

PHQ460 Plasma

[HAUTE-TENSION]	Demander au moniteur de vous indiquer où se situent les points de haute tension dans le circuit et comment effectuer les branchements et les mesures de façon sécuritaire.
[Lunettes de protection]	Vous travaillerez avec un tube de verre sous vide et il y a risque d'implosion. Vous devez apporter vos lunettes de protection.

Note : Pour interpréter les différentes zones lumineuses du plasma, il faut se référer à Papoular qui est sur le site des T.P.. Pour ce qui est des équations mathématiques à utiliser pour effectuer les calculs demandés, elles sont toutes contenues dans ce protocole. Vous devriez être en mesure de bien décrire les courbes présentées à la fig 12.4 dans Papoular.

1 Théorie

1.1 Généralités

Un plasma est un gaz ionisé, c'est-à-dire un gaz dont les molécules (atomes) ont libéré un ou plusieurs électrons. Habituellement l'ionisation n'est que partielle, en ce sens qu'une fraction des molécules sont ionisées tandis que l'autre fraction est demeurée neutre. Le plasma est donc composé de trois gaz :

- les atomes (molécules) neutres
- les atomes (molécules) ionisés
- les électrons libres

Ces trois gaz sont intimement mélangés à l'intérieur d'une enceinte quelconque. Étant donné la température élevée des trois gaz, lors de cette expérience, ses trois composantes obéissent aux lois de la physique statistique classique. La distribution en énergie du gaz est caractérisée par une température électronique T_e tandis que celle associée aux particules lourdes (atomes et ions) est caractérisée par une température T_i . Lorsque la concentration des électrons libres (nombre d'électrons par cm^3) est $\geq 10^{16}$ par cm^3 , les températures T_e et T_i sont les mêmes. Dans une décharge à basse pression (< 5 Torr), cette concentration demeure de beaucoup inférieure à 10^{16} par cm^3 , de sorte que $T_e \neq T_i$. En fait, $T_e \gg T_i$ pour un tel plasma. (Pour le plasma qui fait l'objet de la présente expérience, T_i est de l'ordre de la température de la pièce alors que T_e peut monter à 80 000 K !)

1.2 Décharge électrique dans un gaz

La figure suivante montre les différentes régions de la caractéristique I-V d'une décharge électrique dans un gaz.

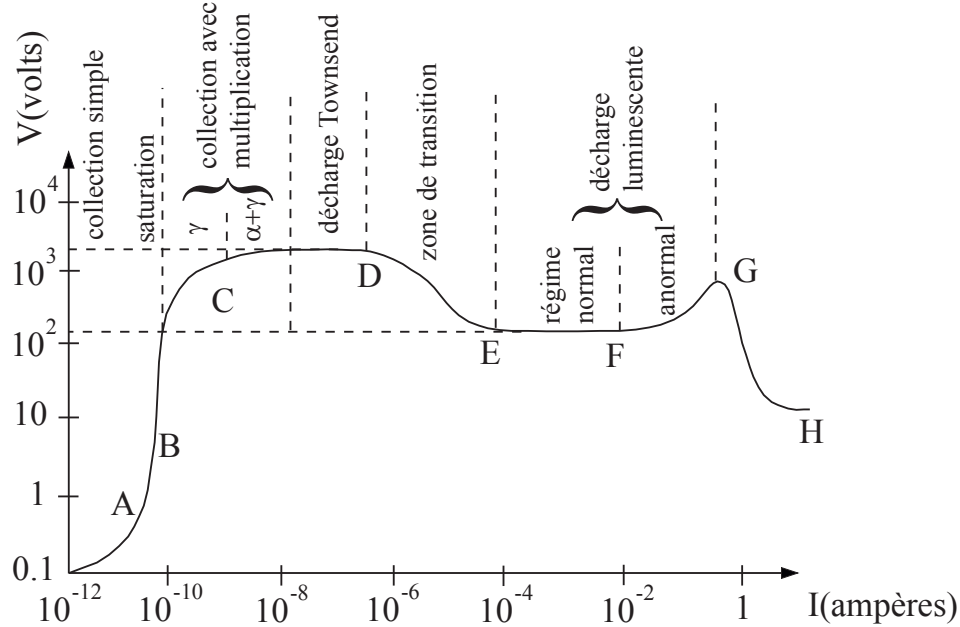


FIGURE 1: Caractéristique I-V d'une décharge électrique dans un gaz.

Comme le montre la figure précédente, une décharge électrique dans un gaz est un processus complexe qui possède une caractéristique $V-I$ assez particulière. Chacune des sous-divisions représente un régime particulier de la décharge. Nous restreindrons donc notre étude à une seule de ces régions. Sur la figure précédente, il y a une région appelée décharge lumineuse ou "*Glow discharge*" qui est caractérisée par l'apparition de différentes zones lumineuses ainsi que par une différence de potentiel entre les électrodes qui varie peu en fonction du courant. Nous nous intéresserons donc à ce genre de décharge dans ce qui suit.

1.3 Décharge lumineuse

Soit un tube de verre cylindrique scellé contenant deux électrodes planes et parallèles. On établit entre ces électrodes une différence de potentiel et on abaisse la pression du gaz dans le tube. Le gaz devient lumineux. La figure suivante illustre les différentes régions observables entre les électrodes. Les dimensions des zones montrées sur la figure ne représentent pas la réalité. La région cathodique et celle de lumière négative sont beaucoup plus courtes qu'elles ne paraissent sur la figure. De même, la variation de V_p est très faible en réalité alors que le graphique indique une pente assez grande.

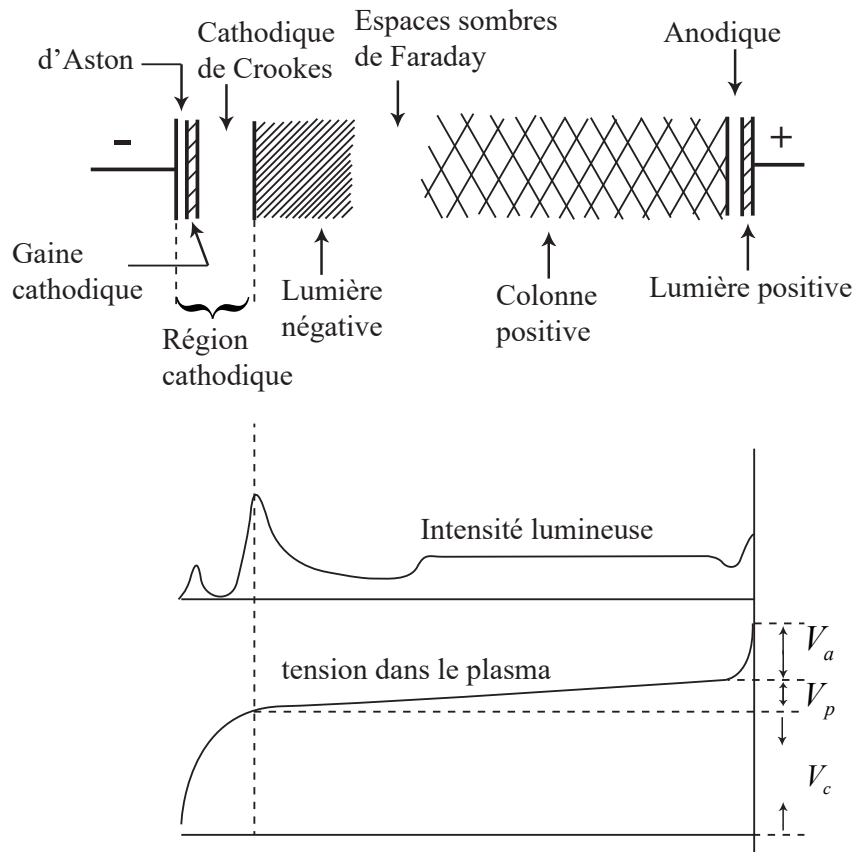


FIGURE 2: Décharge lumineuse normale (réf. : Papoular)

À mesure que la pression décroît, la lueur négative et l'espace sombre de Faraday se dilatent au détriment de la colonne positive, qui peut disparaître complètement. De même, si la distance entre les électrodes diminue, la longueur de la colonne positive décroît sans que l'étendue des autres régions varie. Si l'on déplace la cathode, toutes les zones jusqu'à celle de Faraday se déplacent avec elle.

Soient : V_c : la chute de voltage à la cathode
 V_p : la chute de voltage le long de la colonne positive
 V_a : la chute de voltage à l'anode
 V_T : le voltage entre les électrodes

On a :

$$V_T = V_c + V_p + V_a \quad (1)$$

$$V_c \gg V_p + V_a$$

Dans la colonne positive, le champ électrique est constant et peu intense : quelques volts/cm. V_c est caractéristique de la combinaison gaz et matériau de l'électrode. Il varie peu avec la pression, la distance entre les électrodes et le courant de la décharge.

1.4 Données sur les gaz

Un gaz est formé de molécules animées d'un mouvement incessant et désordonné. Chaque molécule (atome ou électron) se déplace à un instant donné avec une vitesse v suivant une direction particulière. Soit $F(v)dv$ une fonction qui représente le nombre de particules par unité de volume ayant une vitesse comprise entre v et $v + dv$. Cette fonction de distribution des vitesses (Maxwell-Boltzmann) s'écrit :

$$F(v) dv = 4\pi \left[\frac{m}{2\pi k_B T} \right]^{3/2} n v^2 e^{\left[-\frac{mv^2}{2k_B T}\right]} dv \quad (2)$$

où : n = concentration de particules
 m = la masse d'une particule
 T = la température
 $k_B = 1.38 \times 10^{-16}$ erg/K

La vitesse moyenne des particules du gaz est ¹ :

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \int_0^\infty v F(v) dv = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (3)$$

Considérons maintenant une surface plane dont l'aire est A . Le nombre de particules traversant cette surface, par unité de temps, dans une direction est :

$$N_A = \frac{1}{4} n \bar{v} A \quad (4)$$

La fraction 1/4 provient de deux phénomènes (1/2 x 1/2) [voir Reif pour une démonstration plus rigoureuse] :

1/2 vient du fait que la moitié des particules vont dans un sens et l'autre moitié dans l'autre sens ;

1/2 vient du fait que la surface moyenne vue par les particules qui la traversent vaut $A/2$.

En effet, les particules qui traversent la surface proviennent de toutes les directions. Chaque particule ne voit donc pas la même surface. Si on calcule la surface moyenne vue par l'ensemble des particules provenant de toutes les directions on trouve :

1. Voir : Thermodynamics, Kinetic theory, and Statistical Thermodynamics. Sears & Salinger. Addison Wesley pp.355-358.

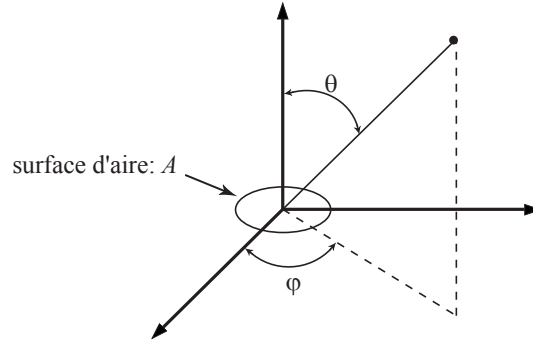


FIGURE 3: Surface effective vue par les particules du plasma.

$$A_{moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{1/2 \text{ sphère}} A \cos \theta d\Omega$$

$$A_{moy} = \frac{A}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \right) d\varphi$$

$$A_{moy} = A \int_0^1 x dx = \frac{A}{2}$$

Cette théorie s'applique à la fois pour les ions à la température T_i et aux électrons à température T_e . C'est ce que nous ferons maintenant.

1.5 Sonde de Langmuir

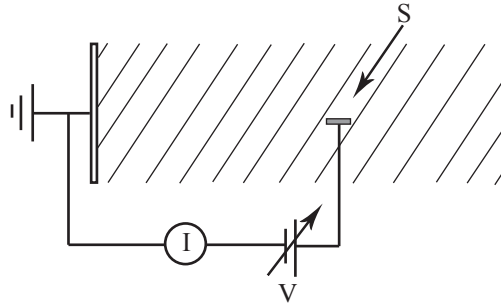


FIGURE 4: Sonde de Langmuir

Nous introduisons dans le plasma une sonde S faite d'un bloc de métal arrondi d'aire A relié à une source de tension V relativement à la cathode. On trace le courant I collecté par cette sonde en fonction de V . La figure suivante montre l'allure de la courbe obtenue :

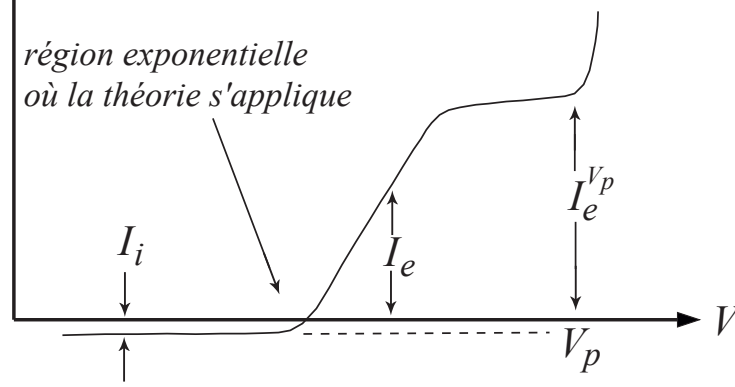


FIGURE 5: Courant collecté à la sonde de Langmuir.

Pour $V \ll V_p$, les électrons ne parviennent pas à la sonde. Les ions s'y rendent facilement. Donc le courant de la sonde est un courant d'ions. À mesure que le voltage V augmente, de plus en plus d'électrons vont être collectés par la sonde. Ainsi :

$$I = I_i + I_e \quad (5)$$

Ce courant tend à saturer lorsque V_S augmente, car la sonde finit de collecter tous les électrons incidents depuis la cathode, et ce, peu importe leur énergie cinétique. La courbe s'infléchit brusquement à $V = V_p$ car on commence à attirer des électrons vers la sonde et il s'y produit une ionisation supplémentaire à partir de cette tension. En ce point, la sonde a le même potentiel que le plasma (près de la sonde). La sonde d'aire A , recueille autant d'électrons et d'ions qu'il en passe à travers n'importe quelle surface virtuelle de même aire. Pour $V < V_p$, seule la fraction des électrons ayant suffisamment d'énergie cinétique peut atteindre la sonde. Cette fraction est :

$$F_e = \exp[e\Delta V/k_B T_e] \quad \text{où} \quad \Delta V = V - V_p \quad (6)$$

(remplacer dans l'équation (2) $\frac{1}{2}mv^2$ par $\frac{1}{2}mv^2 - e\Delta V$ et intégrer par rapport à v)

On obtient donc :

$$F_e = \exp[eV/k_B T_e] \cdot \exp[-eV_p/k_B T_e]$$

Le courant des électrons à la sonde est :

$$I_e = eN_A F_e = F_e \frac{1}{4} n_e \bar{v} A e \quad (7)$$

ce qui veut dire que :

$$I_e \propto \exp\left[\frac{eV}{k_B T_e}\right]$$

Donc si les statistiques classiques sont valables pour notre gaz d'électrons, on devrait, dans un graphique de $\ln(I_e)$ vs V , obtenir une droite de pente $e/k_B T_e$. Ceci permet le calcul de T_e .

La connaissance de T_e permet d'obtenir également d'autres quantités propres du plasma. Le courant d'électrons à la sonde lorsque $V = V_p$, i.e. au coude sur le graphique précédent (ceci est nécessaire afin que la sonde soit accessible à tous les électrons : $F = 1$).

$$I_e^{V_p} = \frac{1}{4} n_e \bar{v}_e A e$$

$$I_e^{V_p} = n_e \left[\frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right]^{1/2} A e \quad (8)$$

Ceci permet la mesure de n_e (la concentration d'électrons libres). Enfin, comme le gaz n'est ionisé qu'une seule fois, l'ionisation double demandant des conditions plus violentes, on a $n_i = n_e$.

Si le gaz de départ n'est composé que d'atomes (gaz monoatomique) la masse m_i est connue. Appliquant les mêmes raisonnements aux ions, on a :

$$I_i^{V_p} = -\frac{1}{4} n_i \bar{v}_i A e$$

$$I_i^{V_p} = -n_i \left[\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right]^{1/2} A e \quad (9)$$

Ceci permet le calcul de T_i .

Note : Avec de l'air, les ions sont d'une part des molécules ionisées et des atomes ionisés suite à la dissociation présente dans le plasma. L'expression ci-haut ne s'applique donc pas facilement puisque m_i n'a pas une valeur unique.

2 Partie expérimentale

Vous utiliserez des tensions élevées. Il est bien important de respecter les consignes du moniteur afin d'éviter tout risque d'accident. Ne jamais débrancher les câbles coaxiaux amenant la haute tension à la sonde et au tube plasma lorsque les alimentations électriques sont allumées.

Note : Avant de lancer le logiciel d'acquisition, allumer la carte qui contrôle le mouvement des moteurs permettant de déplacer les électrodes. Elle se trouve sur le dessus de l'ordinateur derrière l'écran.

2.1 Montage expérimental

L'appareil se compose d'un tube de verre dans lequel deux électrodes peuvent glisser selon l'axe du tube permettant de déplacer le plasma.

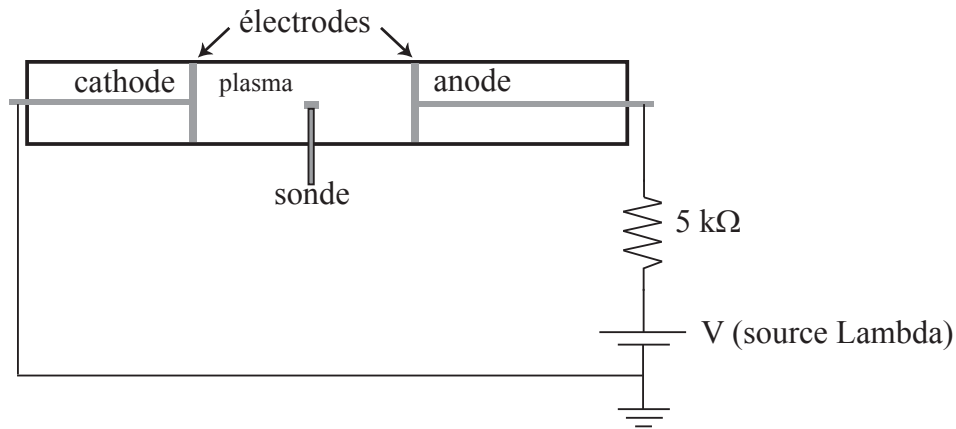


FIGURE 6: Montage expérimental.

Une sonde de Langmuir pénètre latéralement admettant un déplacement radial. On peut donc sonder n'importe quel point du plasma. Sont présents également des blocs d'alimentation électrique ainsi qu'une jauge à pression. L'annexe A donne les spécifications de l'alimentation électrique qui permet de générer le plasma.

Note : L'aire approximative de la sonde utilisée est : $(2.0 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ m}^2$.

La résistance de puissance de $5 \text{ k}\Omega$ sert à stabiliser le plasma.

La source Lambda possède un limiteur de courant mais on lui a ajouté une précaution supplémentaire. Une résistance de puissance $5 \text{ k}\Omega$ (sous la table) permet d'empêcher le courant de dépasser le maximum que peut fournir la source. Comme cette résistance est sous tension élevée, il faut absolument éviter de lui toucher, d'où la protection qui l'entoure.

Remarque : Sans cette résistance supplémentaire, le plasma est instable et le claquage est inévitable.

2.2 Partie I : Observation d'une décharge (avec l'air)

Note : Pour cette partie, la sonde de Langmuir est glissée au bord du tube car elle n'est pas utilisée.

- Abaisser la pression dans le tube jusqu'à environ 0.2 Torr.
- Diminuer au maximum la distance entre les plaques à 6 cm.
- Mettre la source Lambda sous tension (environ 500V). Le plasma devrait s'allumer.

Note : L'amorçage de la décharge est toujours plus difficile à haute pression. Il vaut mieux amorcer à basse pression et augmenter cette dernière par la suite.

- Augmenter la distance entre les plaques à 35 cm. Les zones sombres et lumineuses sont alors observables.

- Il est possible d'obtenir des stries à la place de la colonne positive. Une pression de 0.1 Torr est généralement optimale pour les observer. Vous pouvez également augmenter la distance entre les électrodes jusqu'à 40 cm de façon à voir plus de stries. Variez légèrement la tension (480-520 volts) pour voir son effet sur l'allure de cette zone lumineuse. Prenez quelques photos pour illustrer le comportement de cette région.
- Observer le comportement de la décharge lorsque la distance inter-électrodes est réduite. Commencer à 35 cm jusqu'à 15 cm en prenant au moins 4 photos.
- Revenir à une distance de 30 cm.
- Noter l'apparence et l'étendue de des zones sombres et lumineuses pour plusieurs valeurs de la pression. Commencer à 0.1 Torr et augmenter la pression jusqu'à ce que le plasma s'éteigne (> 1 Torr).
- Discuter vos résultats concernant la distance entre les électrodes et ceux relatifs à la pression.

2.3 Partie II : Caractérisation du plasma

2.3.1 Mesure de la tension en différents points du plasma

Il s'agit maintenant d'investiguer le plasma à l'aide de la sonde. Pour cette partie, on introduit de l'argon dans le tube sous une pression permettant d'observer la colonne positive.

- Fixer la distance entre les électrodes à 20 cm, la pression d'Argon à environ 0.9 Torr et la tension appliquée aux bornes des électrodes à 330 Volts.
- Les branchements de la sonde à la source Keithley 487 sont déjà réalisés. Discuter avec le moniteur de la façon dont ils ont été réalisés. L'annexe B donne les spécifications de l'appareil qui permet à la fois d'appliquer la tension à la sonde et mesurer le courant qui la traverse.

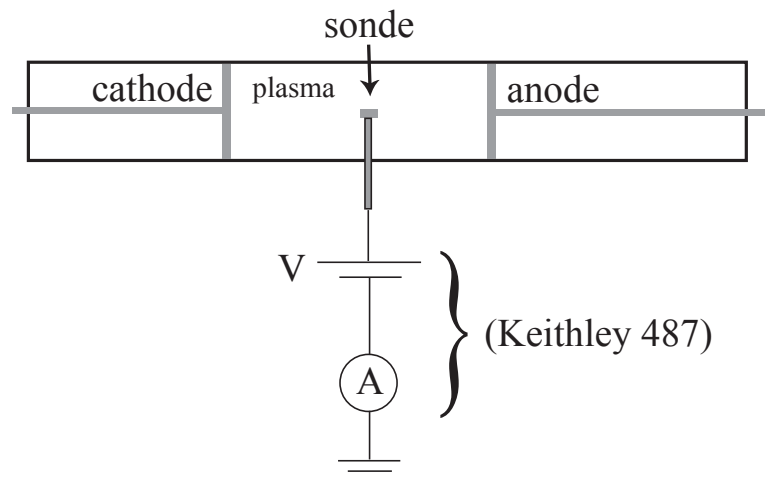


FIGURE 7: Branchements de la sonde de Langmuir.

- Déplacer la sonde au centre du tube. Vous déplacerez ensuite la position du plasma dans le tube afin d'accéder à divers points de son axe avec la sonde (il faudra déplacer

les électrodes en maintenant fixe la distance qui les sépare pour éviter d'éteindre le plasma).

- Augmenter manuellement le voltage à la sonde jusqu'à ce qu'une lueur apparaisse au bout de celle-ci. Utiliser la caméra vidéo montée à l'arrière du tube pour faire cette visualisation. À cette tension, on peut supposer que $V \approx V_p$. Relever la tension V_p pour une dizaine de points le long du plasma et porter les résultats sur un graphique : inclure la valeur du potentiel aux électrodes.

Attention : Une fois la lueur visible, il y a risque de claquage électrique si vous continuez d'augmenter encore la tension à la sonde (environ 20 volts de plus). Cela est cependant sans danger en mode automatique car le programme d'acquisition est prévu pour arrêter le balayage en tension dès que le courant dépasse 1.5 mA. Le claquage ne se produit qu'au-delà de 30 mA.

2.3.2 Sonde de Langmuir

Vous allez maintenant procéder à des mesures plus quantitatives qui vous donneront accès aux paramètres physiques du plasma en différents points. Pour ce, conserver les paramètres (pression, distance inter-électrodes et tension appliquée) de la partie précédente. La figure obtenue se présente comme suit :

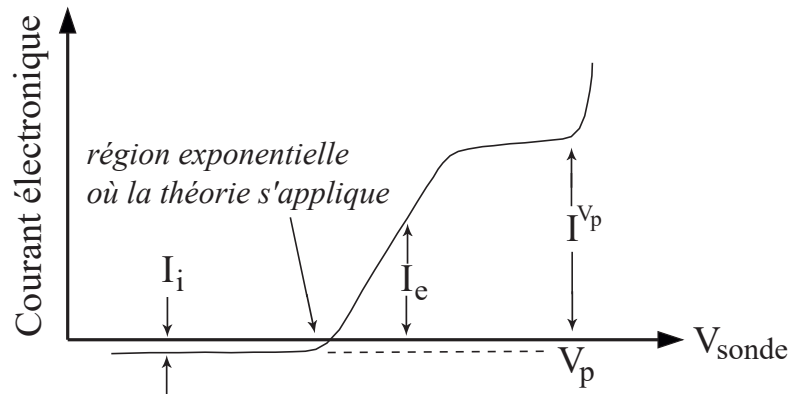


FIGURE 8: Courant vs tension à la sonde de Langmuir.

On note que I_i à la sonde varie à mesure que V diminue. Aussi, I augmente brusquement pour un voltage près du coude.

L'augmentation brusque de I se produit lorsque $V \approx V_p$. Comme I_i varie, sa valeur à $V = V_p$ est obtenue à l'aide du prolongement tel qu'indiqué sur la figure précédente. Vous pourrez discuter du type de prolongement à faire en fonction de vos données expérimentales : noter qu'il n'existe pas de modèle simple pour reproduire ce comportement de I_i vs V . Discuter avec le moniteur pourquoi il est impossible de déterminer correctement I_i à V_p .

Voici un exemple d'une courbe expérimentale obtenue avec l'argon :

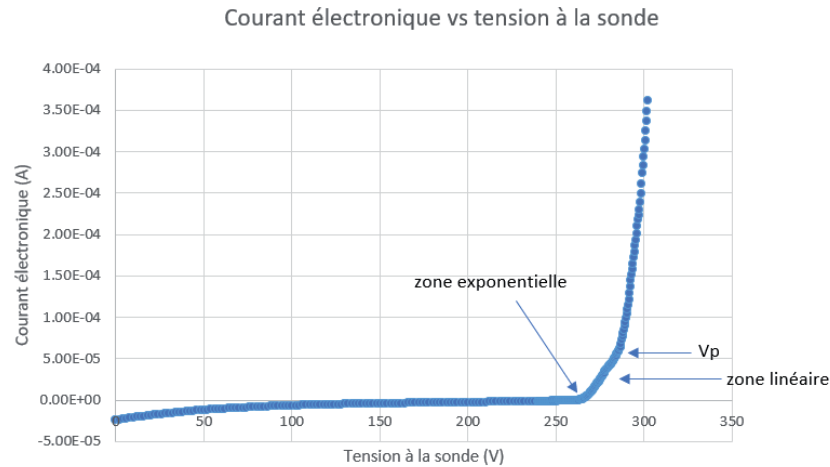


FIGURE 9: Courant vs tension à la sonde de Langmuir.

On voit bien qu'au début de la courbe le courant électronique est négatif ; le courant ionique domine. Il y a ensuite la zone où le courant électronique augmente exponentiellement suivie d'un début de saturation (zone linéaire qui malheureusement n'est pas toujours bien visible) avant d'atteindre V_p où le courant grimpe soudainement. La meilleure façon d'identifier clairement ces zones est de tracer un graphique du logarithme du courant en fonction de la tension à la sonde. La prochaine figure montre un tel graphique où l'on a cependant ajoutée une constante (à ne pas faire pour votre analyse) pour ne pas avoir de valeurs négatives afin d'obtenir le logarithme.

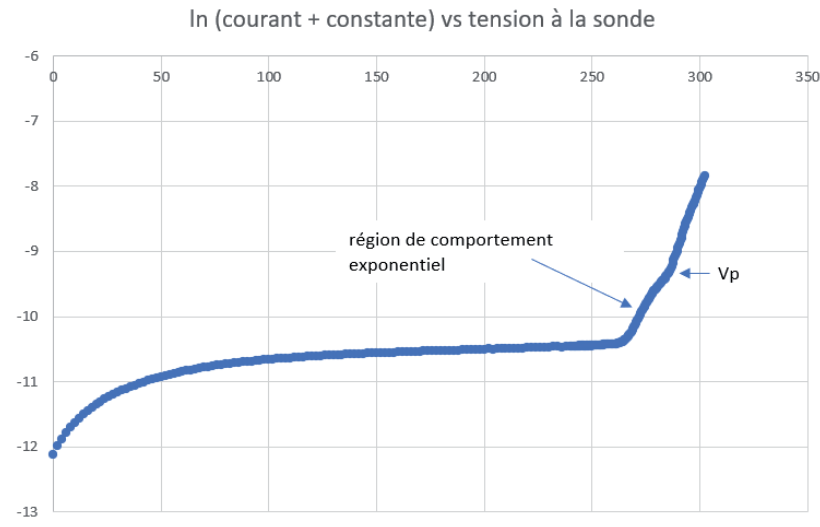


FIGURE 10: ln (courant + constante) vs tension à la sonde de Langmuir.

On voit donc ici très clairement là où le courant varie de façon exponentielle et également

où se trouve V_p . Utilisez aussi toujours la courbe sur une échelle linéaire pour repérer où le courant commence à augmenter rapidement, c'est cette petite plage de tension (5-10 volts) qu'il faut utiliser.

- Construire de tels graphiques pour quelques points (au moins 4) sur l'axe du plasma et notez la valeur de V_p lors la sonde s'illumine.
- Noter les valeurs de V_p , $I_e(V_p)$ et $I_i(V_p)$ pour chacun des points.
- Déterminer les valeurs de T_e , n_e et T_i en ces points. Vous devriez obtenir des concentrations électroniques de l'ordre de 10^{13} é/m³ et des températures électroniques entre 5000 et 100 000 K.

Note : Il faut bien identifier les différentes zones caractéristiques des courbes $I - V$ afin d'effectuer des balayages en tension appropriés pour déterminer T_e et n_e précisément. Vous pouvez en discuter avec le moniteur pour bien cibler la région où la théorie développée s'applique.

Remarque concernant la détermination de I_i (à V_p) :

Pour déterminer T_i , il faut d'abord déterminer n_i (qui est égal à n_e). Si l'on suppose maintenant que $T_i \approx 300K$ (placer votre main sur le tube et vous verrez!), alors on peut calculer quelle devrait être la valeur de I_i à V_p que l'on devrait obtenir sur notre graphique. À l'aide de cette valeur calculée, discuter de la pertinence d'utiliser le prolongement de la courbe précédente pour déterminer cette valeur.

Question : Calculer le taux d'ionisation du plasma (nbre moyen d'ions/nbre d'atomes neutres).

- Faites un graphique de la tension V_p en fonction de la position de la sonde dans le plasma. Il est important d'y inclure les valeurs au niveau des deux électrodes. Discuter de la forme de la courbe.
- La relation de Poisson reliant la charge au potentiel devrait nous permettre de retrouver la charge d'espace dans le plasma (charge totale : $\rho^+ + \rho^-$). Appliquer cette relation à votre dernier graphique et discuter du résultat.
- Expliquer les courbes de ρ^+ et ρ^- de Papoular.

Ne pas oublier de d'éteindre la carte contrôlant les moteurs avant de quitter le local.

Références

- [1] Fridman Alexander A. *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, 2008.
- [2] Reif F. *Fundamentals os Statistical and Thermal Physics*. Waveland Press, 2009.
- [3] Sears F. W. & Salinger G. L. *Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics (3rd Edition)*. Addison Wesley, 1975.
- [4] Papoular R. *Phénomènes électriques dans les gaz*. Dunod (Paris), 1963.

Ce document est aussi disponible en ligne sur le site des T.P. pour une meilleure qualité des images contenues dans les annexes.

Annexe A Source de tension pour générer le plasma

Note : Ce document n'est qu'un résumé des principales fonctions de l'appareil.
Se référer au manuel du fabricant pour de plus amples informations.

1. Contrôles du panneau avant de la source



FIGURE A-1: Source de tension Lambda GEN600-1.3

Il s'agit d'une source de tension 0-600 V (1.3 amp. Max.) munie d'un limiteur de courant qui offre plusieurs protections intégrées. Nous allons décrire le fonctionnement de chacune des touches de l'appareil de même que les fonctions cachées qui nécessitent de maintenir une touche enfoncée durant plus de 5 secondes.

1.1 Touche « OUT »

Lorsque la lumière de la touche OUT est allumée, la tension sélectionnée apparaît aux bornes de la source. Les afficheurs de tension et de courant donnent respectivement la tension demandée et le courant généré dans le circuit. Si la lumière associée à OUT est éteinte, la source se trouve en attente (standby). On doit réactiver la touche OUT après une alarme causée par « FOLD » ou « OVP » pour obtenir de nouveau une tension.

1.2 Touche « REM/LOC »

Lorsque la lumière associée à cette touche est allumée, la source se trouve en mode « REMOTE », c'est-à-dire qu'elle est contrôlée par un ordinateur. On peut mettre la source en mode « LOCAL », i.e. manuel, en appuyant sur la touche (à condition que le programme de l'ordinateur le permette).

1.3 Touche « FOLD »

Lorsque cette touche est sélectionnée, on active une protection qui met la tension aux bornes de la source à zéro dès que le courant dépasse la valeur limite choisie par l'utilisateur. Un

code d'alarme apparaît également. Vous verrez comment choisir la valeur du courant limite à l'aide de la touche « PREV » plus loin.

1.4 Touche « OVP-UVF »

Cette touche permet de sélectionner le voltage maximum (OVER VOLTAGE PROTECTION) ainsi que niveau de voltage minimum (UNDER VOLTAGE LEVEL) que la source peut fournir (en pressant de nouveau).

1.5 Touche « PREV »

Cette touche permet de régler la tension désirée et la limite du courant permis. Lorsque vous appuyez sur cette touche, vous disposez de plusieurs secondes pour effectuer les ajustements. On utilise les deux boutons rotatifs pour sélectionner la tension et le courant limite. Normalement, on effectue ces opérations lorsque la fonction « OUT » est désactivée. En maintenant cette touche enfoncée, vous pouvez verrouiller ou déverrouiller le panneau de contrôle.

1.6 Touche « FINE »

Pour obtenir une meilleure précision sur le choix de la tension et du courant limite, on appuie sur la touche « FINE » avant de tourner les boutons rotatifs.

1.7 Indicateur « ALARM »

Cet indicateur s'allume pour indiquer un problème ou un dépassement d'une tension ou d'un courant limite.

OVP	dépassement de la tension limite
OTP	température excessive
Fo	dépassement de courant limite avec protection FOLD activée
Ac	pas de tension d'alimentation détectée

1.8 Lumières associées aux boutons « VOLTAGE » et « CURRENT »

La source opère normalement en mode « source de tension » tant et aussi longtemps que le courant limite n'est pas dépassé. Dans ce mode, la lumière à côté de « VOLTAGE » est allumée. Lorsque le courant limite est dépassé, la source agit comme « source de courant » et c'est la lumière à côté de bouton « CURRENT » qui s'allume.

2. Fonctions cachées ou supplémentaires

2.1 « SAFE-START et Auto-RESTART »

En laissant la touche « OUT » enfoncée un moment, vous pouvez choisir entre deux modes d'opération. Le mode « SAFE-START » place la source à zéro volt à l'allumage avec la fonction « OUT » désactivée. Le mode « Auto-RESTART » remet la source dans la même configuration qu'elle était avant d'être fermée.

Pour l'expérience de Plasma, on choisit le mode « SAFE-START ».

2.2 Choix de l'adresse IEEE

En laissant la touche « REM/LOC » enfoncée plus de 3 secondes, vous pouvez modifier l'adresse IEEE à l'aide du bouton « VOLTAGE »

3. Branchements à l'arrière de la source

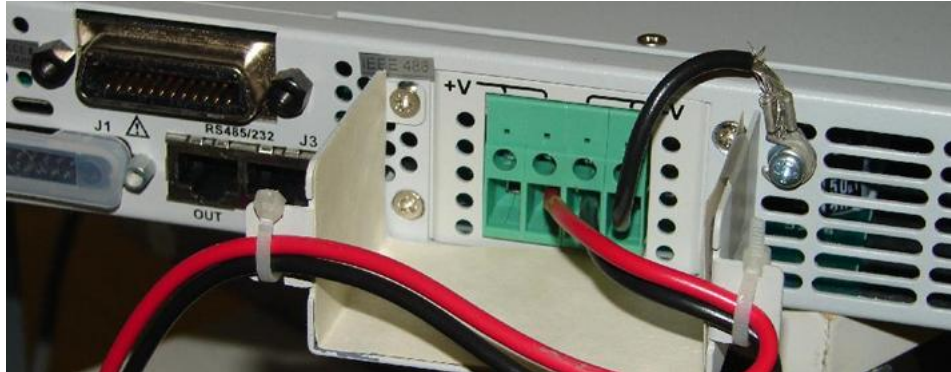


FIGURE A-2: Arrière de la source Lambda GEN600-1.3

Vous voyez ici clairement que pour l'expérience de PLASMA la borne négative (fil noir) de la source a été reliée à la terre par l'entremise du châssis de l'appareil. La tension sera donc positive par rapport à la mise à la terre. Les deux fils (rouge et noir) sont respectivement reliés à l'anode et la cathode du tube plasma.

ATTENTION !

NE JAMAIS UTILISER UNE TENSION SUPÉRIEURE À 400V SI VOUS UTILISEZ LES INTERFACES RS232/RS485 OU IEEE ET QUE LA BORNE POSITIVE EST MISE À LA TERRE.

(Dans l'expérience de plasma, c'est la borne négative de la source qui est normalement mise à la terre.)

Annexe B Picoampèremètre et source de tension Keithley-487 servant à mesurer le courant à la sonde

Note : Ce document n'est qu'un résumé des principales fonctions de l'appareil. Référez-vous au manuel du fabricant pour de plus amples informations.

1. Contrôles du panneau avant du Keithley-487



FIGURE B-1: Picoampèremètre Keithley 487.

Cet appareil combine les fonctions de source de tension et de picoampèremètre. C'est un appareil très versatile qui sert normalement à mesurer des courbes I vs V . Il permet d'appliquer une tension CC de 0 à 500V avec une résolution de 0.01 V et de mesurer des courants de 0 à 2 mA. Dans l'expérience de Plasma, l'appareil sera entièrement piloté par un programme Labview qui vous permettra d'obtenir des courbes avec un grand nombre de points et une précision élevée. Nous allons décrire les principales fonctions de l'appareil qu'il est nécessaire de connaître pour l'opérer en mode manuel.

1.1 Sélecteur de tension

C'est le bouton rotatif de droite qui sert à sélectionner la tension désirée. Les deux flèches en dessous permettent de déplacer le point décimal.

Note : Ces deux flèches servent également à déplacer les sélections des menus.

1.2 La touche « OPERATE »

Pour que la tension soit appliquée aux bornes de sortie, il faut appuyer sur la touche « OPERATE ». Si le courant limite est dépassé, le voyant lumineux de la touche « OPERATE » clignote.

Note : Ces deux flèches servent également à déplacer les sélections des menus.

1.3 La touche « **PRESET** »

On peut choisir deux tensions et les mettre en mémoire.

1.4 La touche « (Shift) Ohms (V/I) »

Permet de placer l'affichage en Ohm en calculant directement le rapport V/I.

1.5 Menu Trigger touche « **SETUP** »

Permet de sélectionner tous les paramètres relatifs au Trigger.

1.6 Menu Trigger touche « **TRIGGER** »

Permet d'actionner la lecture ou la mise en mémoire de valeurs du courant selon le mode de trigger choisi.

1.7 Menu **SETUP** touche « **FILTER** »

Permet d'actionner le filtre choisi. Dans l'expérience de plasma, on n'utilise pas de filtre car on prend une seule mesure à chaque tension. Si on actionnait le filtre, il faudrait faire des balayages en tension beaucoup plus lentement.

1.8 La touche « (Shift) **FILTER SELECT** »

Permet de choisir le type de filtre désiré. Il y a un filtre analogique RC conventionnel ou encore un filtre digital contrôlé par un algorithme.

1.9 Menu **SETUP** touche « **REL** »

Elle permet de mettre à zéro l'affichage du picoampèremètre pour s'affranchir du niveau de base du courant. On effectue donc des mesures relatives.

1.10 Menu **SETUP** touche « **RANGE** »

On peut choisir l'échelle du picoampèremètre ou encore le placer en mode automatique. Pour l'expérience de plasma, il est préférable d'utiliser uniquement l'échelle de 2 mA pour éviter d'endommager l'appareil dans le cas où le courant varierait brusquement.

1.11 La touche « **LOCAL** »

Permet d'activer les contrôles du panneau avant. Lorsque l'appareil est piloté par un ordinateur, il devient en mode « **REMOTE** » et vous n'avez plus accès aux contrôles.

1.12 La touche « ZERO CHECK »

Cette touche ne doit pas être active pour effectuer une mesure.

1.13 La touche « Shift »

Permet d'accéder aux fonctions en rouge sous les touches.

1.14 La touche « MENU »

Permet d'accéder à plusieurs réglages internes tels que :

- Enregistrement des données
- Restauration des données
- Adresse IEEE
- Réglages par défaut
- Calibration
- etc..

1.15 La touche « DISPLAY INTENSITY »

Permet de modifier la luminosité des afficheurs.

2. Branchements à l'arrière du Keithley 487.

2.1 Bornes de tension



FIGURE B-2: Panneau arrière du Keithley 487.

Deux bornes de type « banane » sont utilisées pour la sortie en tension. On peut les utiliser en mode flottant ou relier une des deux à la mise à la terre.

2.2 INTERLOCK

Un câble spécial peut être utilisé et relié à un circuit extérieur pour mettre la tension à zéro en cas d'urgence. Cette option n'est pas utilisée dans l'expérience de Plasma.

2.3 BNC de « Trigger Connections »

Cette option n'est pas utilisée dans notre expérience. Elle sert à déclencher une prise de mesure.

2.4 Triax « INPUT » pour la mesure du courant

C'est ici la partie la plus importante. Cette prise triaxiale comprend 3 bornes : la mise à la terre (partie extérieure), le « LOW » qui entoure le centre et le « HIGH » qui lui est le centre du connecteur. Dans notre expérience, nous voulons garder l'ampèremètre à basse tension. Pour ce faire, nous utiliserons le circuit équivalent suivant :

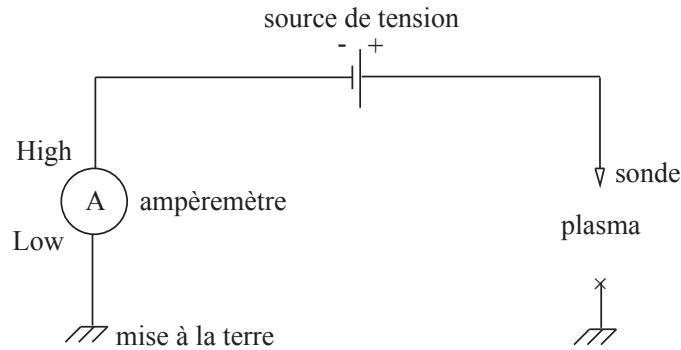


FIGURE B-3: Schéma de branchement de la sonde de Langmuir.

L'adaptateur triax-coax relie la mise à la terre avec le « LOW » de l'ampèremètre. Le « HIGH » de l'ampèremètre est relié au « LOW » de la source de tension. Ainsi, l'ampèremètre ne se retrouve jamais sous une haute tension. Le « HIGH » de la source de tension est ensuite relié à la sonde. Le retour s'effectue par l'entremise du plasma et ensuite par la mise à la terre qui ferme la boucle.



FIGURE B-4: Branchements à l'arrière du Keithley 487.

2.5 Les « ANALOG OUTPUTS »

Ces connexions qui donnent une tension CC proportionnelle au courant détecté ne sont pas utilisées. L'ordinateur va directement lire les valeurs digitales du courant par le biais de l'interface IEEE.

Annexe C Anode et cathode, qui est quoi ?

On mélange souvent les termes anode et cathode car ceux-ci sont issus de la définition du courant conventionnel (courant des charges positives) alors qu'on sait maintenant que les charges en mouvement dans un élément passif sont les électrons.

L'anode d'un élément passif inséré dans un circuit en courant continu est l'électrode où, en courant conventionnel, entre le courant électrique (en courant électronique, électrode d'où sortent les électrons). Si vous inversez la résistance, son anode deviendra la cathode et vice-versa.

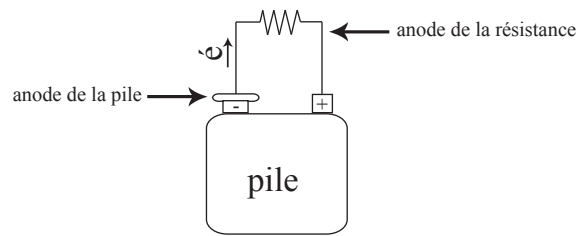


FIGURE C-1: Anode et cathode d'une pile et d'une résistance.

Si vous inversez la résistance, son anode deviendra la cathode et vice-versa. Dans un tube à décharge, comme celui du laboratoire, nous avons la situation suivante :

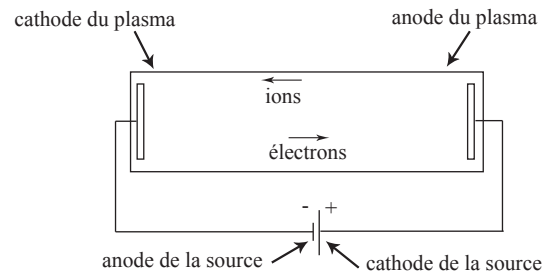


FIGURE C-2: Anode et cathode du tube à plasma.