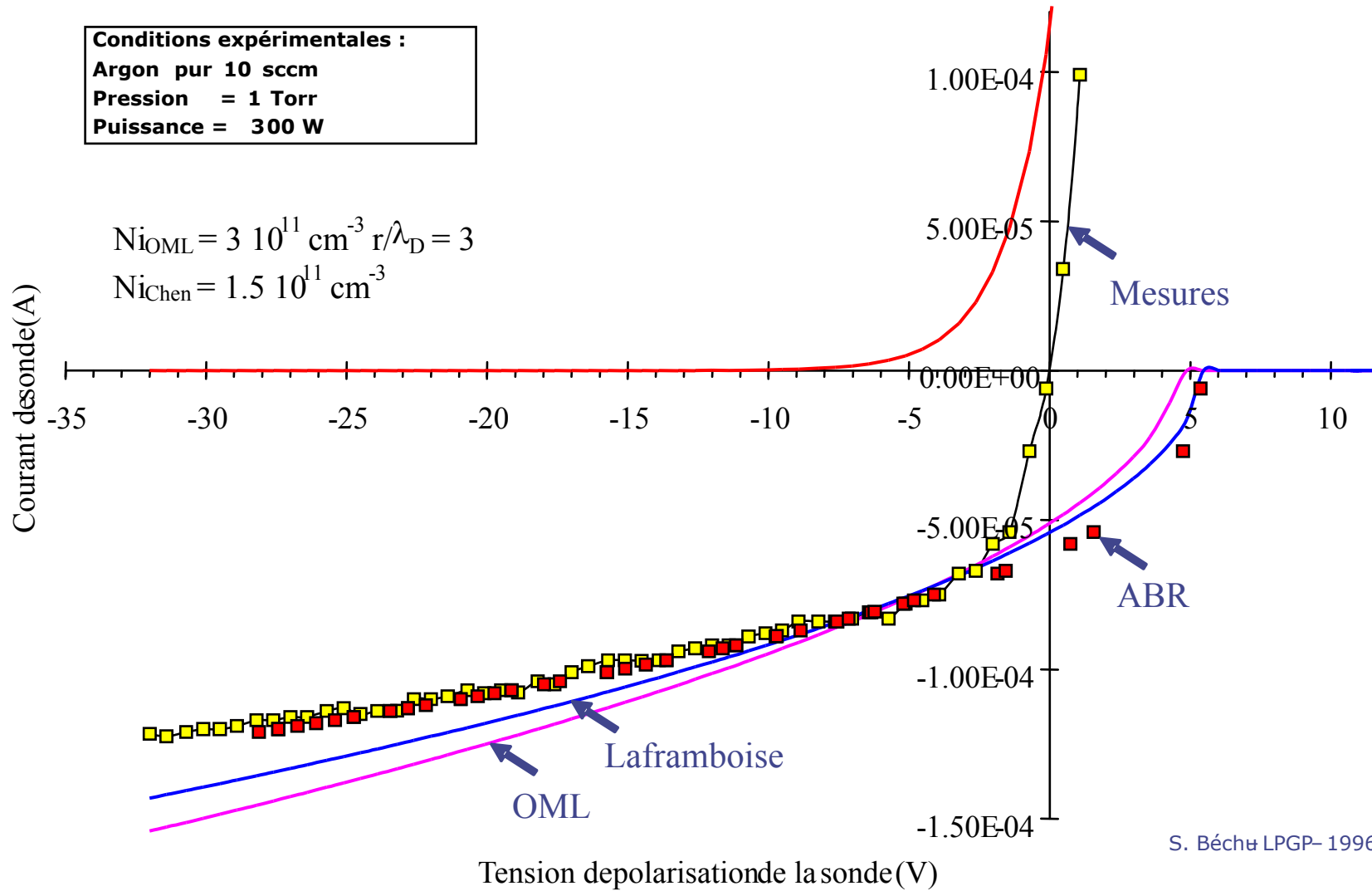


Surfguide plasma source WR340



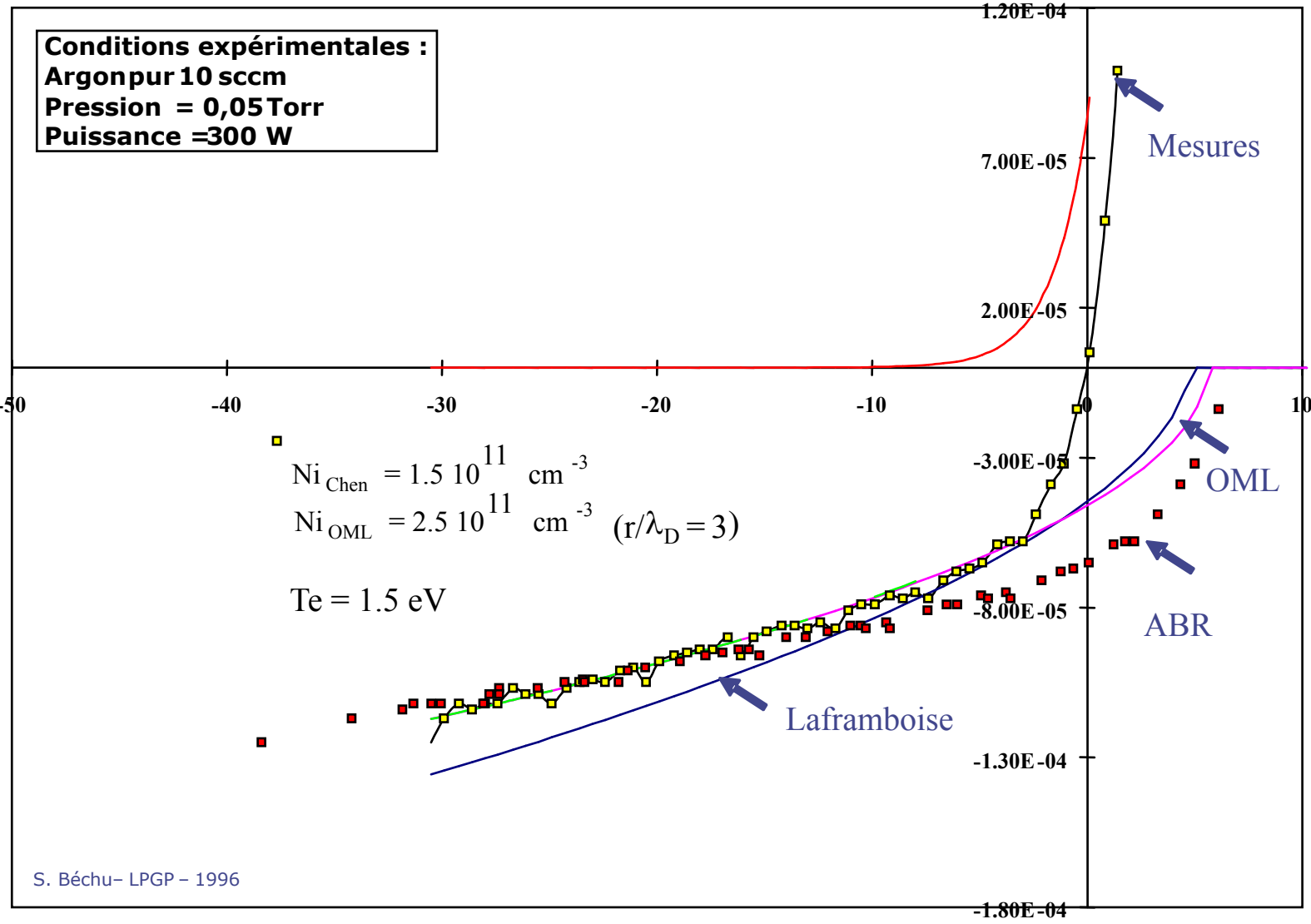
# Exemples d'utilisation des sondes – plasma MW

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



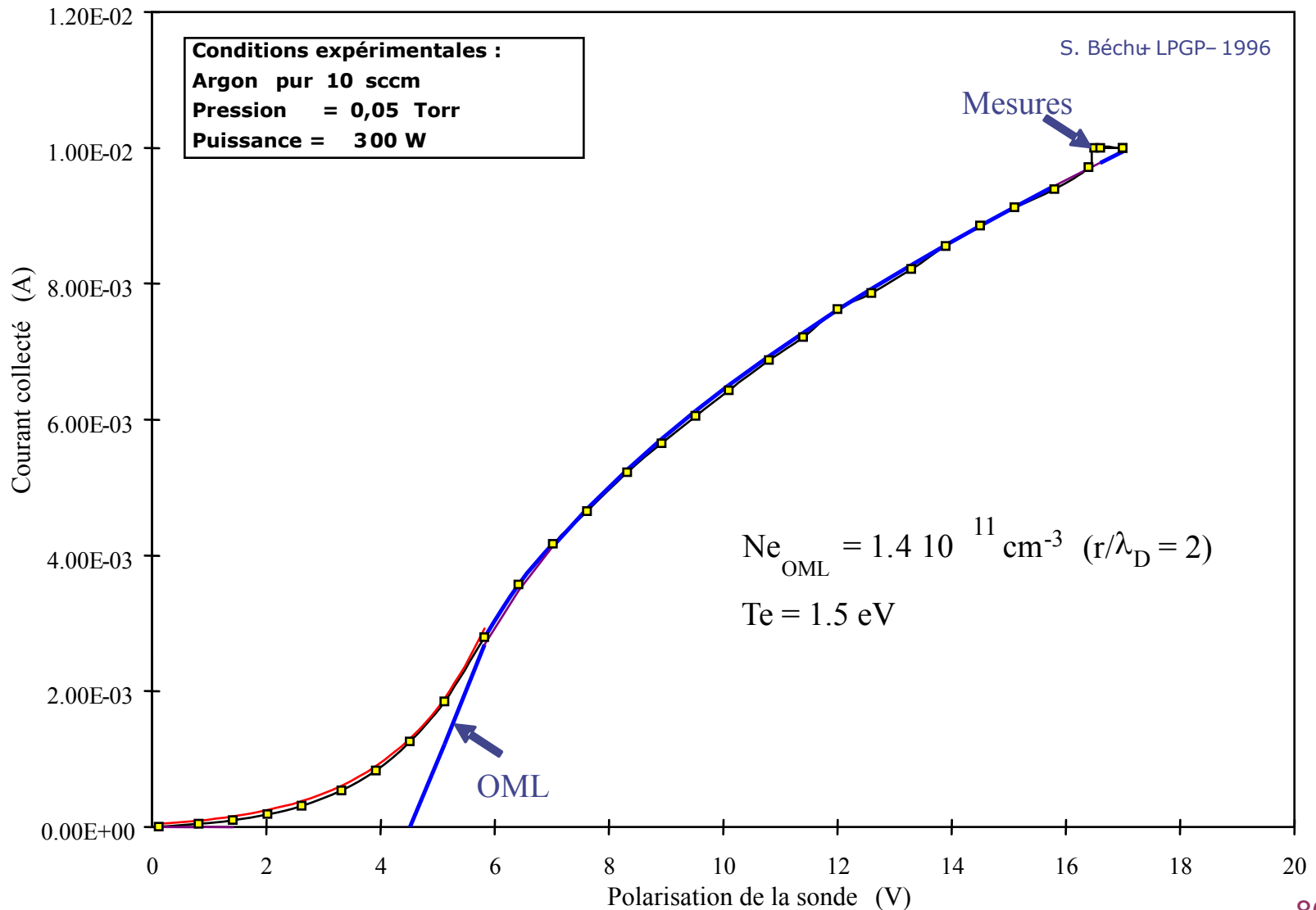
# Exemples d'utilisation des sondes – plasma MW

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



# Exemples d'utilisation des sondes – plasma MW

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



# Exemples d'utilisation d'une sonde de Langmuir

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de  
mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs  
expérimentaux

Bibliographie

## Exemple #3: plasma anisotrope



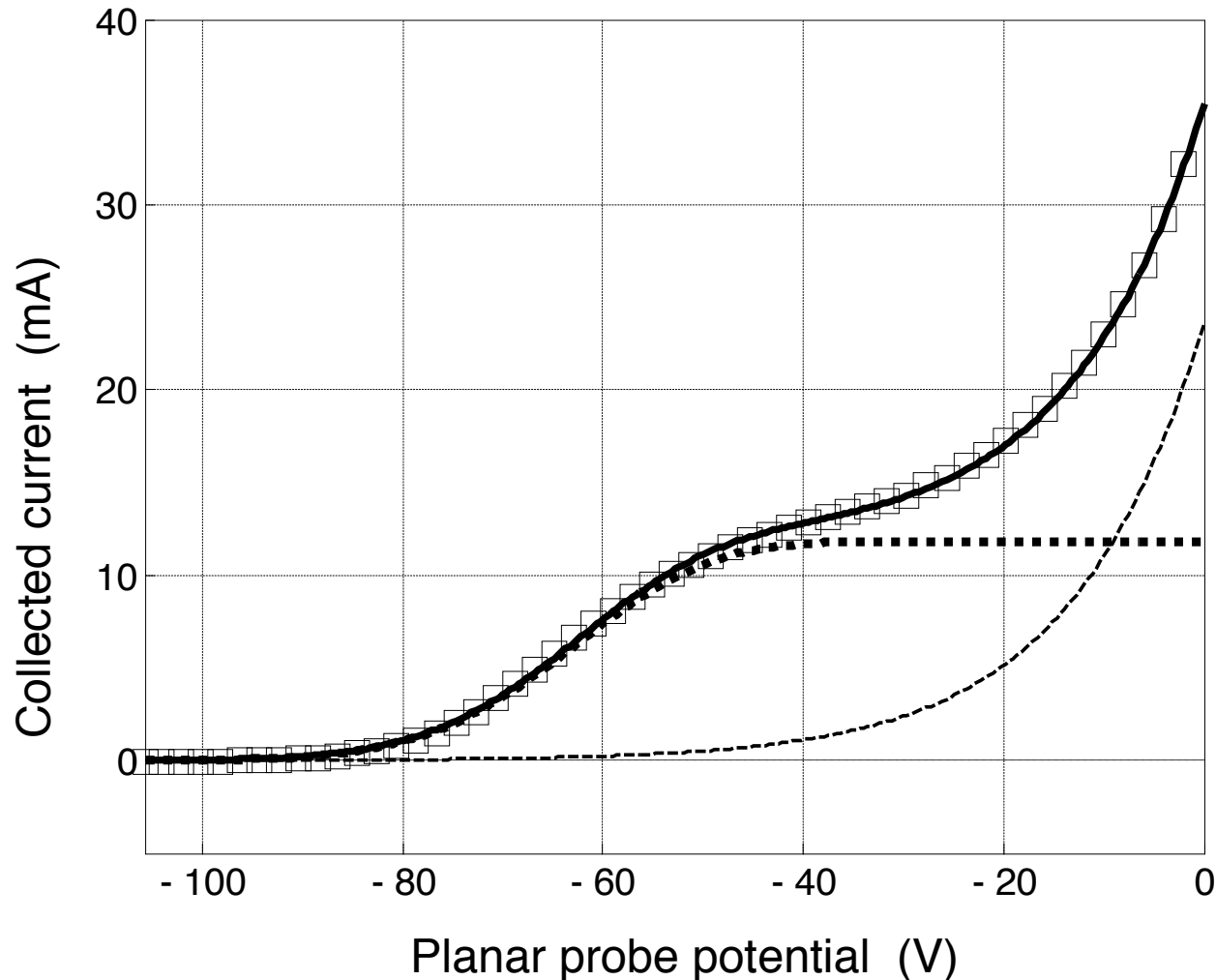
Source d'électrons – Projet MATECO

# Exemples d'utilisation des sondes – plasma anisotrope

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

## Courbe $I_s(V_s)$ expérimentale (sonde plane)

– 0,5 mtorr /  $P_{inc} = 150$  W / Ar





# Exemples d'utilisation des sondes – plasma anisotrope

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

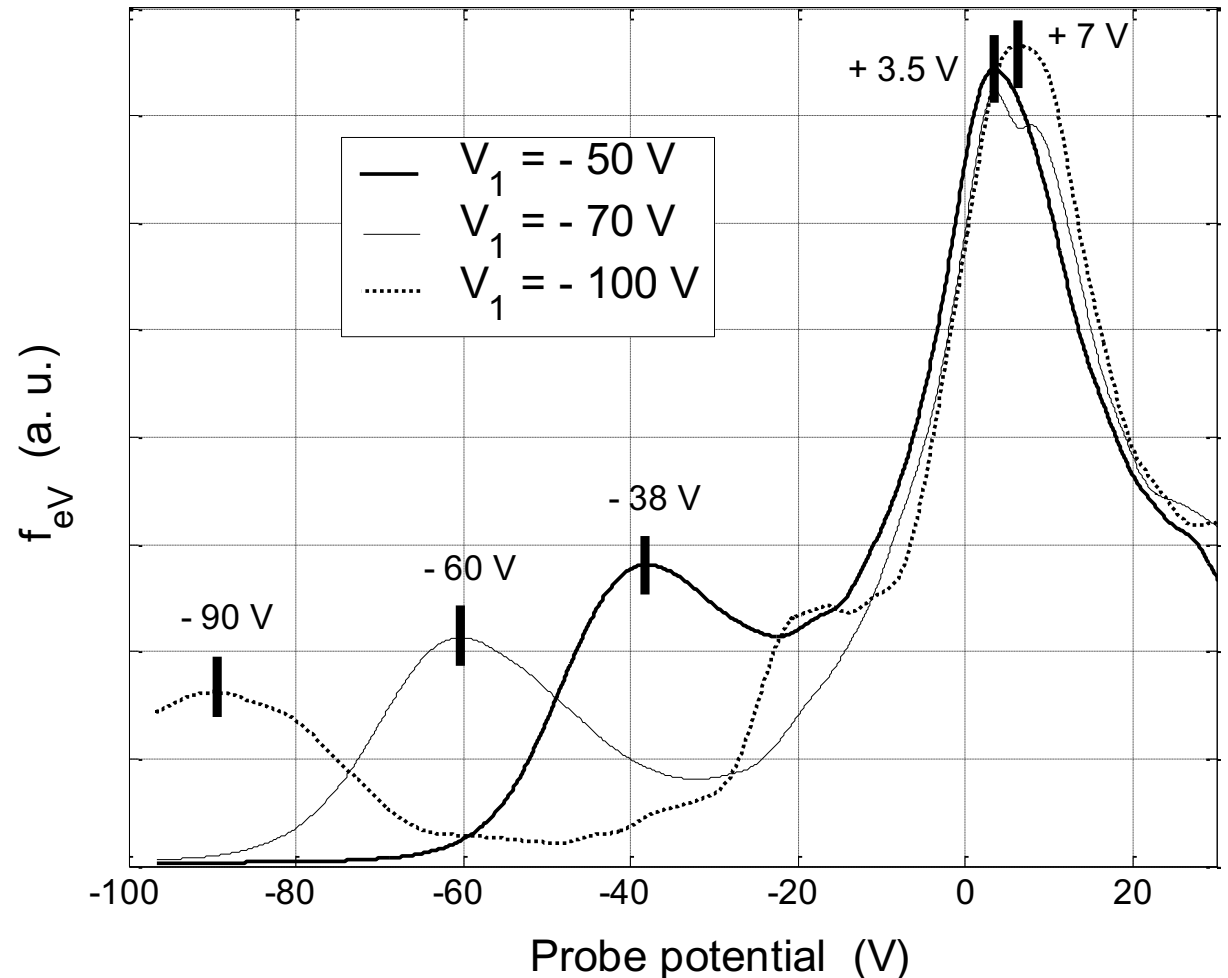
Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

## Sonde plane adaptée au plasma (faisceau d'électrons)

$$g_e(\varepsilon) \propto dI_S/dV_S$$



# Exemples d'utilisation d'une sonde de Langmuir

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

## Exemple #4: plasma discontinu



Source Cybele – CEA Cadarache

# Exemples d'utilisation des sondes – plasma discontinu

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Mesures R.F.

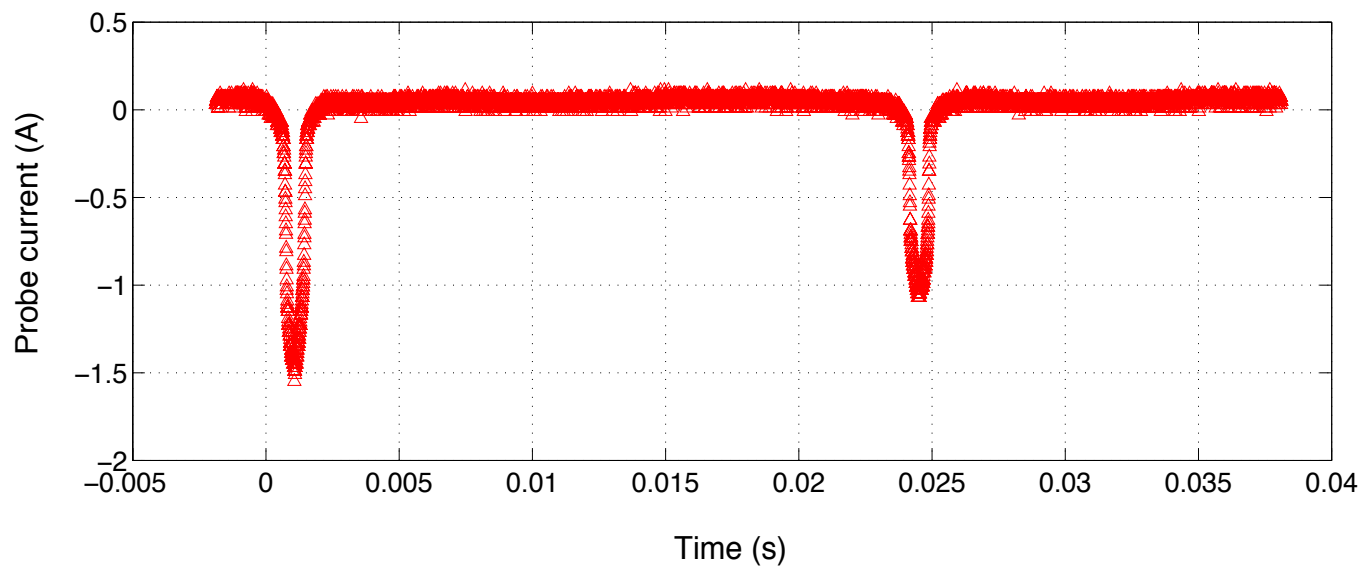
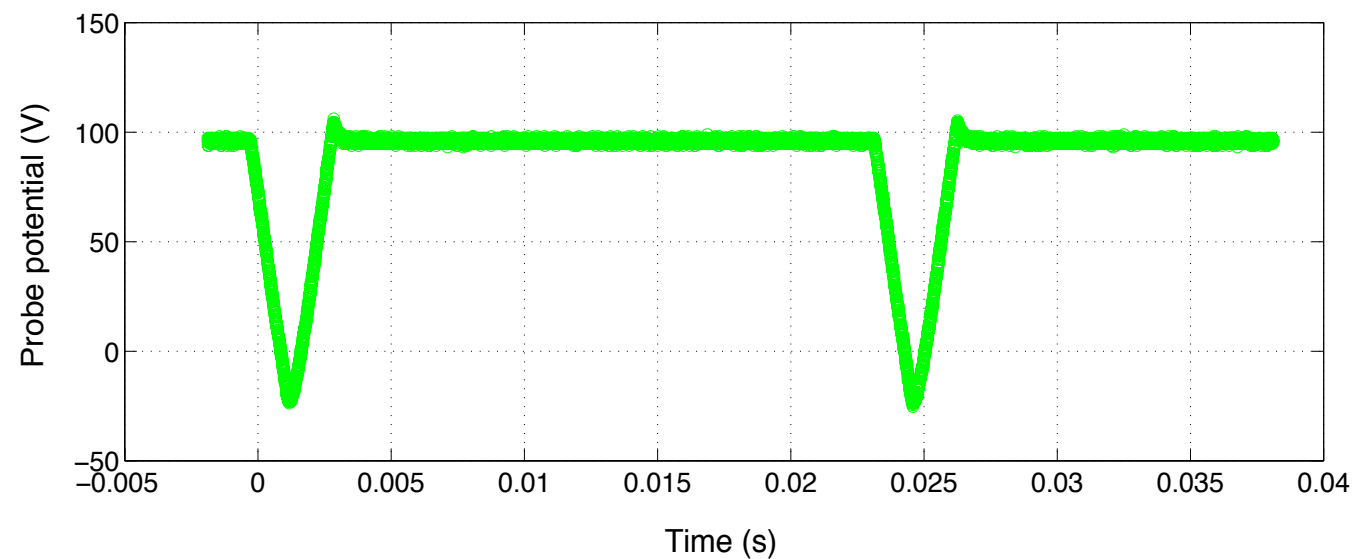
Photodét.

Pulsé

Exemples

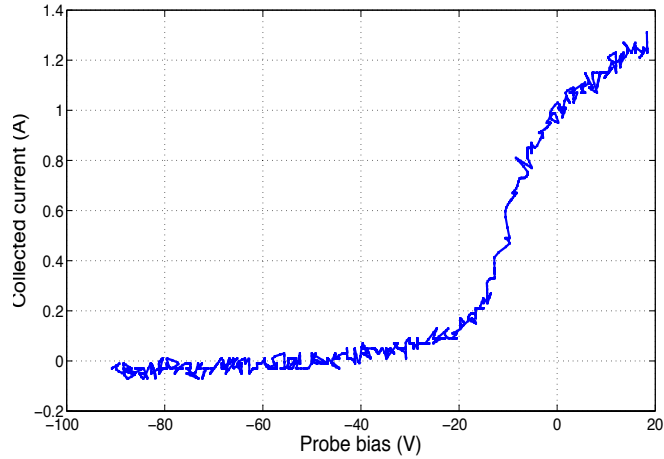
Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

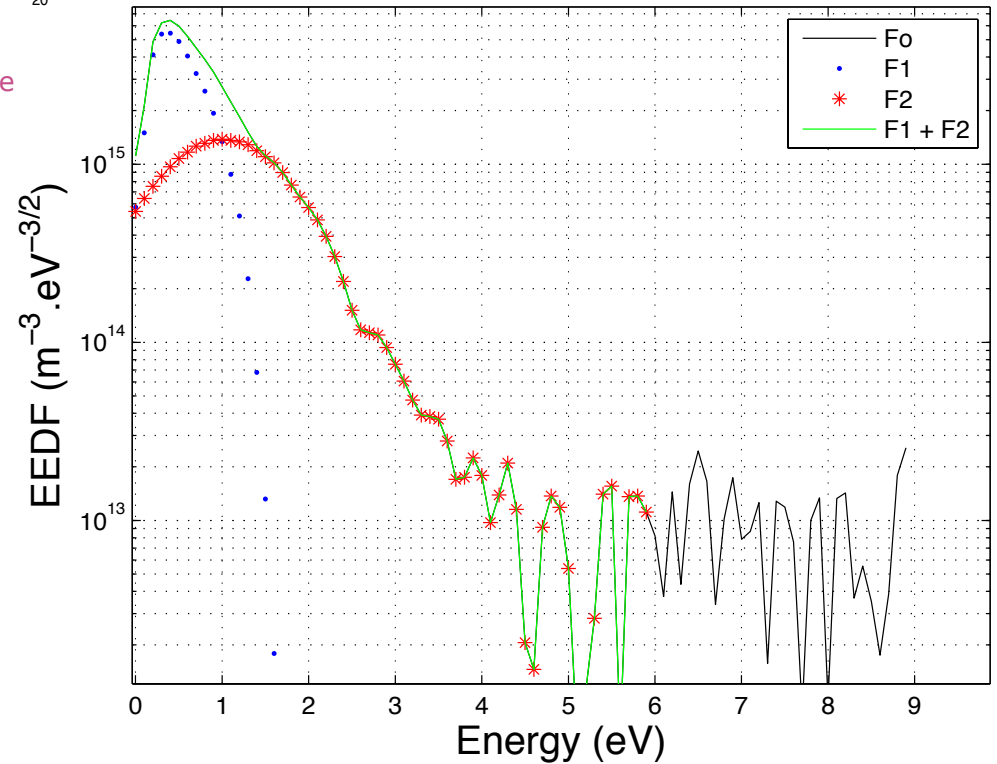


# Exemples d'utilisation des sondes – plasma discountinu

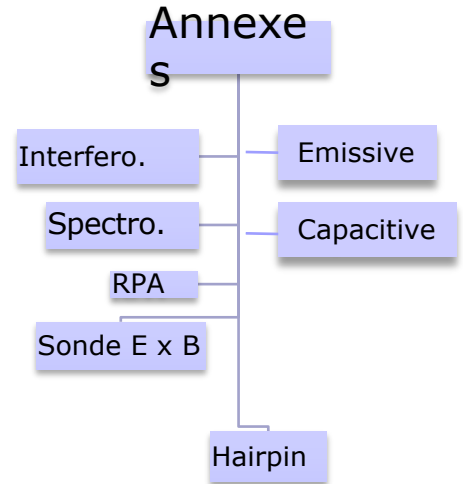
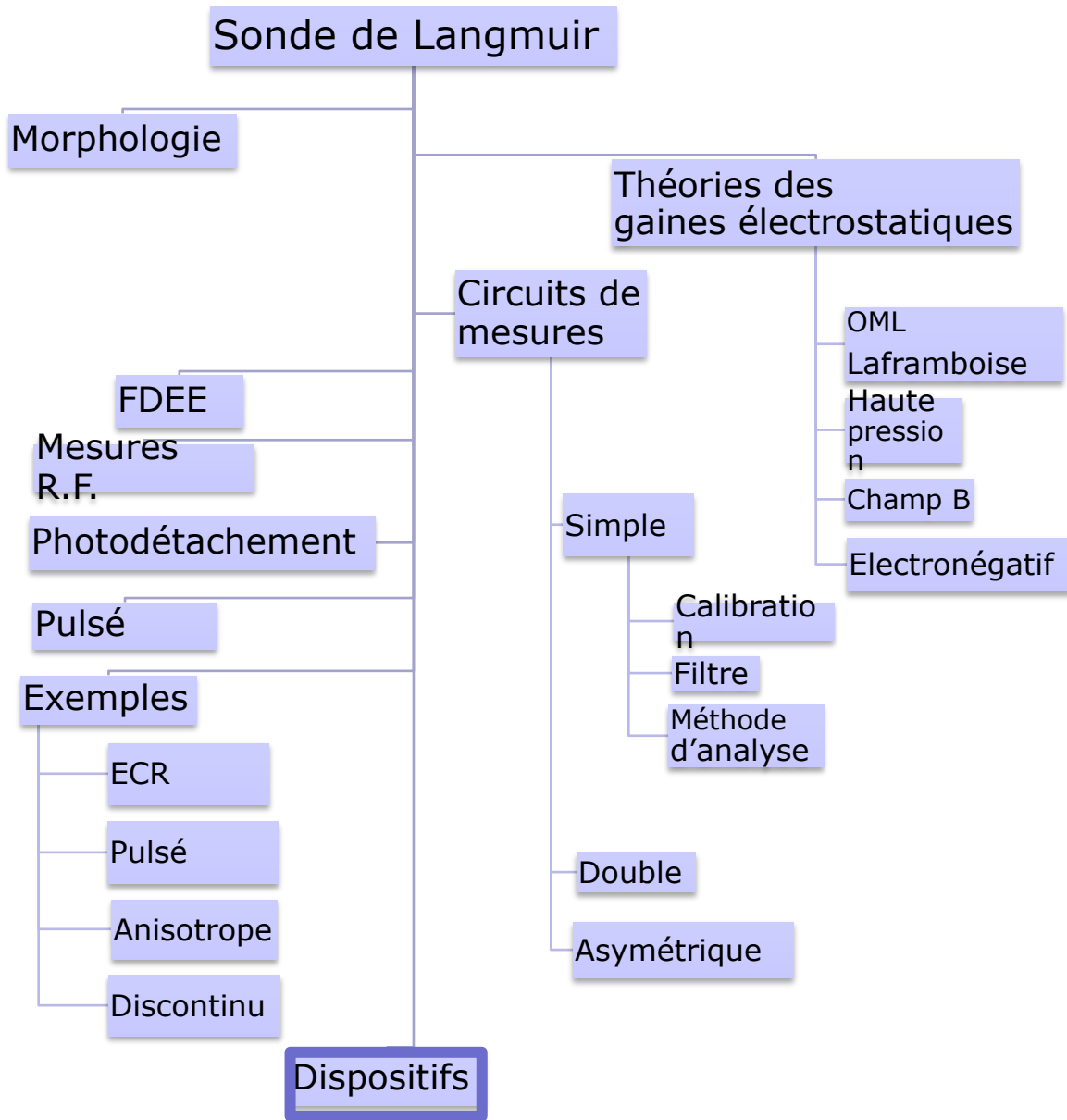
- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie



Plasma d'hydrogène  
30 G / 14 kW / 2  
mtorr (A. Simonin)



# Sommaire

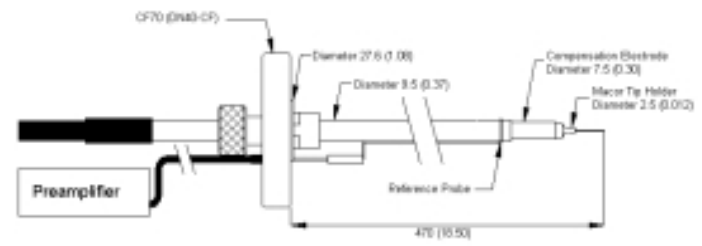


# Disp. de mesure de sonde – commerciaux & réseau Plasmas Froids

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

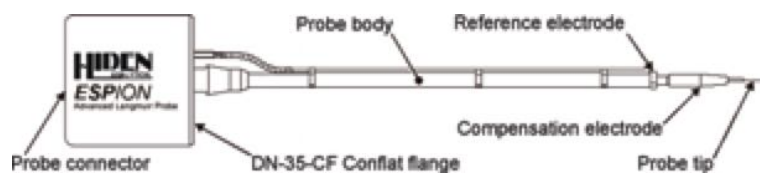
## Scientific Systems (Hopkins & Graham)

- ❑ 200 points de mesures
- ❑ 1,3 Amps maximum
- ❑ 16 k€ sans PC de contrôle



## Hiden (Chen)

- ❑ > 200 points de mesures
- ❑ 1,2 Amps maximum
- ❑ 18 k€ sans PC de contrôle



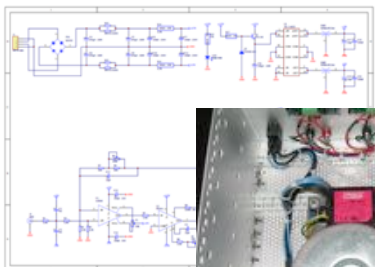
## Impedans (Hopkins)

- ❑
- ❑ 100 mA (250 mA pulse)
- ❑



## VGPS Probe system (Godyak)

- ❑
- ❑
- ❑



## QueDo

- ❑ 1000 points de mesures
- ❑ 2 Amps maximum
- ❑ 9,5 k € avec PC de contrôle intégré



QueDoV2 Plasma Probe - LPSC/IN2P3/CNRS - Standard acq at QueDo\_Standard\_55 mm\_20170509\_122530...

Open config Save config Read data << >>

Probe parameters (length, diameter, resistance):  
 1 cm, 300 microns, 0.8 ohms

Comments:

Ions type (atomic mass):  
 40

Save data Keyword Warnings

Probe Ground Lift

Clean Standard Temporal BoxCar Spatial Motor

50.00 Start (V) 100 Curve averaging  
 -60.00 Stop (V)  Use internal test load  
 0.10 Duration (s) 50 I Scale (mA)  
 1000 Nb Pnts Optimum Scale  
 10000.00 Sampling (Hz)  V before I  
 x1 Auto Gain V  
 x1 Auto Gain I  
 64 Point averaging

**Acquisition finished: 1000 blocks received** Start

Enable Ext IN 1 50 ohms Enable Ext IN 2 50 ohms  
 10V Scale 10V Scale

0.00 Vbias (V) 0 Fifo Nb x202 Status

Graphs Derivatives Computations Help

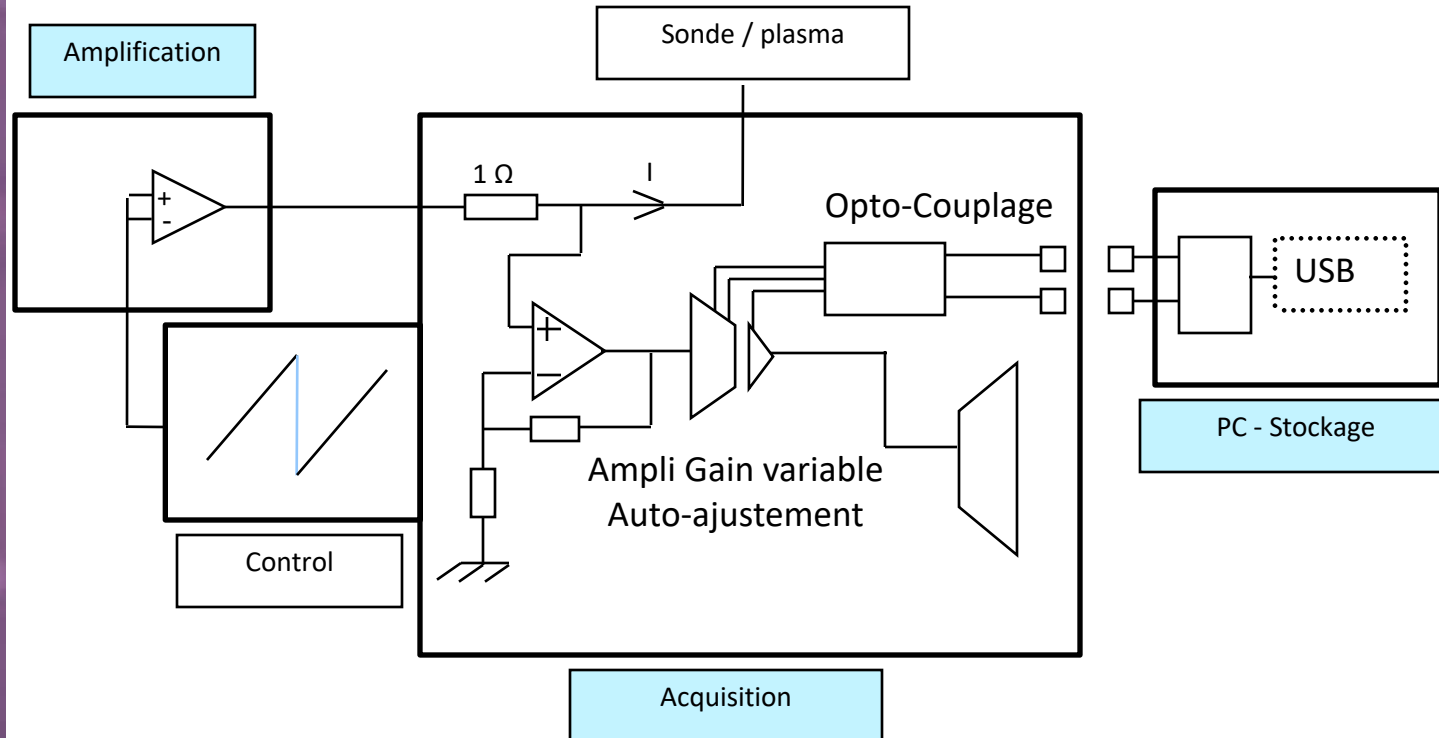
Nb	Y axis	X axis	Lines	Log axis	Index
PlotA	I	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	111
PlotB	dI/dV	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	22.200
PlotC	d <sup>2</sup> I/dV <sup>2</sup>	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	77.008
				<input type="checkbox"/>	73.883
				<input type="checkbox"/>	0.305
				<input type="checkbox"/>	-0.580
				<input type="checkbox"/>	1
				<input type="checkbox"/>	1
				<input type="checkbox"/>	2000
				<input type="checkbox"/>	26.928
				<input type="checkbox"/>	3.272

Lock all axes Zoom Out  
 Display resistance commute delay

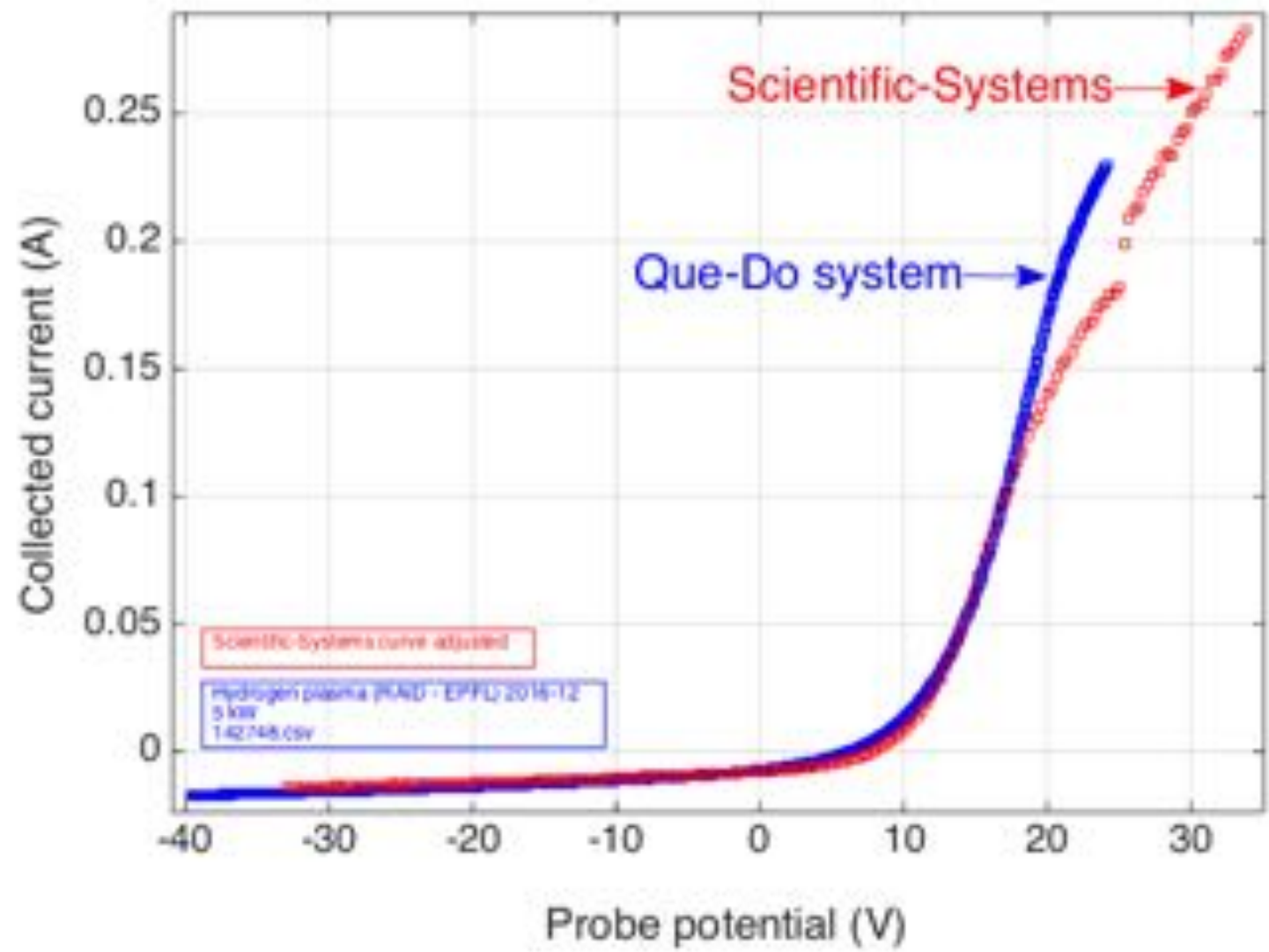
# Annexe – Schéma de principe de l'acquisition

- Morphologie
- Théorie
- FDEE
- Circuits de mesures
- Mesures R.F.
- Photodét.
- Pulsé
- Exemples
- Dispositifs expérimentaux
- Bibliographie

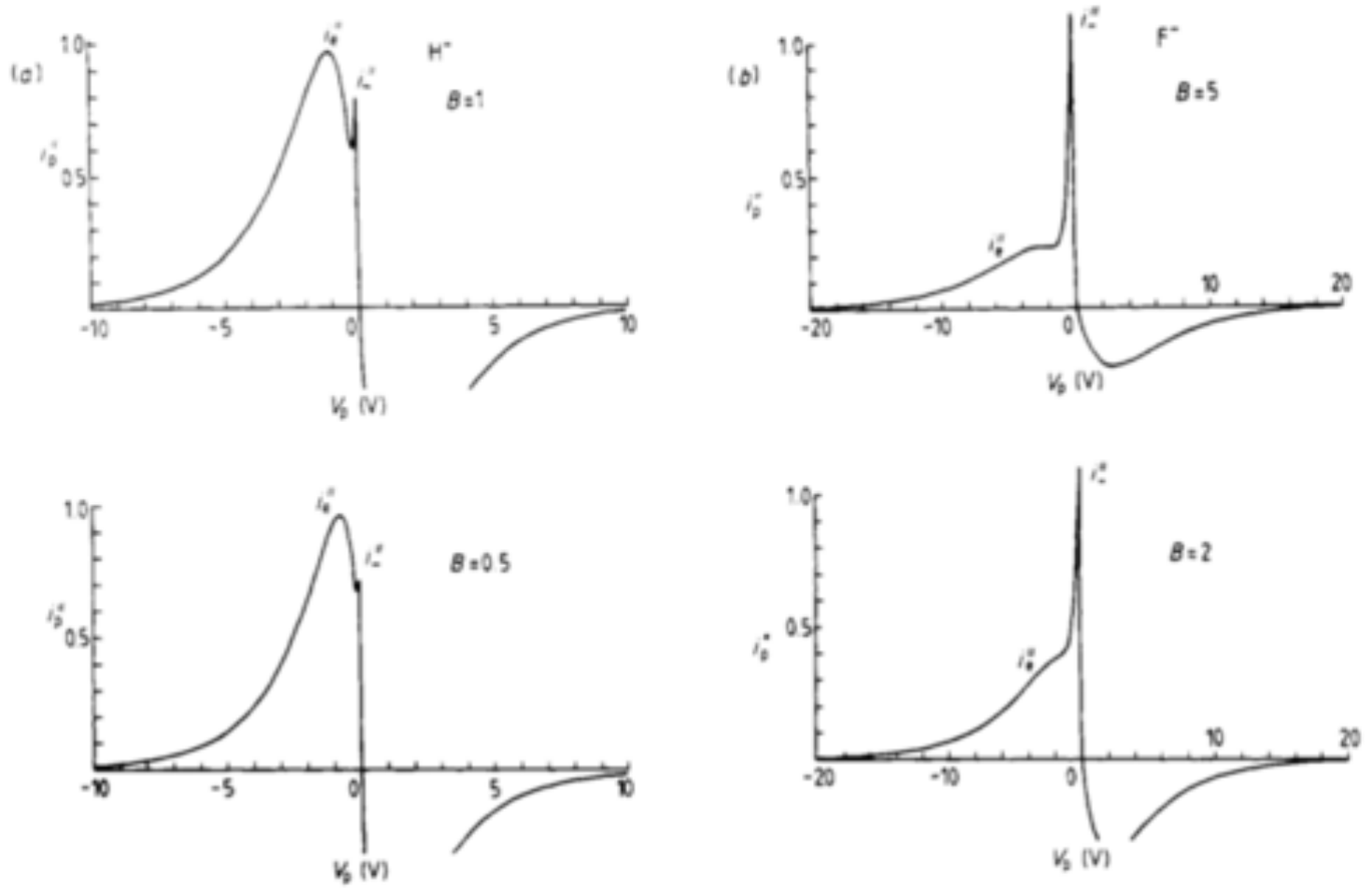
## Dispositif Réseau Plasmas Froids







H. Amemiya, I., J. Phys. D. Appl. Phys., vol. 23, no. 8, (1990) pp. 999-1014



**Figure 9.** Curves simulating the second derivative demonstrating electron and negative ion peaks in  $H_2$  and  $SF_6/Ar$  plasmas.

# Bibliographie

Morphologie

Théorie

FDEE

Circuits de mesures

Plasmas R.F.

Photodét.

Pulsé

Exemples

Dispositifs expérimentaux

Bibliographie

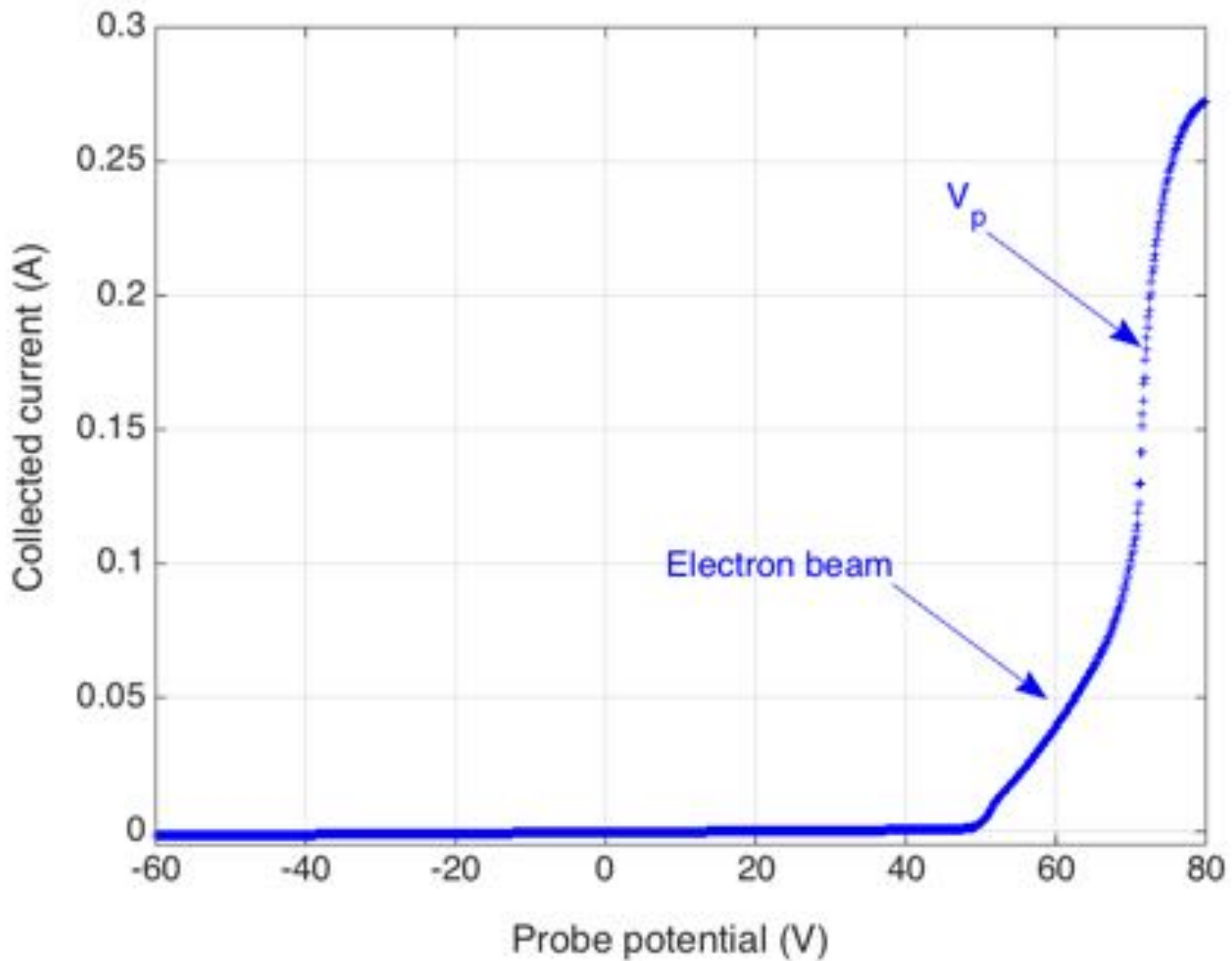
- 1 M. J. Druyvesteyn :Z. Phys. 64 (1930) p. 790.
- 2 K. Ohe, T. Kimura, 'Time-resolved electron energy distribution function in time varying weakly ionized plasmas', Japanese Journal of Applied Physics, 28 (10) (1989), pp. 1997-2003
- 3 F. Fujita, H. Yamazaki, 'Determination of electron energy distribution function of plasmas by digital processing from Langmuir probe characteristic', Japanese Journal of Applied Physics, 29 (10) (1990), pp. 2139-2144
- 4 T. Kimura, A. Y. Yonega, K. Ohe, 'Detection of EEDF by finite impulse response filter', Japanese Journal of Applied Physics, 30 (8) (1991), pp. 1877-1881
- 5 T. Kimura, K. Ohe, 'Electron energy distribution function in fluctuating plasmas', Japanese Journal of Applied Physics, 30 (4) (1991), pp. 848-853
- 6 U. Kortshagen, H. Schlüter, A. Shivarova, 'Determination of electron energy distribution functions in surface wave produced plasmas: I. Modeling', J. Phys. D : Appl. Phys. 24 (1991) pp. 1571-1584.
- 7 U. Kortshagen, H. Schlüter, A. Shivarova, 'Determination of electron energy distribution functions in surface wave produced plasmas: II. Measurements', J. Phys. D : Appl. Phys. 24 (1991) pp. 1585-1593.
- 8 V. A Godyak, R. B. Piejak, B. M. Alexandrovich. 'Measurements of electron energy distribution in low-pressure RF discharges', Plasma Sources Sci. Technol. 1 (1992) pp 36-38.
- 9 U. Kortshagen, H. Schlüter, 'On the influence of Coulomb collisions on the electron energy distribution function of surface wave produced argon plasmas', J. Phys. D : Appl. Phys. 25 (1992) pp. 644-651.
- 10 S. Grosse, H Schlüter et E. Tatarova, 'Axial dependence of the electron energy distribution fonction in microwave discharge sustained by propagating surface waves', Physica Scripta Vol. 50, pp 532-539 (1994).
- 11 U. Kortshagen, A. Shivarova, E. Tatarova et D. Zamfirov, 'Electron energy distribution function in a microwave discharge created by propagating surface waves', J. Phys. D : Appl. Phys. 27 (1994) pp. 301-311.
- 12 R. R. Arslanbekov, N. A. Khromov, A.A. Kudryavtsev, 'Probe measurements of electron energy distribution function at intermediate and high pressures and in a magnetic field', Plasma sources sci. Technol. 3 (1994) pp 528-538.
- 13 C. A. Anderson, W. G. Graham, 'Temporally and spatially resolved plasma parameters and EEDF measurements in a low-frequency discharge', Plasma Sources Sci. Technol. 4 (1995) pp 561-570.
- 14 E. Tatarova and D. Zamfirov, 'A radially resolved experimental investigation of the electron energy distribution function in a micro-wave discharge sustained by propagating surface waves', J. Appl. Phys. 28, (1995) pp. 1354-1361.
- 15 J. I. F. Palop, J. Ballesteros, V. Colomer, M.A. Hernandez, 'A new smoothing method for obtaining the electron energy distribution function in plasmas by the numerical differentiation of the I-V probe characteristic', Rev. Sci. Instrum. 66 (9) (1995) pp. 1-12
- 16 D. Ruscanu, G. Popa, V. Anita, V-D. Hodoroaba, 'Probe method in the approximation of two Maxwellian groups of electrons', Romanian Reports in Physics, 49 (5-6-7) (1997) pp. 491-501
- 17 E. Stamate, G. Popa, K. Ohe, 'Test function for the determination of plasma parameters by electric probes', Rev. Sci. Instrum. 70 (1) (1999) pp. 58-62
- 18 L. Sirghi, K. Ohe, G. Popa, 'Electron kinetics of ionization waves in helium positive columns', Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999), pp. 5221-5255
- 19 L. A. Jacobson, 'A fast data smoothing algorithm', Comput. Phys. , (1990), pp.400-402
- 20 H. C. Hayden, 'Data smoothing routine', Comput. Phys. 1 (1), 74 (1987), pp. 74-75.
- 21 C. D. Taylor, D. P. Nicolas, 'An adaptative data-smoothing routine', Comput. Phys. 3 (2), 63 (1989), pp. 63-64
- 22 C. M. Ferreira, L. L. Alves, M. Pinheiro, A. B. Sa, 'Modelling of low-pressure microwave discharges in Ar, He and O2 : similiary laws for the maintenance field and mean power transfer', IEEE Trans. Plasma Sci. 19, 229 (1991)
- 23 L. Oksuz, N. St. Braithwaite, 'Time resolved retarding field energy analyser for ions and electrons', 16th ESCAMPIG Conf. (2002), pp.299-300
- 24 Popov
- 25 V. Godyak, Measuring EEDF in Gas Discharge Plasmas, review in NATO ASI Series, E. Appl. Sci., V. 176, Plasma Surface Interaction and Processing of Materials, pp. 95-134, Kluwer, Acad. Publisher, 1990
- 26 V. Godyak and V. Demidov, Probe Measuring of Electron Energy Distribution in Plasmas: What Can We Measure and How Can We Achieve Reliable Results?, review to be published in J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 233001, 2011
- 27 J. D. Swift, M. J. R. Schwar, Electrical Probes for Plasma Diagnostics, Ilife Books Ltd - London (1970)
- 28 T. E. Sheridan, J. Goree, Physical review E, 50 (4) (1994) 2991-2996
- 29 N. Hershkowitz, M. H. Cho, J. Vac. Sci. Technol. A 6 (1988) 2054-2059
- 30 J. G. Laframboise, J. Rubinstein, Phys. Fluids. 19, 12 (1976) 1900-1908
- 31 J. Rubinstein, J. G. Laframboise, Phys. Fluids. 21, 9 (1978) 1655-1656
- 32 J. G. Laframboise, L. J. Sonmor, J. Geophys. Res. 98 (1993) 337-357
- 33 J. Rubinstein, J. G. Laframboise, , Phys. Fluids. 26, 12 (1983) 3624-3627
- 34 J. Rubinstein, J. G. Laframboise, Phys. Fluids. 25, 7 (1982) 1174-1182

**Merci pour votre attention !**

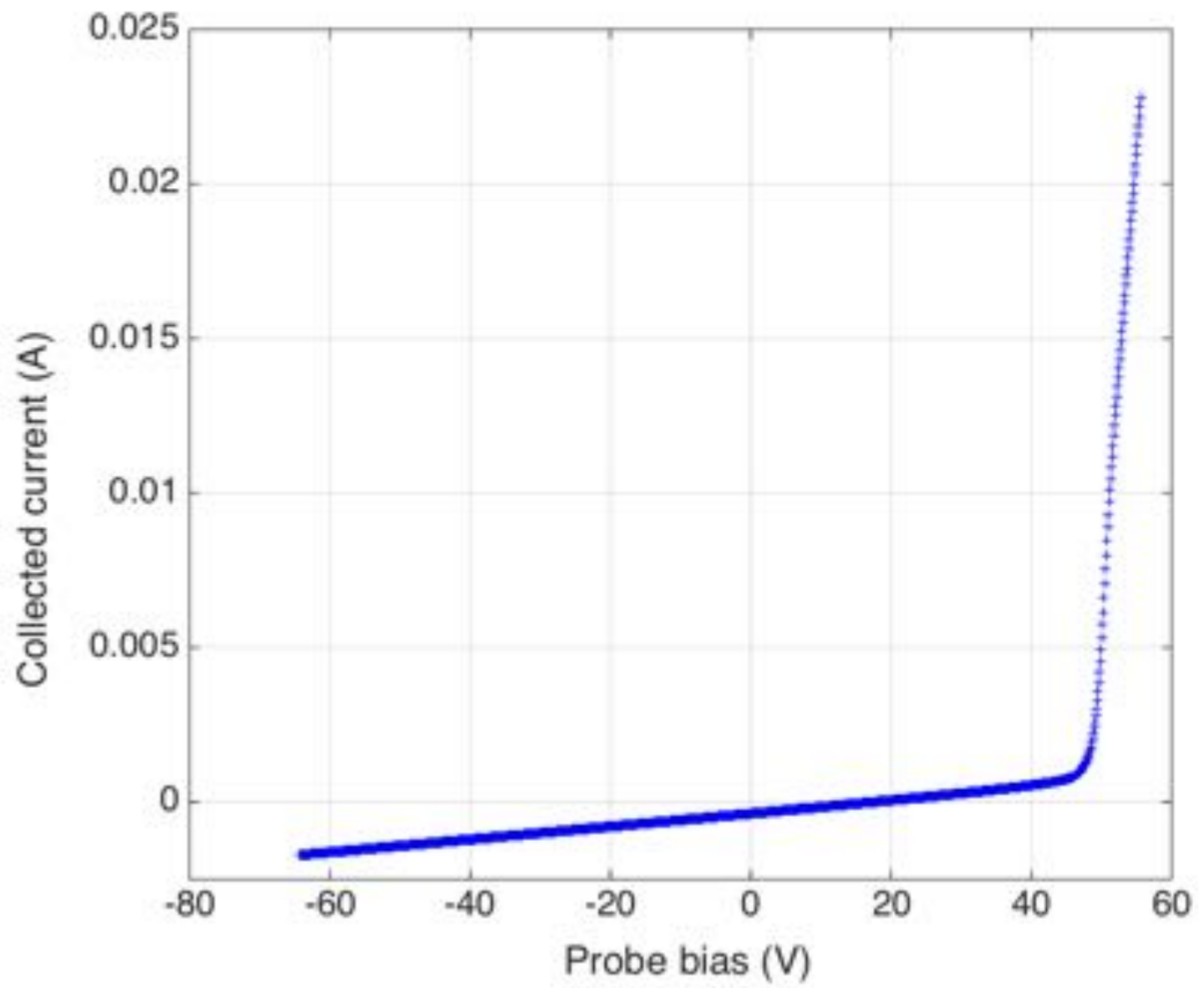
... vos questions et le TP cet après midi autour du dispositif de mesures Que-Do ...

Mon adresse e-mail pour d'autres échanges :  
[bechu@lpsc.in2p3.fr](mailto:bechu@lpsc.in2p3.fr)

# Exemples récents



# Exemples récents



# Analyseurs E × B

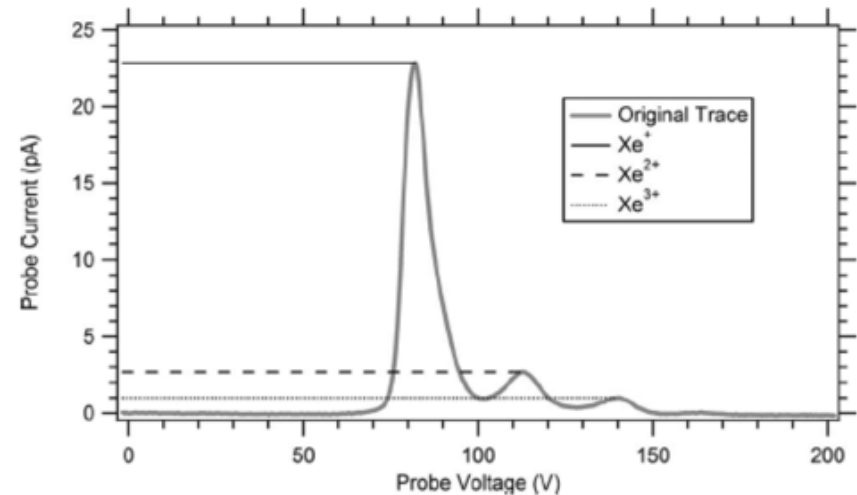
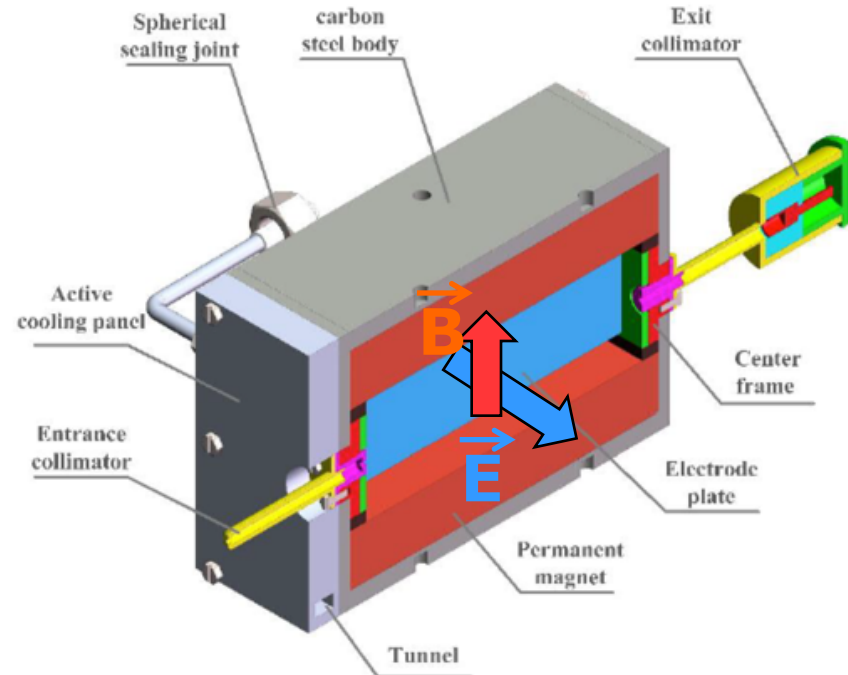
## ■ Avantages

- Directionnel
- Collecteur à un faible potentiel
- Bonne à très bonne résolution en énergie
- Discrimination  $\text{Xe}^+$  et  $\text{Xe}^{2+}$

## ■ Inconvénients

- Encombrement  $\approx 10$  cm
- Transparence difficile à apprécier
- Peu de modèles commerciaux

## ■ Faisceaux d'ions



# Analyseurs à grilles

## ■ Avantages

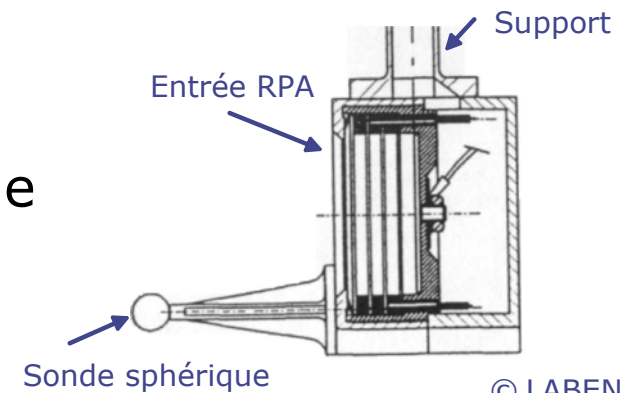
- Directionnel
- Collecteur à un faible potentiel
- Bonne à très bonne résolution en énergie

## ■ Inconvénients

- Diamètre minimum  $\approx 10$  mm
- Transparence des grilles difficile à apprécier
- Peu de modèles commerciaux
- Pas de discrimination de la charge  $Xe^+ = Xe^{2+}$

## ■ Plasmas naturels (satellites)

## ■ Faisceaux d'ions





# Hairpin probe

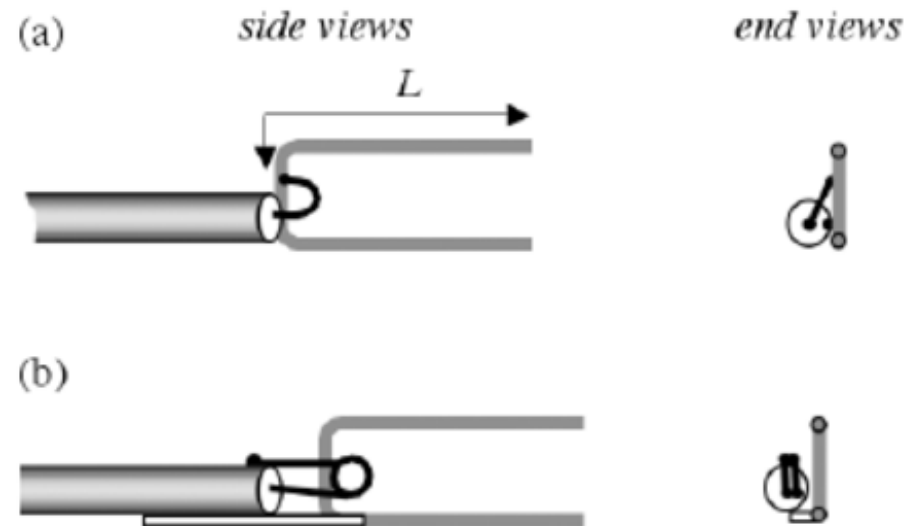
- **Avantages**

- Microwave resonator

$$n/10^{16} \text{ m}^{-3} = \frac{(f_r/\text{GHz})^2 - (f_0/\text{GHz})^2}{0.81}$$

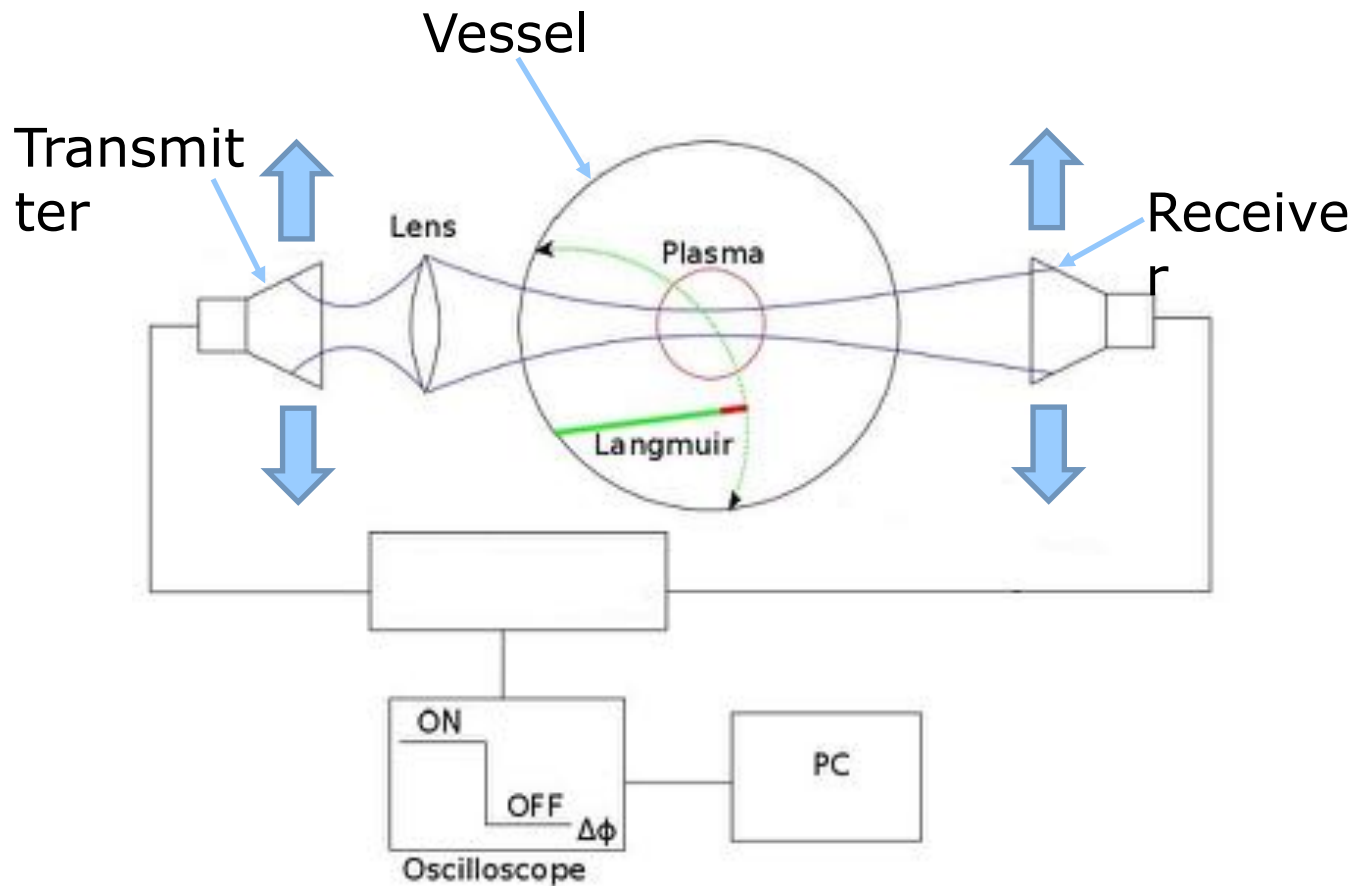
- **Inconvénients**

- Large zone investiguée 10 mm
- Pas de mesure de  $T_e$



**Figure 1.** Schematics of the hairpin probes: (a) dc coupled and (b) fully floating.

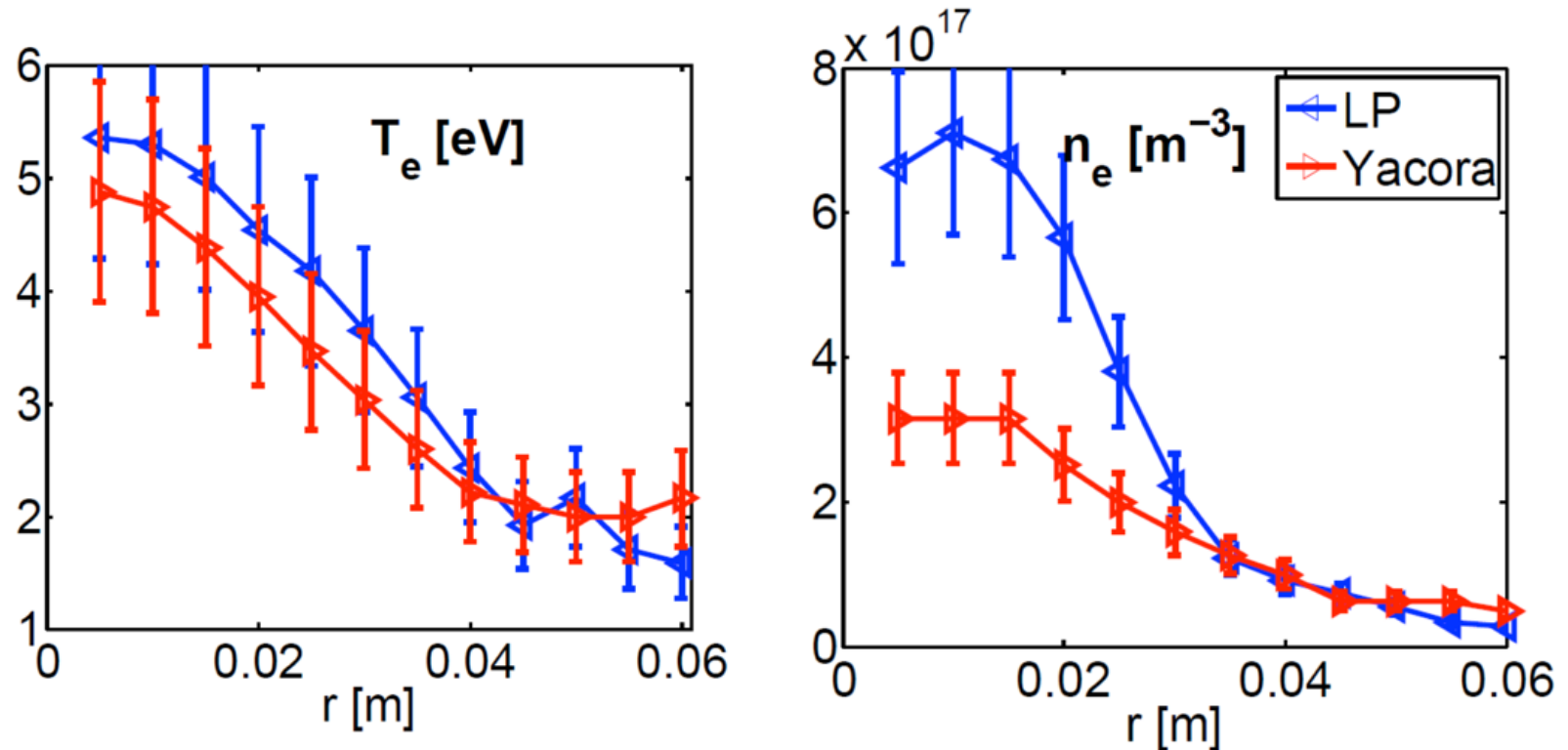
# Interférométrie micro-onde



*The 100 GHz heterodyne interferometer scheme*

# Langmuir probe results vs. Yacora collisional-radiative model

Yacora model is developed by D. Wundelich et al. (Quant. Spectros. Radia. Transfer 110, 62-71 (2009))



A. Simonin et al., *Negative ion source development for a photoneutralization based neutral beam system for future fusion reactors*, accepted for publication in NJP

# Sonde ionique

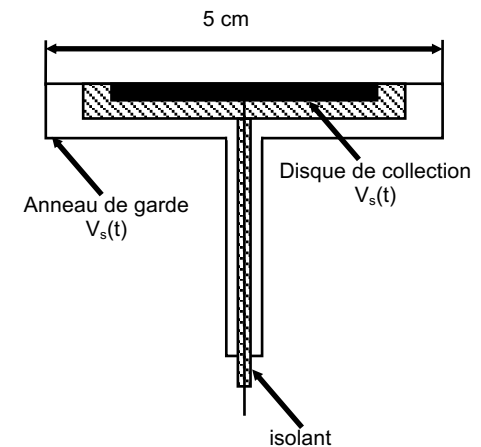
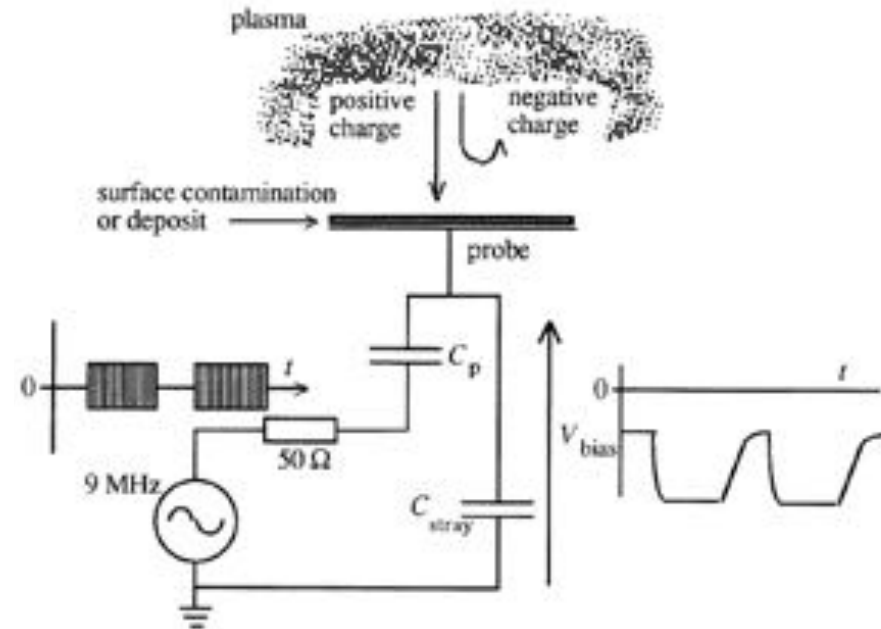
Sonde ionique Flux :  $\Gamma_i$

- $q(t) = C \times u(t)$
- $i(t) = -dq(t)/dt$
- $i(t) = e \times A_s \times \text{Flux dirigé}$



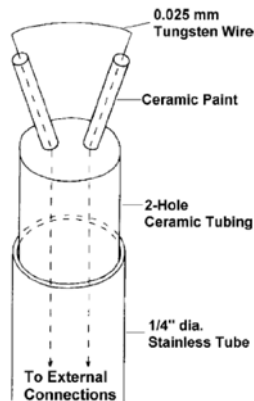
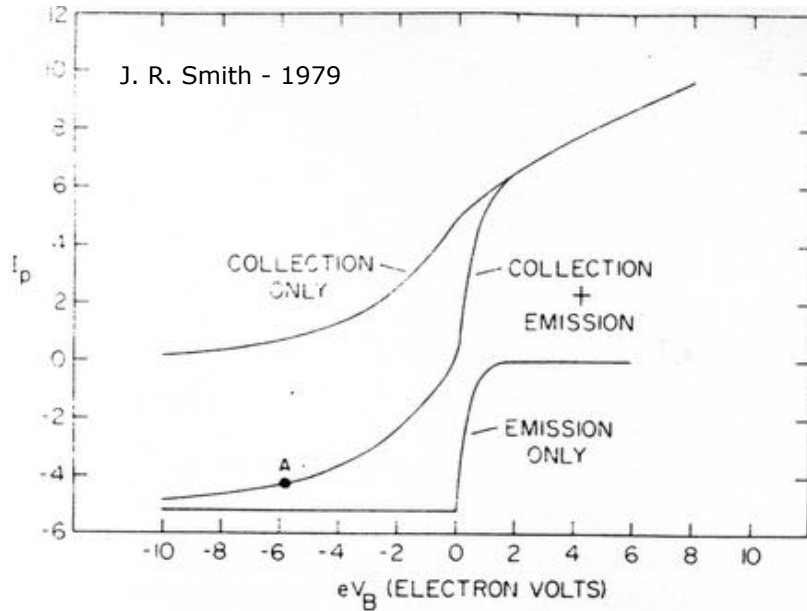
$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{eS(\Gamma_i - \Gamma_e(V_s))}{C_s}$$

La partie linéaire de la courbe  $V_s(t)$  permet d'accéder à  $\Gamma_i$

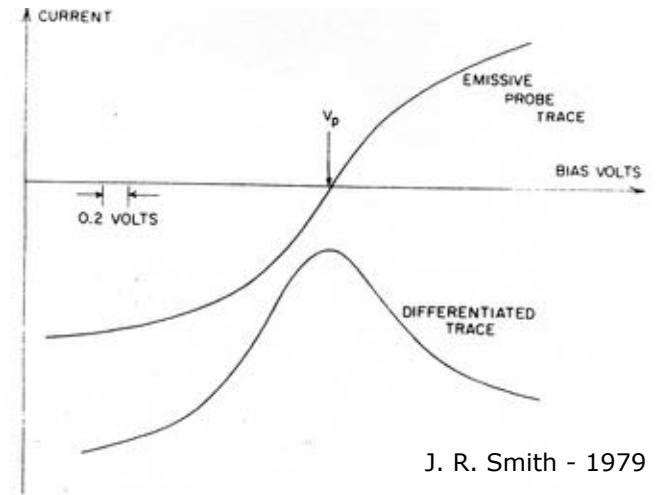


# Sonde émissive

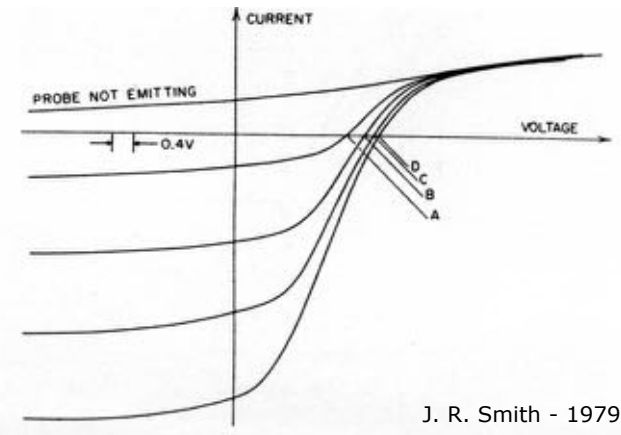
## Allure des courants collectés par une sonde émissive



N. Hershkowitz,  
Physics of Plasmas  
**12**, 055502 (2005)



Détermination de  $V_p$ , Méthode #1



Détermination de  $V_p$ , Méthode #2

# Rappels – Température – énergie – vitesse

La température s'exprime en Kelvin or  $T_e = 2 \text{ eV}$ , par exemple !

□ Bien sur : 
$$\frac{k_b}{q} T_e (K) = T_e (eV)$$

- Toutefois la température ne représente que **2/3** de l'énergie moyenne d'agitation thermique du plasma qui est donnée par la relation :

$$U_{th} = \frac{3}{2} (n_{eo} + n_{io}) k_b T_e$$

- Ainsi le plasma se rapproche d'un gaz parfait pour lequel la pression  $p$ ,  $p = nk_b T$  et  $p = 1/3 n m u^2$ , et ce, même si  $T_e \neq T_i$

Applications :

- Pour une température de 1eV, l'énergie d'agitation thermique est de 1,5eV
- Pour une différence de potentiel de 1V, ou une température de 1eV, la vitesse acquise est donnée par  $0,5 m_e v^2 = qV$

# Rappels – Fonction de distribution maxwellienne

A l'équilibre, en l'absence de gradients et de force extérieures, l'équation de Boltzmann pour les électrons se réduit à :

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0$$

$f(r, w, t) = f(w)$  est la fonction de distribution des électrons au temps  $t$  dans l'espace des phases  $(r, w)$  :  $r$  position et  $w$  vitesse microscopique des électrons

Distribution des vitesses en l'absence de champ extérieur (sans dérive)

Ce qui rend la fonction maxwellienne pour les électrons dans un plasma froid hors ETL : les collisions ! électrons / électrons

Le système même si il n'est pas en équilibre thermodynamique complet doit avoir pour ses composants un équilibre partiel

□ Une dimension

$$f(w) = \left[ \frac{m_e}{2\pi k_b T_e} \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left( -\frac{m_e w^2}{2k_b T_e} \right)$$

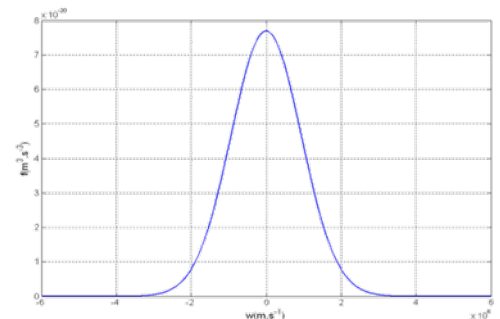
□ Trois dimensions

$$f(w) = \left[ \frac{m_e}{2\pi k_b T_e} \right]^{\frac{3}{2}} \exp \left( -\frac{m_e w^2}{2k_b T_e} \right)$$

Conditions de normalisation

□ à l'unité  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(w) d^3w = 1$

□ à  $n_0$   $\int_{-\infty}^{+\infty} f(w) d^3w = n_0$



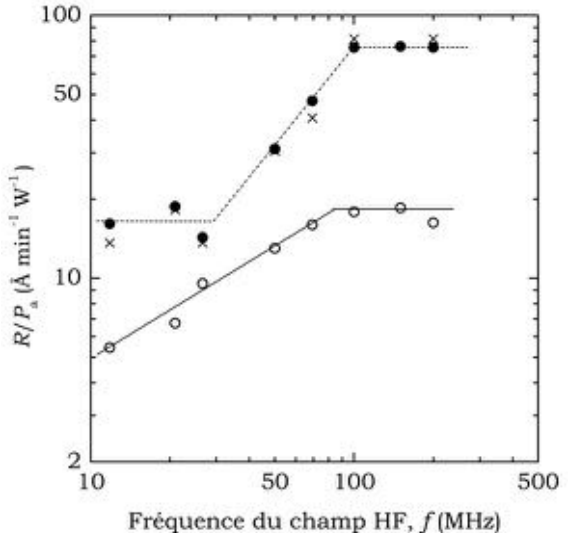
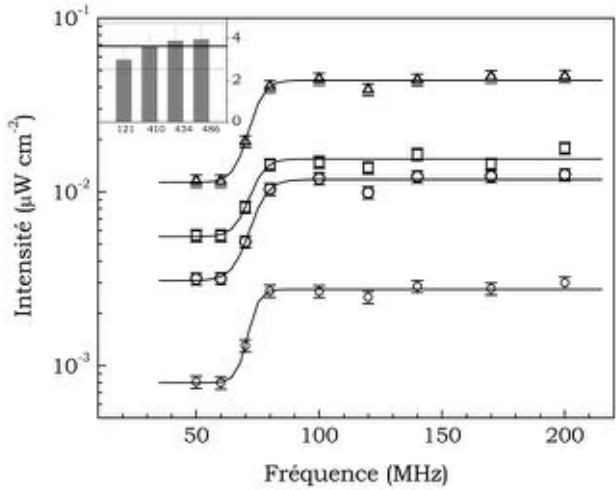
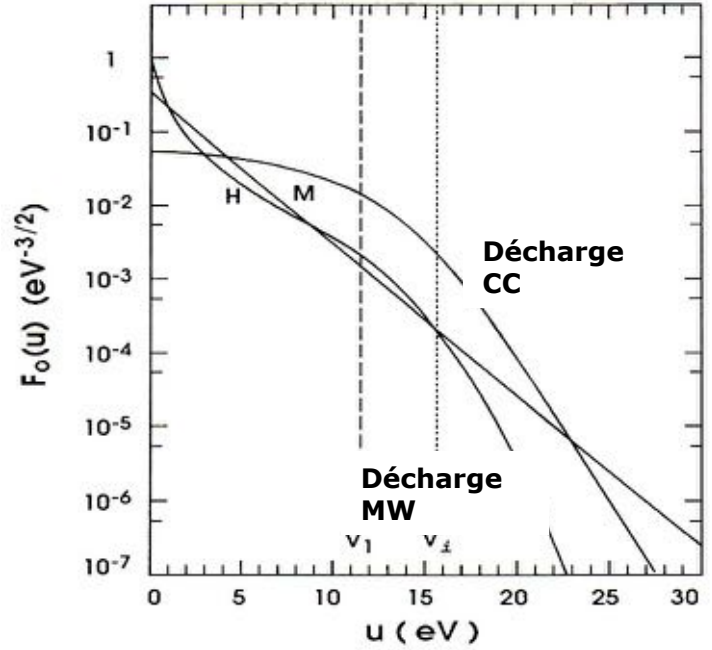
$$f(w) = \left[ \frac{m_e}{2\pi k_b T_e} \right]^{\frac{3}{2}} \exp \left( -\frac{m_e (w - w_{drift})^2}{2k_b T_e} \right)$$

# Rappels – Fonction de distribution et fréquence d'excitation

- FDEE stationnaire SI la fréquence caractéristique de transfert d'énergie entre électrons et particules lourdes  $\nu_u$  est inférieure à la fréquence d'excitation  $\omega$

$$\nu_u(u) \equiv \frac{2m_e}{M} \nu_m(u) + \sum_j \nu_j(u)$$

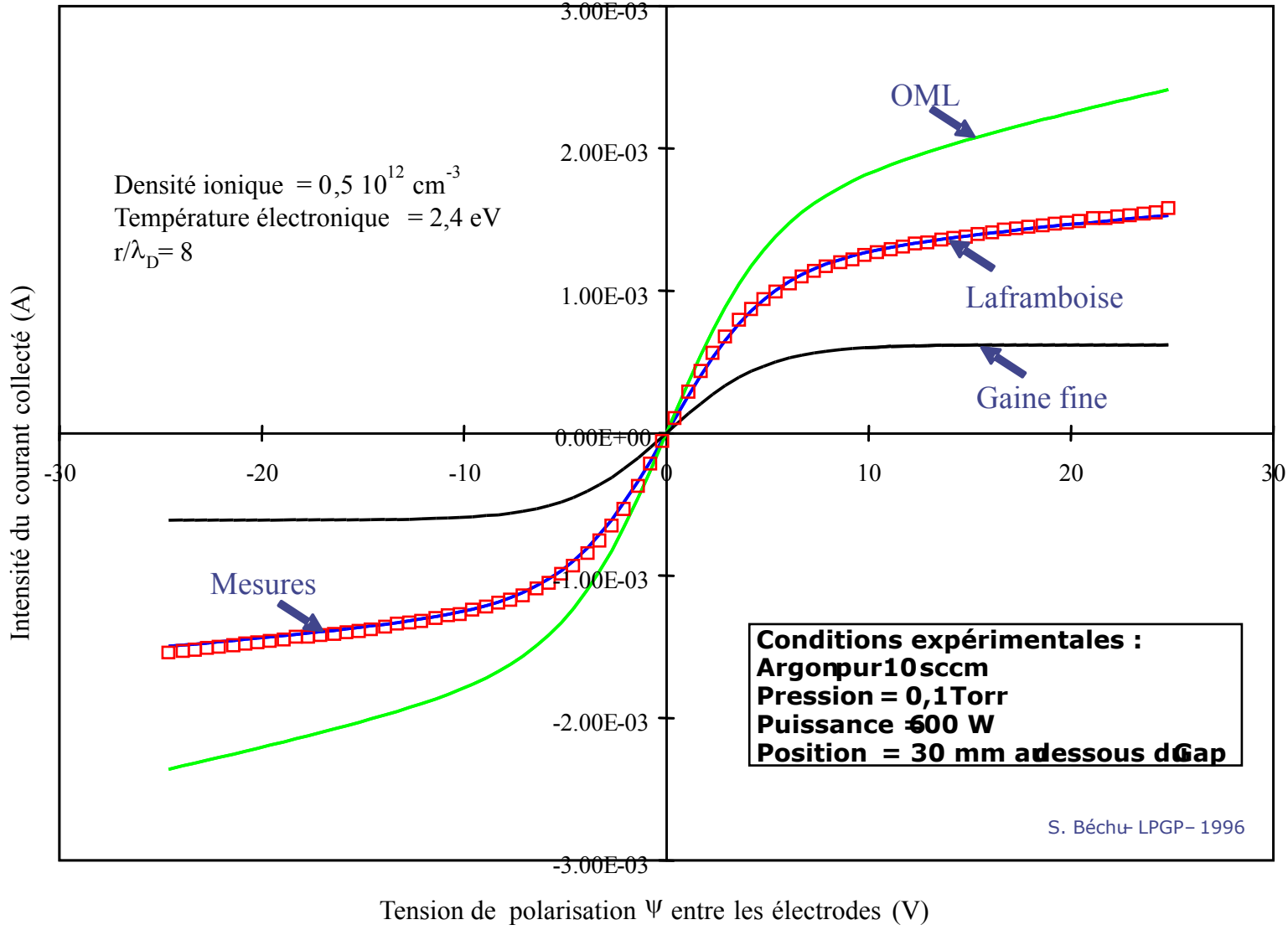
- SI  $\nu_u \gg \omega$  alors la FDEE oscille totalement ou partiellement avec le champ HF



J. Pelletier, M. Moisan, Physique des plasmas collisionnels EDP sciences 2006

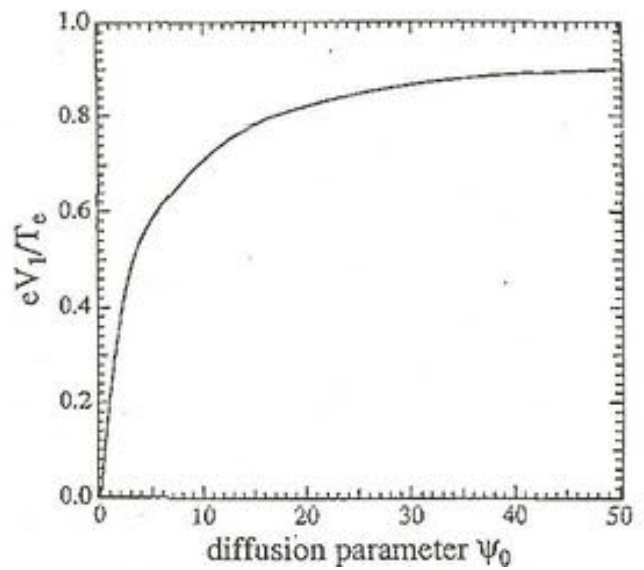


# Courbe de sonde double symétrique

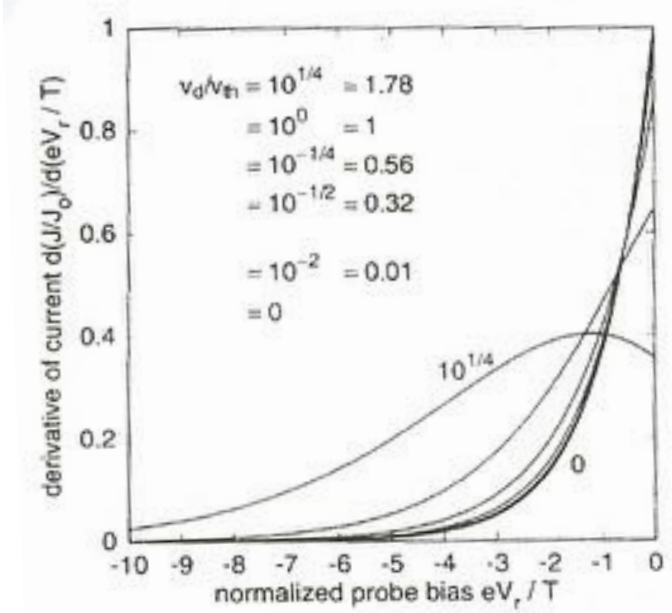


# Modification du potentiel plasma ( $V_p$ ) par un champ B

La valeur du potentiel plasma et donc tous les paramètres plasma sont affectés par la présence d'une vitesse de dérive et / ou d'un champ magnétique



Arslanbekov *et al.* PSST (1994)



Sheridan *et al.* PhysRevE (1994)

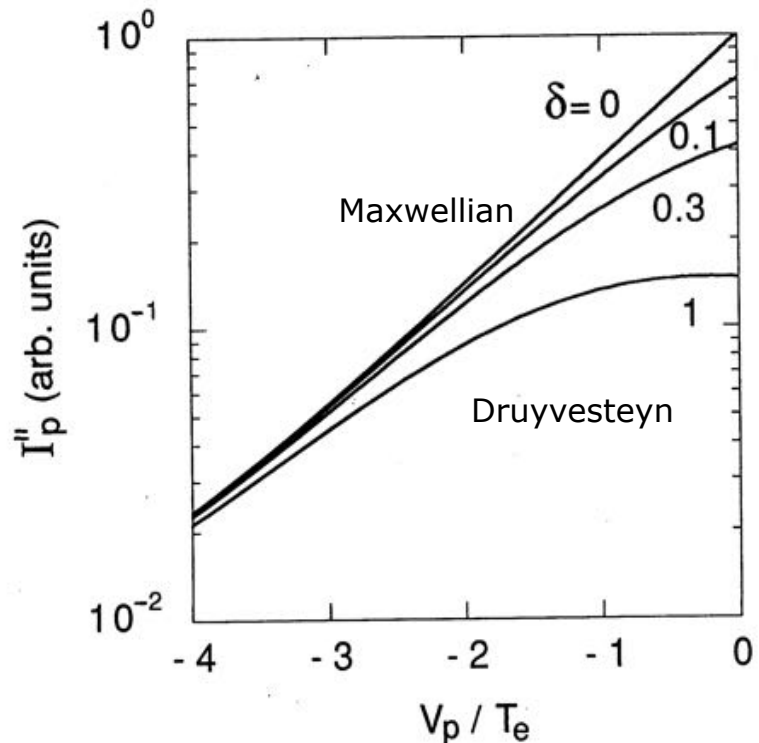
# Méthodes de mesures – Circuit de mesure

Modification de la FDEE par la résistance de mesure

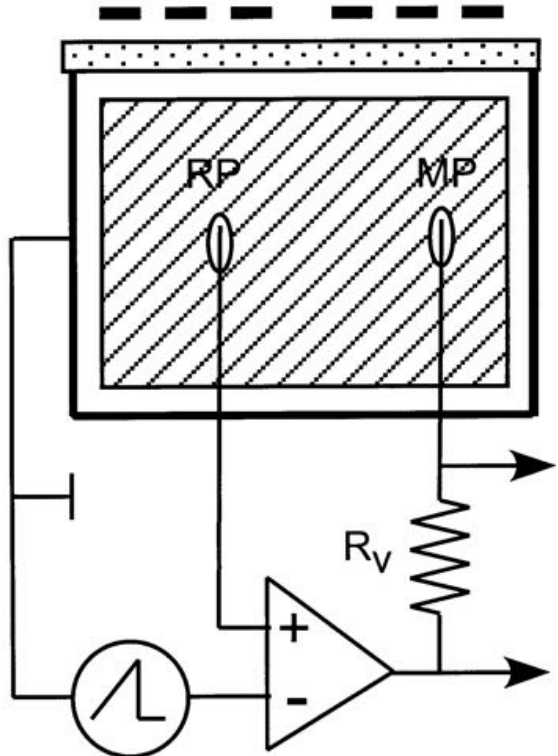
$$\delta = R_{ext+int} / R_{plasma}$$

$$R_{ext+int} = R_{sonde} + R_{dépôt} + \dots$$

$$R_{plasma} = T_e / qI_e sat$$



Montage différentiel de compensation de la résistance interne et des basse fréquences



V. Godyak et al, PSST 11, 525, 1002

Une erreur de moins de 3% sur la mesure de la FDEE nécessite un rapport  $\delta = R_{ext+int} / R_{plasma} < 0.01$  !

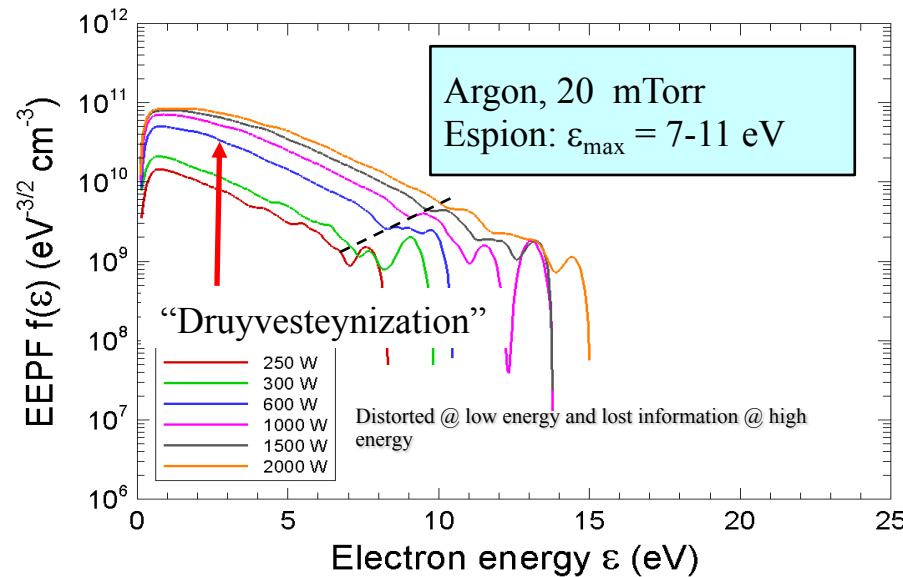
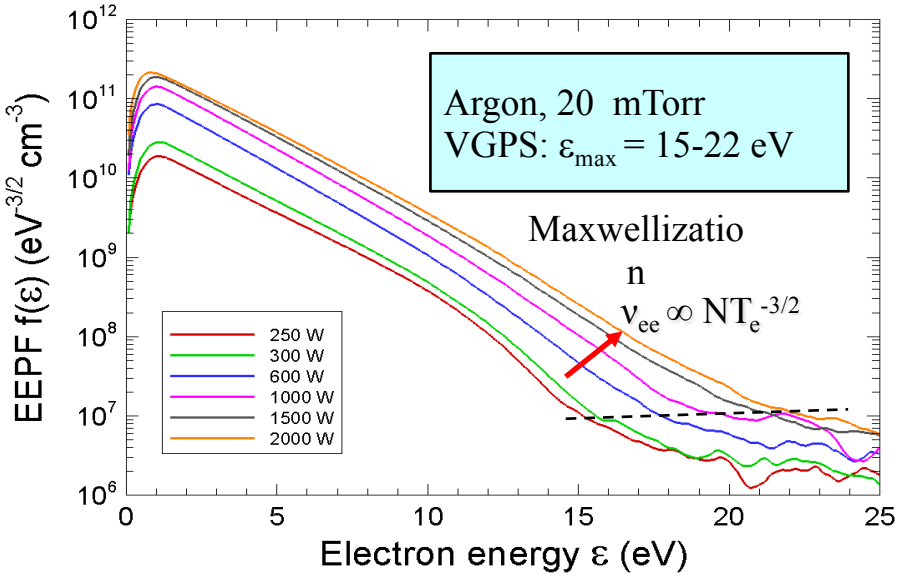


# Dispositifs commerciaux

Comparison of EEPF measured with different commercial probe stations, Espion of Hiden and VGPS of Plasma Sensors

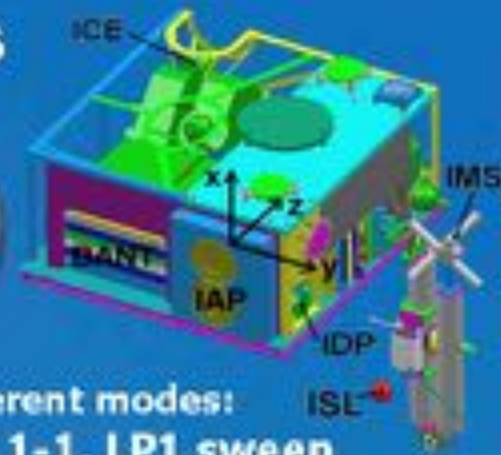
At maximal discharge power of 2 kW,  $N \approx 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , thus the EEPF @  $\epsilon < \epsilon^*$  has to be a Maxwellian one

“Druyvesteynization” effect is found in many publications of EEDF measurements made with home-made and commercial probe systems



V. Godyak et al, GEC 2009, Saratoga Springs, NY, USA

# ISL Langmuir Probes



- Different modes:
- ISL1-1, LP1 sweep
  - ISL1-2, LP1 offset sweep
  - ISL1-3, LP1 vs. LP2
  - ISL2, LP2 & LP1 sweep
  - ISL3, surface control

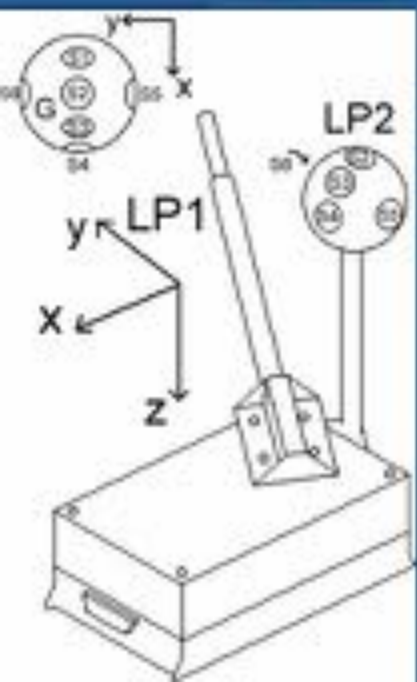
**LP - 2**

Sphere  $\varnothing$  4 cm  
six segments of  $\varnothing$  1 cm

**LP - 1**

Diamètre: 6 mm

Longueur: 5 cm



# Dispositif expérimental – Mesures des instabilités azimuthales

Thèse Stella OLDENBURGER, Université Henri Poincaré, Nancy I (2010)

