

# Sondes électrostatiques

## Mesures résolues en temps

(et autres considérations pratiques)

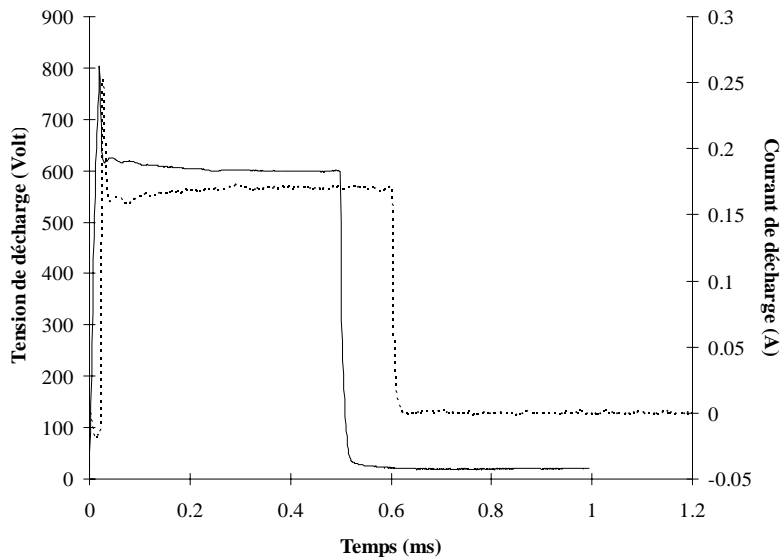
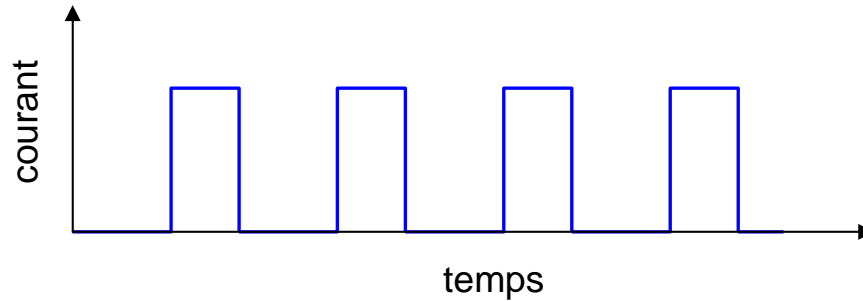
Gérard HENRION

Laboratoire de Sciences et Génie des Surfaces  
(UMR CNRS 7570)

Institut National Polytechnique de Lorraine  
Ecole des Mines  
Parc de Saurupt  
Nancy

# QUEL EST LE PROBLEME ?

## Plasma variable dans le temps (pulsé)



## Evolution des paramètres

- ✓  $V_p ; V_f$
- ✓ *Densité électronique*
- ✓ *Température électronique*
- ✓ *Fonction de distribution en énergie*
- ✓ *etc...*



En particulier pendant les transitoires



Acquisition (très) rapide de la caractéristique de sonde  
(cf Pascal Lasgorceix)

**OUI ... MAIS ...**

Question n° 1 : sur quelle échelle de temps ?

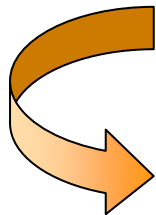
Question n° 1' : durée de l'acquisition ?

100  $\mu$ s ?                      1 s ?                      1 ms ?  
1  $\mu$ s ?                      100 ms ?  
10  $\mu$ s ?                      10 ms ?

**Question n° 2 : cette durée est-elle compatible avec le phénomène que je cherche à étudier ?**

**certains phénomènes se produisent sur des durées de l'ordre de qqs 10's  $\mu$ s**

**Question n° 3 : cette durée est-elle compatible avec la physique de la décharge ?**



**plasma non évolutif pendant l'acquisition du point de mesure**

**les gaines doivent avoir le temps de répondre à la modification de tension appliquée à la sonde**



**fréquence d'échantillonnage < fréquence plasma ionique**

$$T_{\text{acq}} > T_{\text{rep}}^{\text{ion}} \gg T_{\text{rep}}^{\text{é}}$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_{pi} &= \sqrt{\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 m_i}} \\ f_{pi} &= \frac{\omega_{pi}}{2\pi} \end{aligned} \right\} \text{SI}$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_{pi} &= \sqrt{\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 m_i}} \approx 1320 \sqrt{\frac{n_i}{M_i}} = 10 * 11 * 12 * \sqrt{\frac{n_i}{M_i}} \\ f_{pi} &= \frac{\omega_{pi}}{2\pi} \approx 210 \sqrt{\frac{n_i}{M_i}} \end{aligned} \right\} \begin{matrix} n_i \text{ (cm}^{-3}\text{)} \\ M_i \text{ (uma)} \end{matrix}$$

**Exemple** : plasma Ar ( $M_i = 40$ ) ; densité  $n_e = n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$$f_{pi} \approx 210 \sqrt{\frac{n_i}{M_i}} \approx 3.3 \text{ MHz} \qquad T_{\text{rep}}^{\text{ion}} \approx 0.3 \mu\text{s}$$

Echantillonnage de la caractéristique de sonde sur 256 points

$$\text{durée minimale d'acquisition : } 256 * 0.3 = 76.8 \mu\text{s}$$



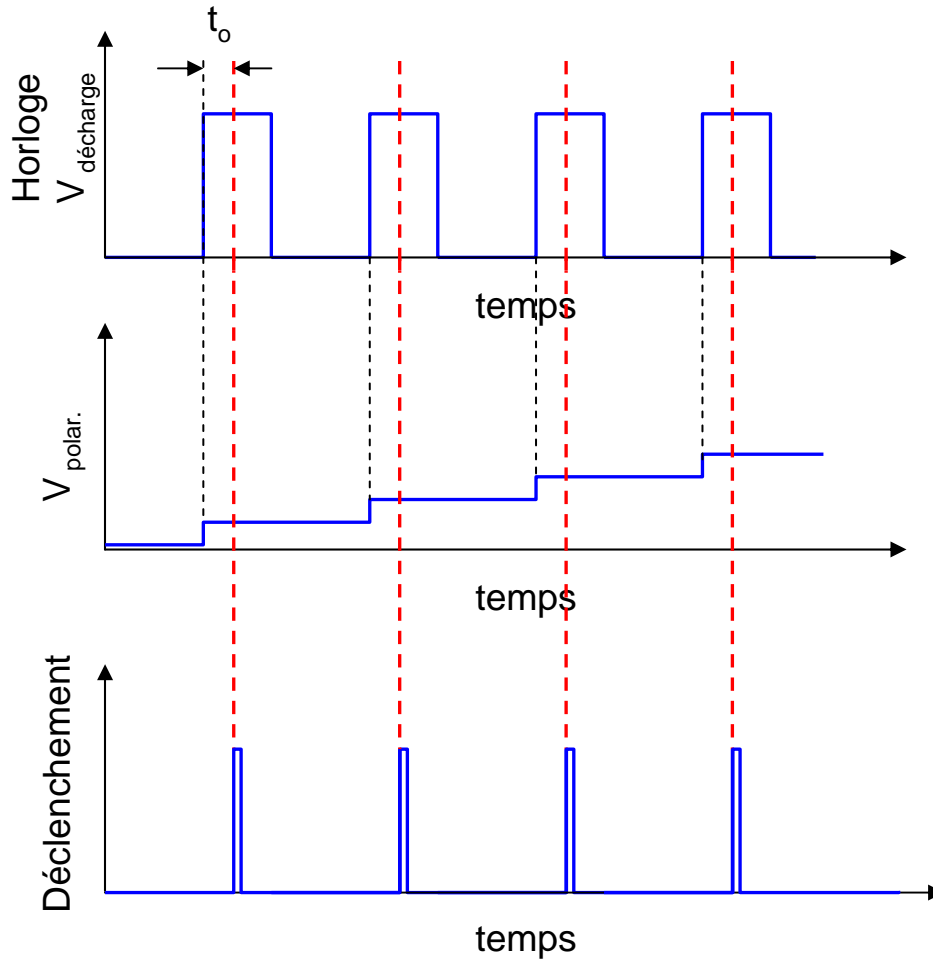
**Il peut s'en passer des choses pendant tout ce temps !!**

Gaz M n (cm <sup>-3</sup> )	H <sub>2</sub> 2	He 4	N <sub>2</sub> 28	O <sub>2</sub> 32	Ar 40	Xe 132
10 <sup>8</sup>	120	245	650	690	770	1400
10 <sup>9</sup>	38	77	200	220	245	440
10 <sup>10</sup>	12	24.5	65	69	77	140
10 <sup>11</sup>	3.8	7.7	20	22	24.5	44
10 <sup>12</sup>	1.2	2.5	6.5	6.9	7.7	14

Durée (μs) minimale d'acquisition d'une caractéristique de sonde sur 256 points pour différents gaz et différents plasmas

# UNE SOLUTION

Acquisition des points de mesure de manière synchrone avec le plasma pulsé



Choix d'un instant donné  $t_0$  par rapport à la période du plasma pulsé

A chaque période, incrémentation de la tension de polarisation de la sonde de  $\Delta V$

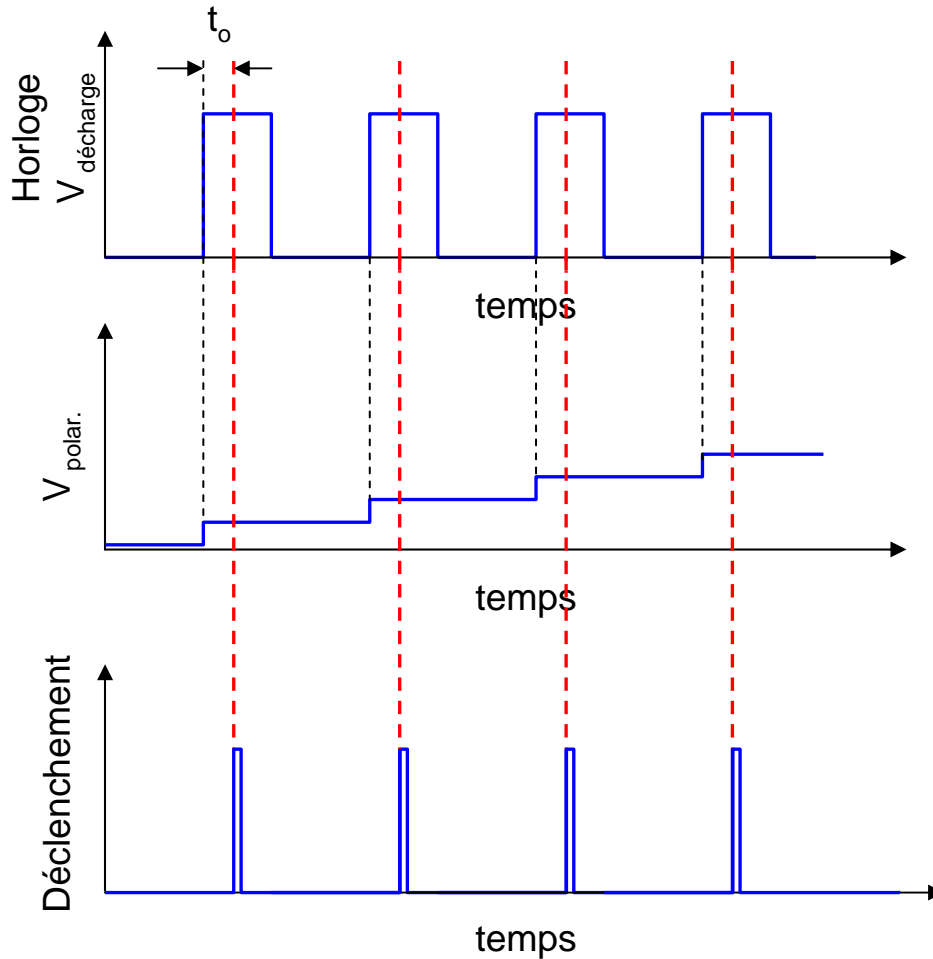
A chaque valeur de  $V_{\text{polar}}$  Une impulsion (trigger) déclenche la mesure à l'instant choisi

Caractéristique complète

$t_0 \longrightarrow t_0 + \tau$

# UNE SOLUTION

Acquisition des points de mesure de manière synchrone avec le plasma pulsé

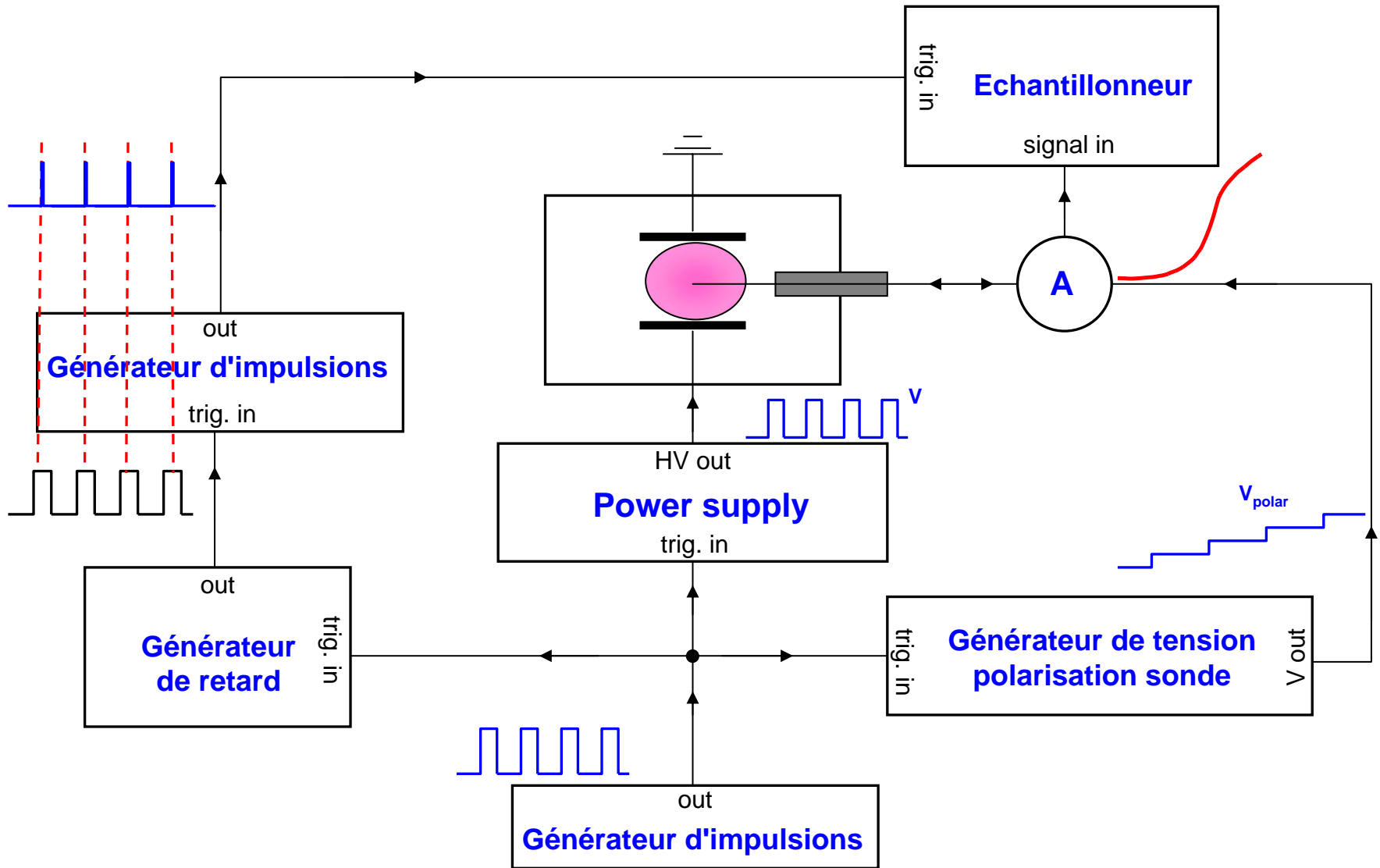


**Hypothèse sous-jacente**

**le plasma est identique d'une période à la suivante**



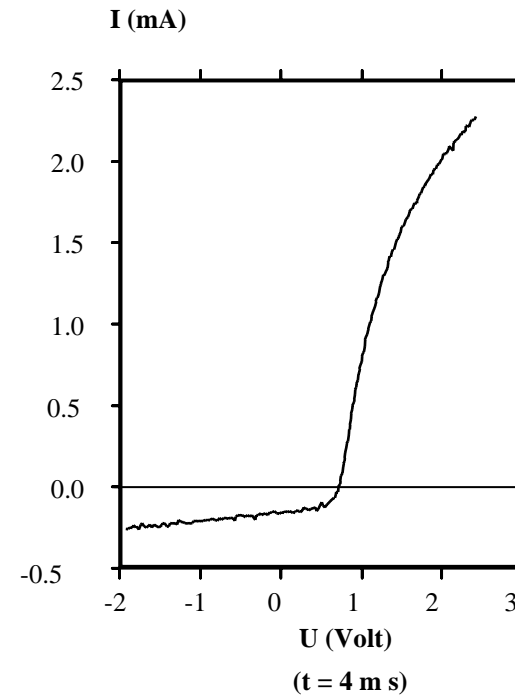
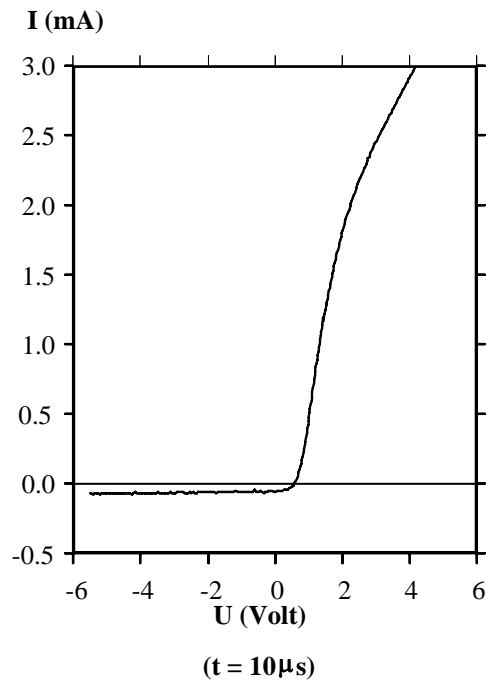
Pratiquement, comment ça marche ?



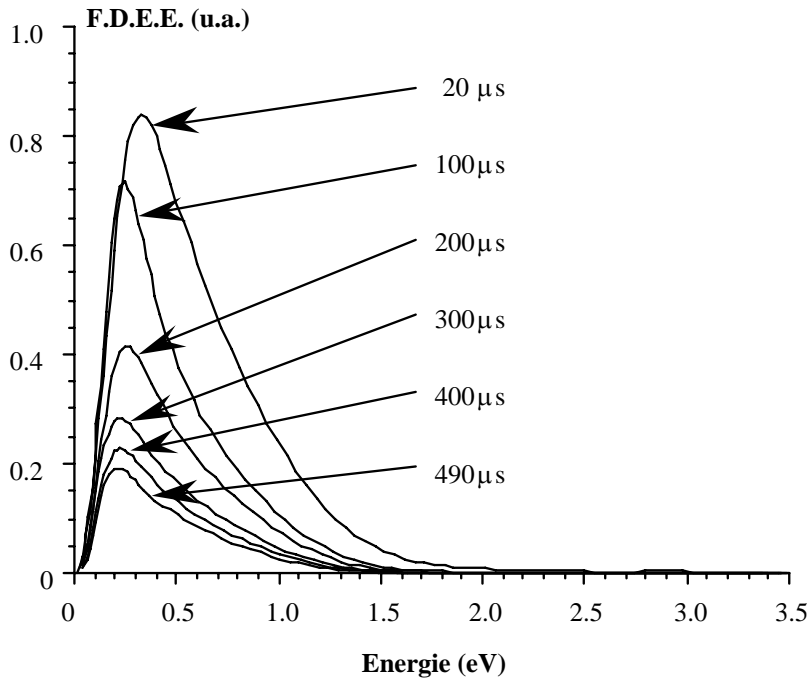
# QUELQUES EXEMPLES

(issus de la thèse de R. Hugon 1994  
décharge N<sub>2</sub> diode DC pulsée basse fréquence)

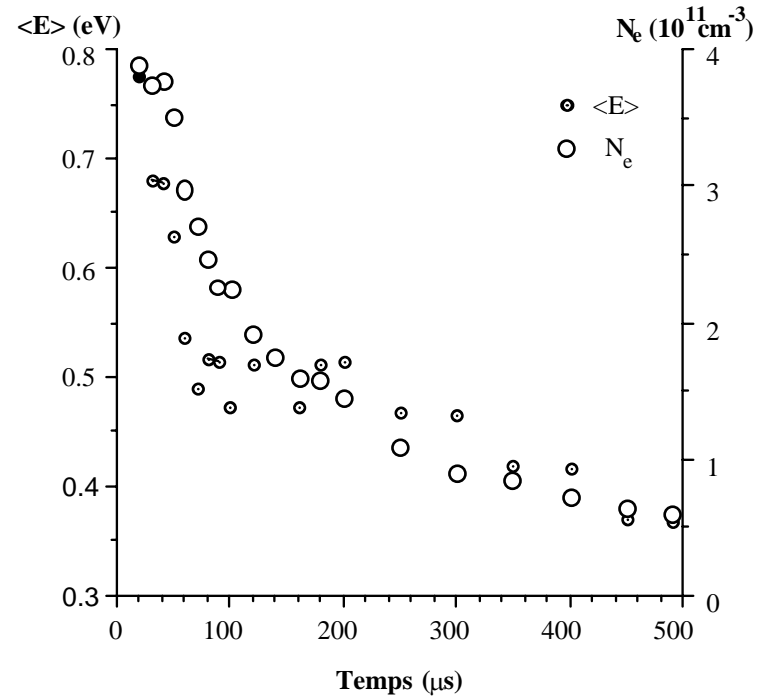
Plasma N<sub>2</sub> pulsé :  $f = 100$  Hz



Caractéristiques de sondes obtenues en proche et lointaine post-décharge



Evolution de la fonction de distribution en énergie des électrons dans une post-décharge d'azote



Evolution de  $n_e$  et  $\langle E \rangle$  au cours de la post-décharge

plasma DC pulsé d'azote

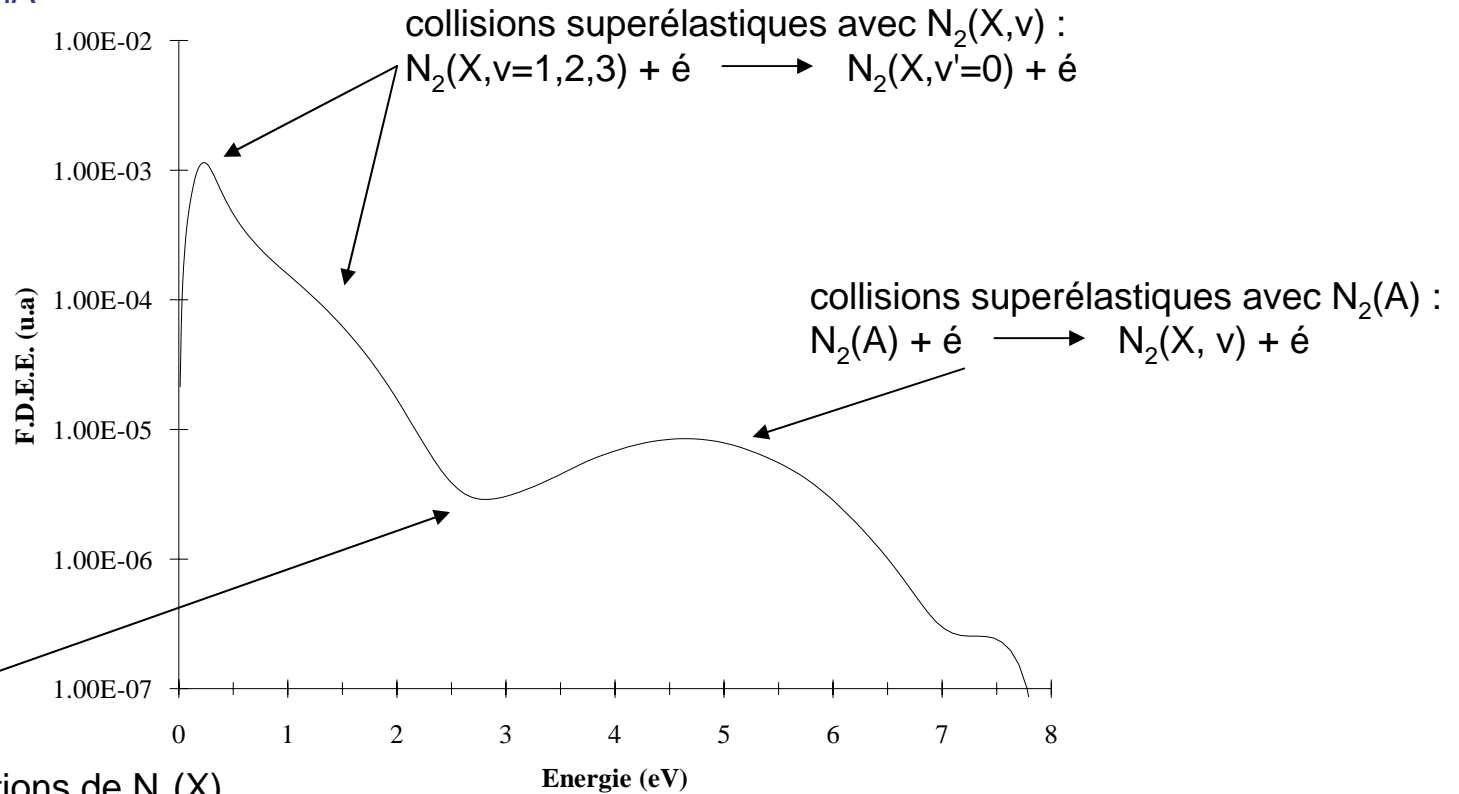
160 Hz ; 1.76 % (RC) ;

durée de la phase de décharge : 110  $\mu$ s

durée de la post-décharge : 6.14 ms

1300 V ; 120 mA

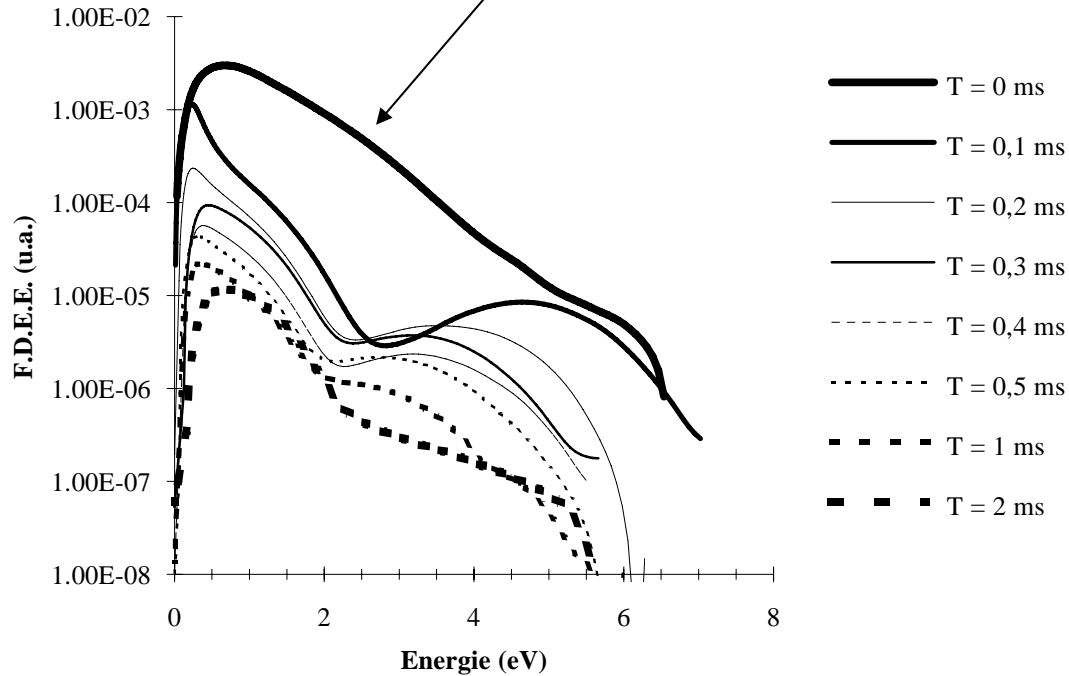
0.5 torr



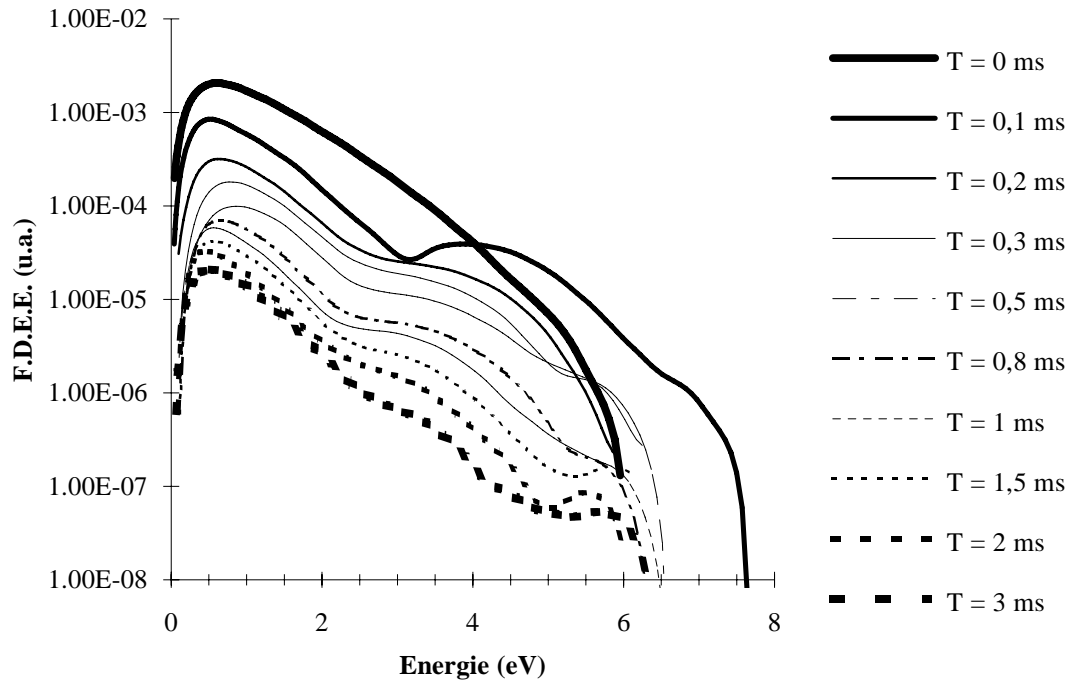
pompage des vibrations de  $N_2(X)$   
 $N_2(X, v=0) + e \longrightarrow N_2(X, v'>0) + e$

**Evolution de la fonction de distribution  
en énergie des électrons en proche  
post-décharge d'azote (t = 100  $\mu$ s)**

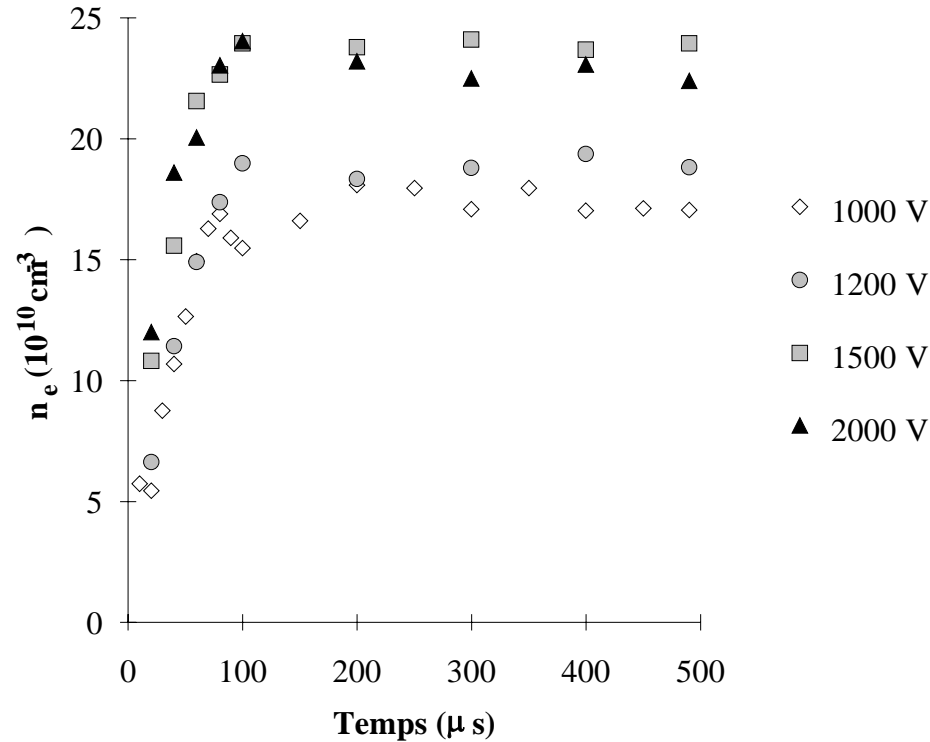
en décharge : fdee quasi maxwellienne



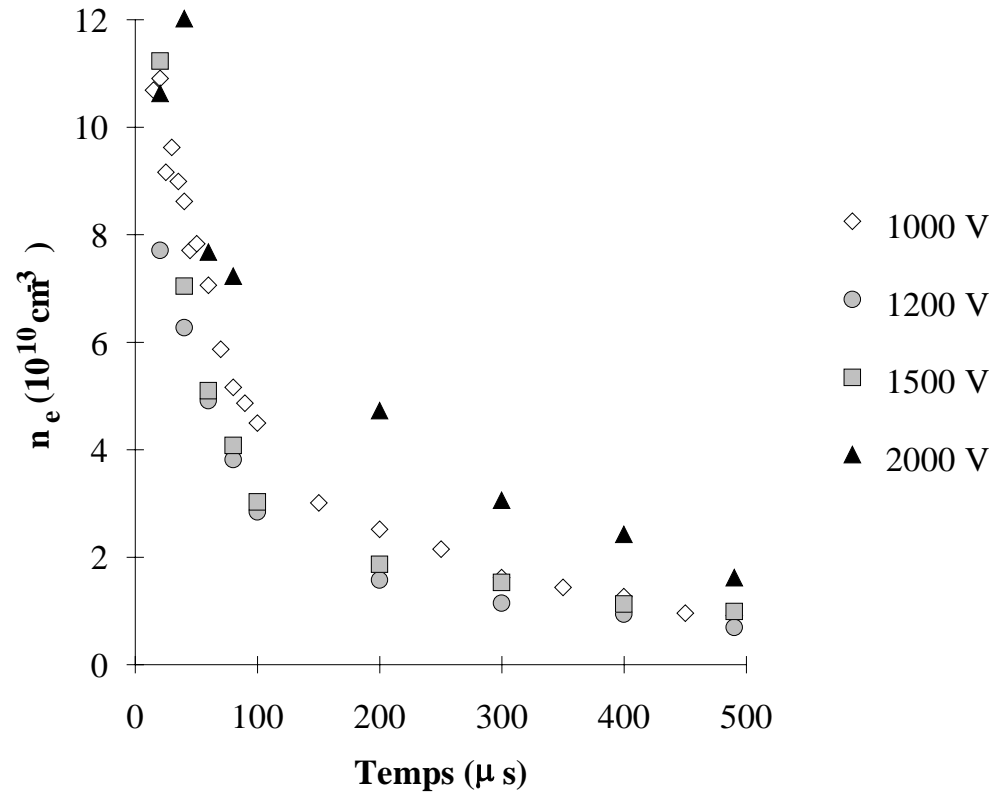
**Evolution de la fonction de distribution  
en énergie des électrons au cours de la  
post-décharge (décharge = 0.11 ms)**



**Evolution de la fonction de distribution  
en énergie des électrons au cours de la  
post-décharge (décharge = 2 ms)**



**Densité électronique au cours du temps  
pendant la phase de décharge  
pour différente tensions de décharge**

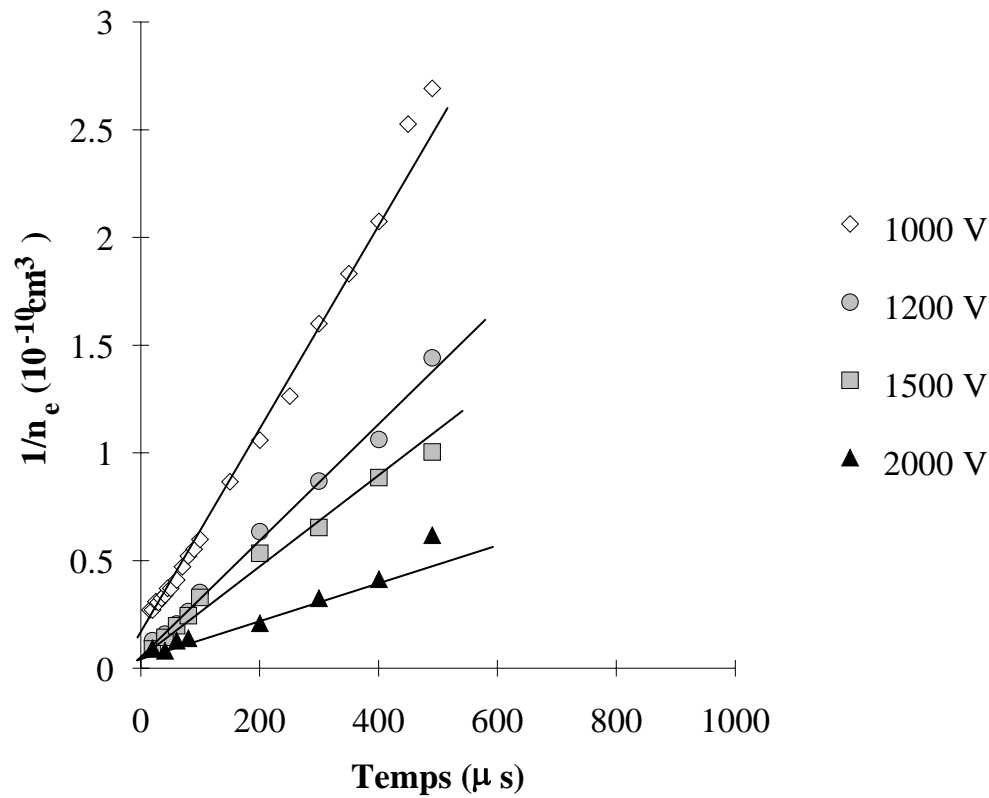


Densité électronique au cours du temps pendant la phase de post-décharge pour différente tensions de décharge

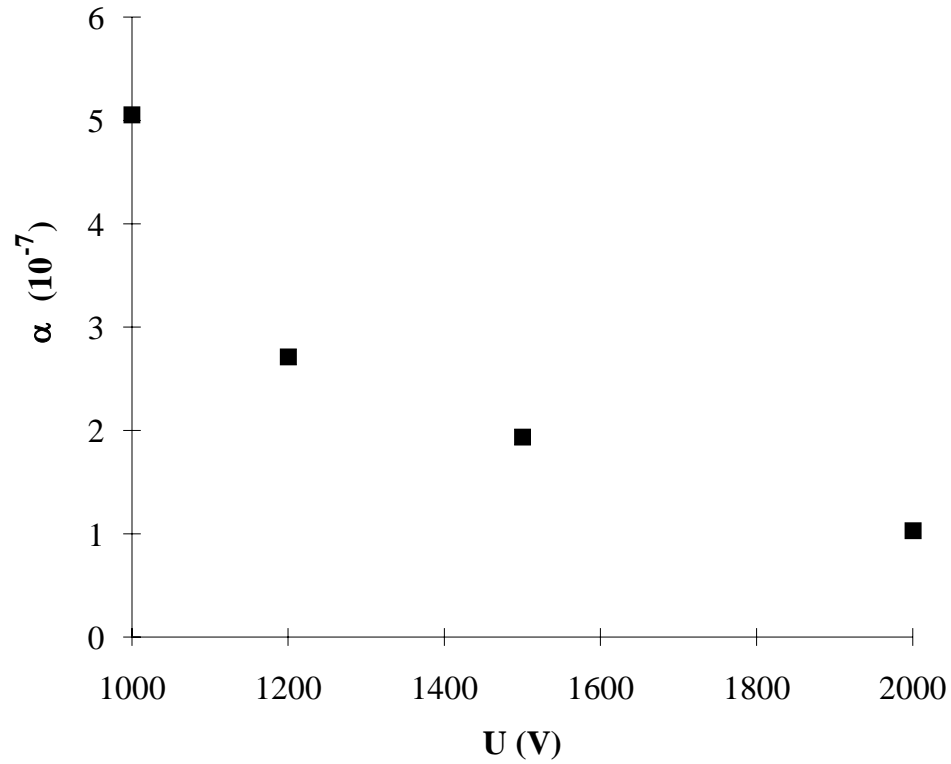


Mécanismes de pertes des électrons, essentiellement dû à la recombinaison dissociative

$$n_e(t) = \frac{n_e(t=0)}{1 + \alpha t} \quad \longrightarrow \quad \frac{n_e(t=0)}{n_e(t)} = 1 + \alpha t \quad \longrightarrow \quad \alpha$$



plasma DC pulsé d'azote  
1kHz ; 1.2 torr ; RC=50%



**Variation du coefficient de recombinaison dissociative en fonction de la tension de décharge**

# A PROPOS DU TRAITEMENT DES DONNEES

(cf cours Gérard Bonhomme)

## Lissage de la caractéristique expérimentale : méthode de Savitsky et Golay<sup>[1]</sup>

Courbe numérisée sur N points

On choisi un point  $A(V_i, I_i)$

et un intervalle de  $2m+1$  points, centré sur A

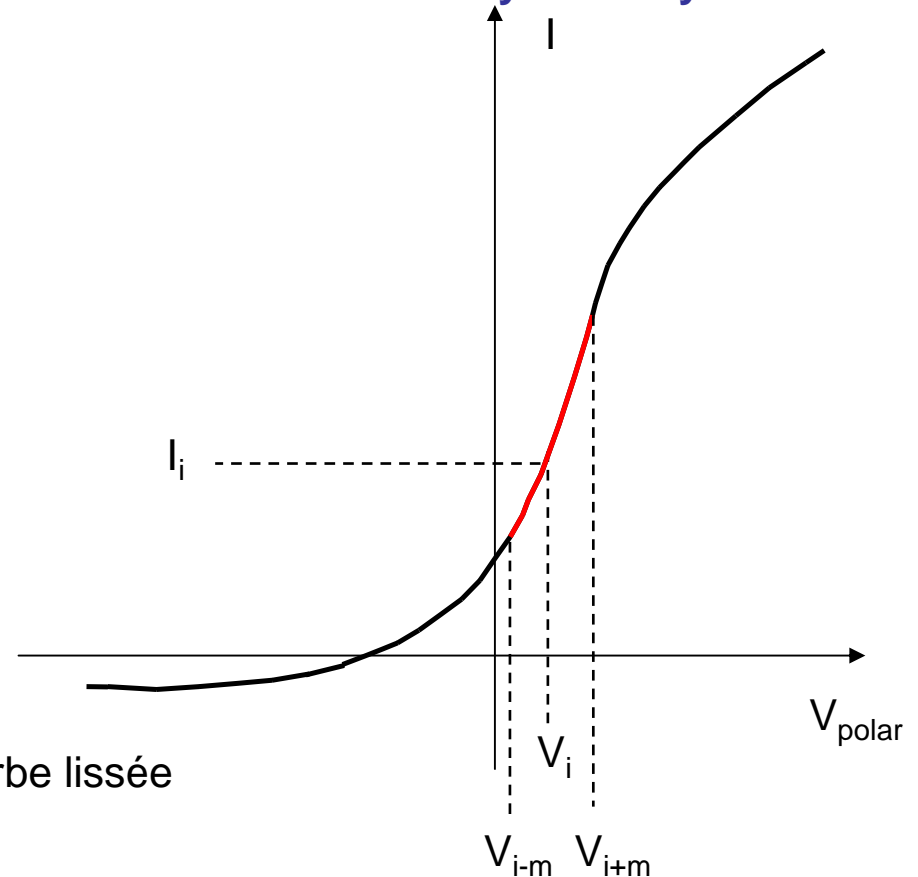
On interpole cet intervalle de données  
par un polynôme d'ordre 2 :

$$I = a.V^2 + b.V + c$$

méthode de moindres carrés



portion de courbe lissée



[1] A. Savitsky, M.J.E. Golay, *Analyt. Chem.* 36 (1964) 1627

# A PROPOS DU TRAITEMENT DES DONNEES

(cf cours Gérard Bonhomme)

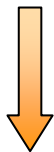
Les valeurs suivantes au point A sont alors accessibles :

**Valeur lissée :**  $I_{i(\text{lissé})} = a.V_i^2 + b.V_i + c$

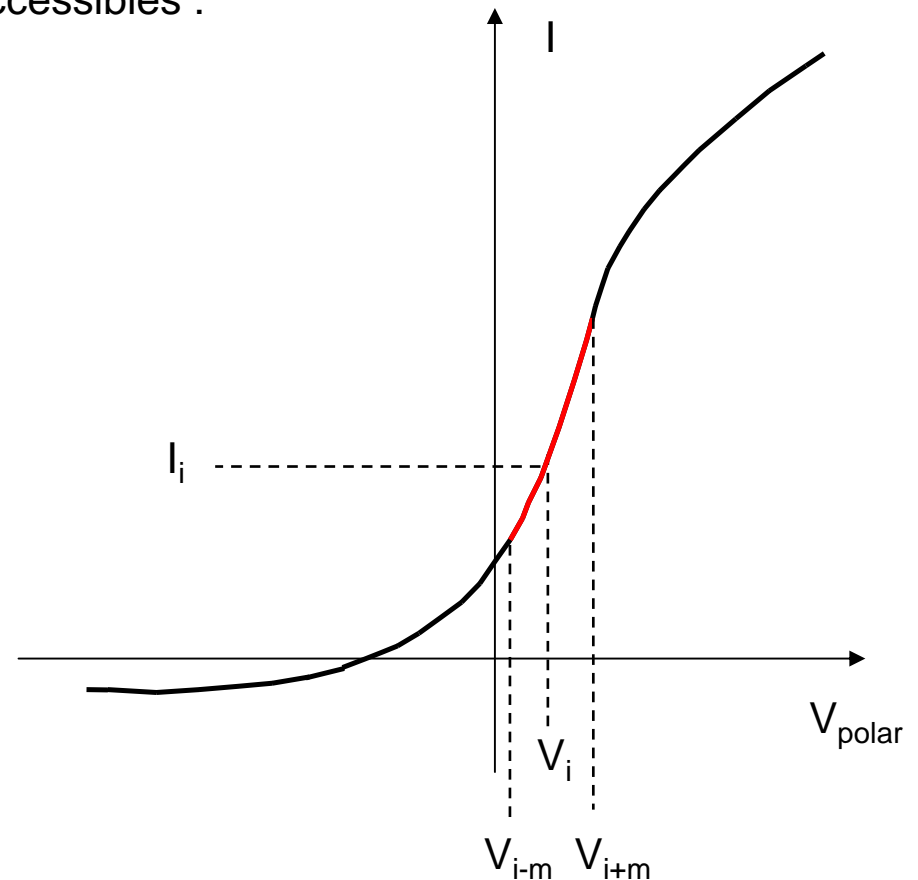
**Dérivée première :**  $\left(\frac{dI}{dV}\right)_i = 2a.V_i + b$

**Dérivée seconde :**  $\left(\frac{d^2I}{dV^2}\right)_i = 2a$

$i = i + 1$  et on recommence



**En un seul traitement, on obtient les 3 grandeurs utiles**

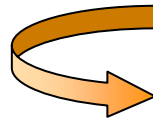


# PROBLEME DE LA CONTAMINATION

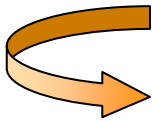
Plasmas réactifs  
Plasmas de dépôt



La sonde subit le même traitement que l'échantillon



Modification de la surface de collection  
Modification de la conductivité électrique  
Modification du travail de sortie  
etc ...



Nettoyage régulier

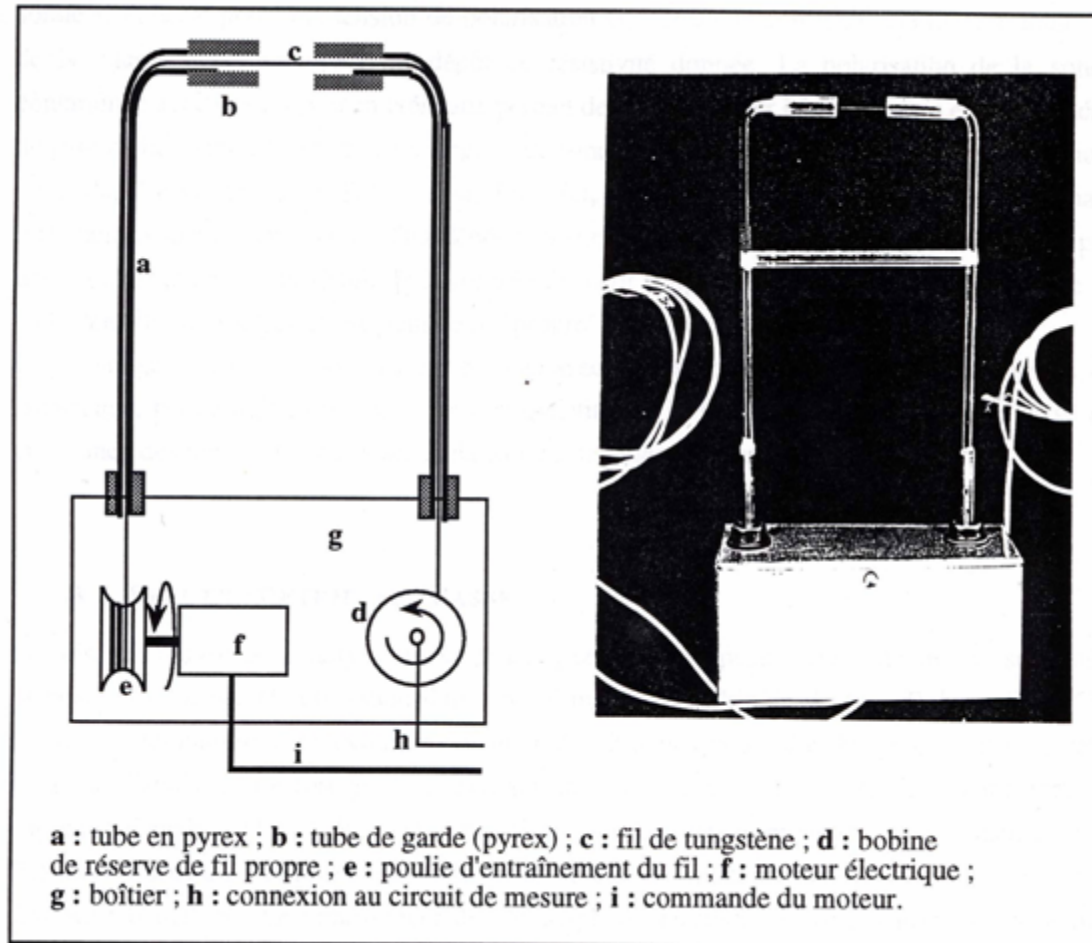
Bombardement ionique  
Bombardement électronique

Sonde polarisée fortement positivement ou négativement  
par rapport au potentiel plasma



**Efficacité du nettoyage ?**

## Remplacement de la sonde au cours de la mesure



F. Perry, thèse université Nancy I (1996)

P. Pigeat, F. Perry, G. Henrion

Enveloppe SOLEAU INPI n° 65502, 26 juillet 1996

# EN GUISE DE CONCLUSION

Mesures en plasma pulsé



reconstruction point par point

## Mesures de sonde (en général)

**C'est facile** (*Enfin, pas trop compliqué*)

**C'est pas cher** (*Enfin, ça dépend du degré de sophistication*)

**Ca peut rapporter des données super intéressantes** (*Ca, c'est toujours vrai*)

## Attention

**Validité des hypothèses** (*selon la théorie utilisée*)

**Evolution de la sonde au cours de la (des) mesure(s)**