



Formation et structuration d'un plasma dans un gaz isolant soumis à un champ électrique

Gustave Stefini¹, Heelyess Tahiri¹, Hugo Vaillendet¹

¹ Laboratoire de Physique des Plasmas, Université Sorbonne Science, Paris, France

Abstract

Ce travail expérimental a pour objectif d'étudier la formation d'un plasma au sein d'un gaz faiblement ionisé soumis à une haute tension dans un tube sous vide partiel. À partir d'un dispositif de décharge électrique, nous avons observé la création de colonnes positives et de zones sombres caractéristiques d'une décharge lumineuse « normale ». Les mesures de tension de claquage en fonction de la pression ont permis de vérifier la loi de Paschen, tandis que l'analyse optique des striations a fourni une estimation du champ électrique au sein du plasma. Les résultats expérimentaux mettent en évidence la complexité du comportement des gaz ionisés soumis à un champ électrique et leur intérêt pour la compréhension des phénomènes liés aux plasmas naturels et industriels.

Mots-clés : plasma, décharge lumineuse, loi de Paschen, colonne positive, lueur négative.

Introduction

Les plasmas constituent le quatrième état de la matière, après les états solide, liquide et gazeux¹. Bien que longtemps méconnu, cet état a été formalisé au début du XX^e siècle et représente aujourd'hui un domaine central de la physique moderne. Environ 99% de la matière visible dans l'univers se trouve à l'état de plasma, notamment dans les étoiles, les comètes et les aurores polaires. Les décharges électriques dans les gaz constituent un moyen privilégié de générer des plasmas en laboratoire. Ces décharges, dites « lumineuses », résultent de l'ioni-

sation d'un gaz soumis à une tension suffisante pour que des électrons accélérés provoquent de nouvelles ionisations. Elles permettent d'étudier des phénomènes tels que la loi de Paschen², la formation de colonnes positives et l'apparition de zones sombres cathodiques.

Ainsi, de quelle manière un gaz initialement isolant se transforme-t-il en conducteur sous l'influence d'un champ électrique intense, et quelles sont les propriétés physiques et luminescentes du plasma ainsi engendré ?

Cette étude vise à produire et observer une décharge lumineuse dans un gaz à vide partiel, à identifier les zones lumineuses et sombres du plasma, à vérifier expérimentalement la loi de Paschen et à mesurer les striations lumineuses de la colonne positive afin d'en estimer le champ électrique associé.

La tension de claquage dépend du produit $p \cdot d$ et présente un minimum conformément à la loi de Paschen. Le plasma présente une structure spatiale inhomogène, avec des zones sombres et lumineuses distinctes. Le champ électrique interne au plasma est inférieur au champ homogène théorique entre électrodes.

L'étude se propose d'analyser expérimentalement la formation et la structure d'un plasma généré par une décharge dans un tube sous vide partiel. Dans un premier temps, le contexte théorique et les lois physiques associées aux décharges électriques, en particulier la loi de Paschen, seront présentés. Le dispositif expérimental et la méthode de mesure employée pour observer les zones lumineuses du plasma seront ensuite décrits. Les résultats expérimentaux, incluant les courbes de tension de claquage et les observations optiques, seront présentés et discutés à la

1. Concept introduit par Irving Langmuir dans les années 1930.

2. Friedrich Paschen (1865–1947), physicien allemand.

lumière des modèles théoriques. L'étude se conclura par une analyse des perspectives d'application et des limites du protocole. Cette structuration permet de relier les phénomènes observables de la décharge lumineuse aux concepts fondamentaux de la physique des plasmas.

Mise sous vide du tube en verre

L'objectif de cette étape est d'abaisser la pression interne du tube cylindrique en verre jusqu'à atteindre un vide partiel de l'ordre de 1 Pa. Ce niveau de vide est nécessaire pour l'étude expérimentale des décharges lumineuses normales, telles que décrites dans la littérature sur les décharges continues en régime de plasma faiblement ionisé [3, 4].

Avant toute manipulation, la jauge de pression est connectée à l'afficheur dédié afin de vérifier l'état initial du tube. Le boîtier de régulation de l'électrovanne est ensuite mis sous tension et la consigne de pression est fixée à 1 Pa. La jauge de type Pirani est raccordée à ce boîtier afin de permettre un contrôle continu de la pression résiduelle.

Une fois les connexions vérifiées et toutes les vannes fermées, la pompe à palette est activée. L'ouverture de la vanne reliant la pompe au tube est réalisée de façon progressive afin de réduire le gradient de pression et de prévenir toute implosion. L'électrovanne, pilotée automatiquement par le régulateur, introduit si nécessaire une micro-fuite contrôlée permettant de stabiliser la pression autour de la valeur de consigne. La procédure se termine lorsque la pression mesurée s'approche du vide limite accessible avec la pompe, soit environ 1 Pa.

La mise sous vide progressive a permis d'atteindre une pression interne stable proche de la consigne imposée de 1 Pa. La jauge Pirani indiquait une diminution régulière de la pression au fur et à mesure de l'ouverture contrôlée de la vanne, jusqu'à atteindre la région de vide primaire. La stabilité de la pression a été assurée par le système de régulation automatique couplé à l'électrovanne.

La réussite de la mise sous vide repose sur plusieurs aspects critiques :

1. la fragilité structurelle du tube en verre impose une ouverture très progressive des vannes afin d'éviter des contraintes mécaniques trop importantes ;
2. la pompe à palette, bien que limitée à un vide primaire de l'ordre de 0.1 Pa, est suffisante pour atteindre la gamme de pression nécessaire à l'observation de décharges lumineuses normales ;

3. la jauge Pirani, sensible à la conductivité thermique de gaz résiduels, fournit une mesure dans la plage de pression utilisée ;

4. la régulation par électrovanne est essentielle pour maintenir une pression stable.

Une erreur lors de la mise sous vide (ouverture trop rapide, régulation absente, mauvaise connexion de la jauge) peut fausser les mesures de pression, voire endommager irréversiblement le tube.

La procédure de mise sous vide a permis d'obtenir un environnement basse pression avec de faibles variations et contrôlé dans le tube en verre, condition indispensable pour l'étude des décharges lumineuses. La combinaison : pompe à palette – jauge Pirani – régulation par électrovanne, s'est révélée efficace pour atteindre et maintenir une pression de l'ordre de 1 Pa. Cette étape constitue la base nécessaire à la réalisation des expériences ultérieures sur la décharge gazeuse et l'analyse des phénomènes associés.

Analyse qualitative des décharges lumineuses

L'objectif de cette partie est d'identifier qualitativement les différents régimes de décharge lumineuse apparaissant dans le tube en verre en fonction de la pression et de la tension appliquée. L'observation visuelle, complétée par des clichés numériques, permet de caractériser les zones lumineuses et sombres propres aux décharges dans les gaz ionisés à basse pression.

Les deux alimentations haute tension sont ajustées pour fournir au maximum 2 mA. La pression de régulation est ensuite ajustée de 1 Pa à 100 Pa, en veillant à respecter un palier intermédiaire à 10 Pa, afin de préserver la stabilité du système.

Une fois la pression stabilisée, les hautes tensions sont augmentées progressivement et simultanément sur les deux alimentations. À chaque régime de pression, une photographie de la décharge est réalisée à l'aide de l'appareil photo en mode manuel.

La procédure est répétée pour deux autres valeurs de pression :

1. un régime de régulation à 20 Pa,
2. un régime de régulation à 5 Pa.

Pour chacune de ces pressions, une image de la décharge lumineuse est enregistrée.

Les clichés obtenus montrent l'apparition et l'évolution de différentes zones lumineuses et sombres caractéristiques des décharges dans les gaz raréfiés ionisés. Ces zones varient en forme, en intensité lumineuse et en extension longitudinale selon la

pression. Une structuration plus marquée apparaît lorsque la pression diminue, notamment à $p = 5$ Pa.

À partir des images enregistrées, plusieurs zones classiques des décharges lumineuses peuvent être identifiées :

1. la lueur cathodique, proche de la cathode, souvent intense et localisée ;
2. la zone sombre de Crookes, présentant une baisse notable de luminosité ;
3. le faisceau cathodique, dont la déviation sous l'effet d'un aimant permet de mettre en évidence la présence d'électrons rapides ;
4. la colonne positive, zone lumineuse étendue, dont la couleur et l'homogénéité dépendent de la pression et du gaz résiduel ;
5. la lueur négative et les autres zones sombres intermédiaires, dont les largeurs relatives évoluent avec la pression.

L'analyse quantitative des images via le logiciel *ImageJ* (fonction *plot profile*) permet d'extraire un profil d'intensité lumineuse le long de l'axe du tube. Cette mesure confirme la succession de maxima et minima d'intensité correspondant aux régions lumineuses et obscures schématisées dans la documentation du TP.

La comparaison des trois pressions montre que :

1. une diminution de pression augmente la largeur des zones sombres ;
2. la colonne positive devient plus uniforme lorsque la pression se rapproche de 10 Pa ;
3. à très basse pression (env. 5 Pa), la décharge adopte une structure plus fine et plus complexe.

L'analyse qualitative des décharges lumineuses à différentes pressions permet d'identifier les structures caractéristiques d'une décharge dans un gaz faiblement ionisé. Cette étape constitue une base essentielle pour l'étude quantitative des caractéristiques électriques et spatiales de la décharge.

Lien entre tension de claquage et pression

L'objectif de cette section est de déterminer et d'interpréter la tension de claquage en fonction de la pression, en référence à la loi de Paschen, qui décrit l'amorçage des décharges dans les gaz [1].

Pour 18 valeurs de pression réparties entre 3 Pa et 200 Pa, le plasma a été établi avec un niveau de stabilité variable, en particulier pour les pressions supérieures à 100 Pa. Les tensions ont été relevées sur les deux alimentations haute tension. Les mesures ont été effectuées conformément au protocole expérimental décrit précédemment.

La tension U aux bornes du tube a ensuite été tracée en fonction de la pression p , en tenant compte de la résistance de $50\text{ k}\Omega$ du circuit et du courant $I = 2\text{ mA}$ imposé dans celui-ci [FIGURE 1].

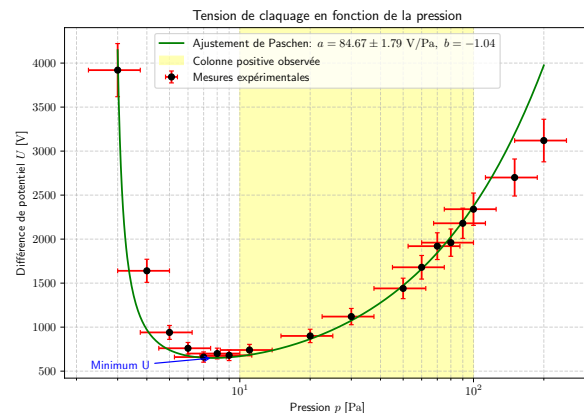


FIGURE 1 – Représentation graphique semi-logarithmique des mesures expérimentales avec ajustement suivant la loi de Paschen.

L'allure générale est conforme à la loi de Paschen [1]. Les données expérimentales ont été analysées à l'aide d'un ajustement suivant une loi de Paschen (simplifiée), en utilisant la fonction :

$$U(p) = \frac{ap}{b + \ln(p)},$$

où a et b sont les paramètres ajustables.

Les valeurs initiales $a = 100$ et $b = 4$ ont été choisies comme point de départ pour l'optimisation. Cette approche permet de comparer l'évolution expérimentale de la tension avec la loi théorique de Paschen, et d'en évaluer la qualité de l'ajustement.

L'ajustement des données expérimentales donne

$$a = 84.7 \pm 1.8 \text{ V Pa}^{-1} \quad \text{et} \quad b = -1.04$$

Avec un $\chi^2_{\text{réduit}} = 3.464$, le modèle est qualitativement pertinent, mais quantitativement limité.

Les résultats obtenus confirment les propriétés fondamentales des décharges lumineuses. Le minimum de la courbe de Paschen observé expérimentalement correspond à la tension minimale nécessaire pour amorcer une avalanche d'ionisation. Les striations observées sont dues à des ondes d'ionisation dans la colonne positive, comme observé expérimentalement par Gibson [2].

Le $\chi^2_{\text{réduit}}$ relativement élevé s'explique par la présence de biais systématiques liés à des conditions expérimentales éloignées des hypothèses théoriques d'application de la loi de Paschen (distance millimétrique, champ uniforme). De plus, des écarts entre les valeurs expérimentales et théoriques de la tension de claquage peuvent s'expliquer par

1. la précision des mesures,
2. des limitations expérimentales, notamment aux pressions proches de 100 Pa où le plasma est difficilement stable,
3. des fuites dans le système sous vide,

Cette étude expérimentale a permis de relier la tension de claquage à la pression et de vérifier la tendance générale prévue par la loi de Paschen. Les mesures et l'ajustement réalisé fournissent un outil quantitatif pour prédire la tension de claquage en fonction de la pression dans le système étudié.

Étude de la conductivité d'un plasma

L'objectif de cette expérience facultative est de déterminer la résistance électrique d'un plasma en régime de décharge normale. Cette mesure permet d'estimer la conductivité du milieu ionisé en fonction du courant imposé.

La pression de régulation est fixée à 30 Pa. Dans ces conditions, la décharge entre les deux électrodes est stable et homogène. Pour différentes valeurs du courant limite imposé par les alimentations haute tension comprises entre 2 mA et 0.2 mA, la tension de claquage nécessaire à l'apparition et au maintien du plasma est relevée.

Afin d'assurer un fonctionnement symétrique du dispositif, les deux alimentations doivent fournir un courant identique à tout instant. À partir des valeurs mesurées de tension U et de courant I , la résistance équivalente du plasma est calculée à l'aide de la relation

$$R_p = \frac{U}{I}.$$

Les différentes valeurs de résistance obtenues pour chaque intensité imposée sont reportées graphiquement [FIGURE 2] sous la forme

$$R_p = f(I).$$

Le tracé met en évidence l'augmentation de la résistance électrique du plasma lorsque le courant de décharge diminue.

L'analyse de la FIGURE 2 montre que la résistance apparente du plasma augmente lorsque le courant diminue. Cette tendance est cohérente avec la physique de la décharge normale décrite dans les ouvrages classiques de physique des plasmas [1] : un courant plus faible correspond à une densité d'ionisation réduite, entraînant une diminution de la conductivité du plasma.

De plus, la tension de claquage mesurée varie avec le courant limite du fait de l'équilibre entre ionisation, recombinaison et pertes par diffusion. À faible courant, le champ électrique doit être plus élevé pour

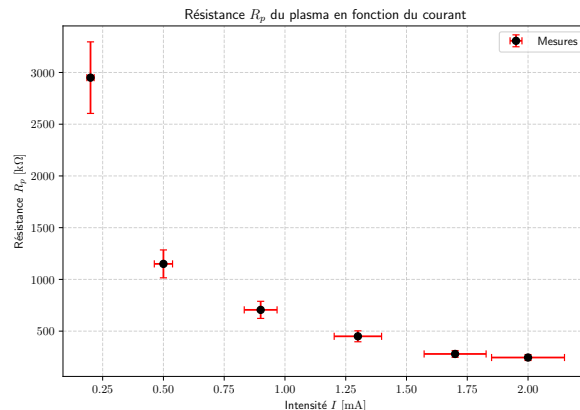


FIGURE 2 – Variation de la résistance du plasma en fonction de l'intensité à une pression $p = 30$ Pa fixée.

maintenir le plasma, ce qui se traduit par une tension supérieure et donc une résistance du plasma plus élevée.

Cependant, il convient de noter que le plasma ne se comporte pas comme un conducteur ohmique : la relation $U(I)$ n'est pas linéaire et la résistance obtenue représente une résistance dynamique dépendante des conditions de décharge. Afin de vérifier une éventuelle loi de puissance $R_p \propto I^{-n}$, les données ont été représentées en coordonnées logarithmiques [FIGURE 3].

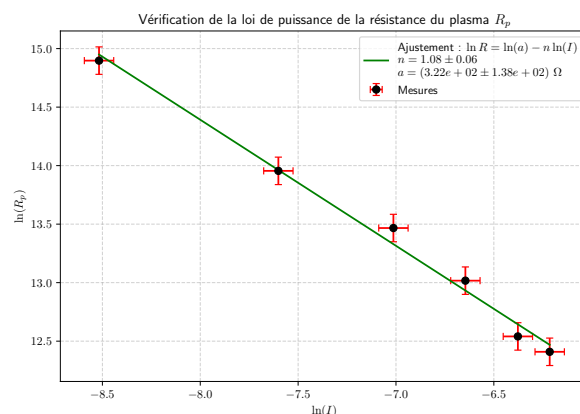


FIGURE 3 – La représentation log-log met en évidence une pente compatible avec -1 , indiquant une proportionnalité $R_p \propto I^{-1}$.

L'obtention d'une droite valide la loi de puissance, la pente étant égale à $-n$. La pente mesurée est compatible avec -1 , ce qui confirme la proportionnalité $R_p \propto I^{-1}$. L'ajustement des données expérimentales donne $R_p = (3.2 \pm 1.4) \times 10^2 \cdot I^{-1.1 \pm 0.1} \Omega$ à $p = 30$ Pa, ce qui indique une dépendance en courant proche de la relation théorique en I^{-1} attendue. Avec un $\chi_{\text{réduit}}^2 = 0.783$, l'ajustement est sta-

tistiquement satisfaisant, mais suggère que les incertitudes ont été légèrement surestimées. Les mesures reflètent donc le régime de plasma normalisé et non une propriété intrinsèque indépendante du courant. Les écarts entre les valeurs expérimentales et théoriques sont de mêmes natures que celles énoncées lors de l'étude du lien entre la tension de claquage et la pression.

L'étude montre que la résistance équivalente du plasma dépend fortement du courant imposé, traduisant une conductivité croissante avec l'ionisation. Le plasma étudié ne suit pas la loi d'Ohm et présente un comportement non linéaire caractéristique des décharges faiblement ionisées. Ces résultats complètent l'analyse qualitative précédente et illustrent la dépendance électrique du plasma aux paramètres de décharge.

Étude de la colonne positive

L'objectif de cette étude est d'estimer le champ électrique présent dans la colonne positive d'une décharge lumineuse à basse pression, à partir de l'analyse des striations observées dans différentes conditions de pression 10 Pa, 30 Pa et 100 Pa.

Pour les trois valeurs de pression dans lesquelles le phénomène de striations est observable, des photographies de la colonne positive sont prises à l'aide de l'appareil numérique en mode manuel. Ces pressions sont choisies dans une gamme où les variations spatiales d'intensité lumineuse sont bien définies, typiquement dans un régime de vide partiel où la colonne positive adopte une structure ondulée.

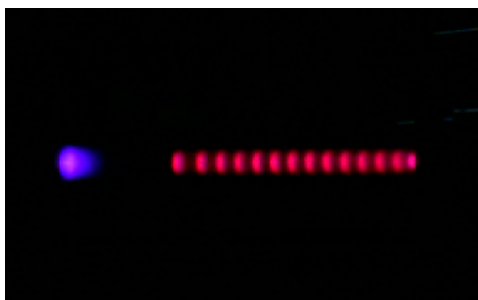


FIGURE 4 – Photographie du tube à 30 Pa.

Les images obtenues sont ensuite analysées avec le logiciel *ImageJ*. Le profil d'intensité lumineuse le long de l'axe du tube est extrait en utilisant la fonction *plot profile*. Pour chaque pression, la distance séparant deux maxima successifs d'intensité (correspondant aux striations) est mesurée. On note cette distance d_n , où n représente le numéro de la striation. La distance moyenne entre deux maxima est

ensuite calculée :

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n.$$

Les mesures effectuées sur les trois pressions montrent que la distance entre striations est globalement régulière pour une pression donnée, mais varie lorsque la pression change. Le tracé de d_n en fonction du numéro de la striation fait apparaître de faibles fluctuations autour de la valeur moyenne \bar{d} . Pour chacune des pressions étudiées, une valeur représentative de \bar{d} est obtenue, caractérisant l'échelle spatiale des ondes d'ionisation observées.

La valeur moyenne pour une pression de 30 Pa de la distance interstriation obtenue est $\bar{d} = (3.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ m.

D'après les travaux expérimentaux de R. G. Gibson, la distance entre striations est directement liée au champ électrique local dans la colonne positive [2]. Ce dernier obtient expérimentalement des valeurs entre de \bar{d} entre 2×10^{-2} m et 3×10^{-2} m [2]. En première approximation, le champ électrique peut être estimé par une relation du type :

$$E \approx \frac{V_{\text{str}}}{\bar{d}},$$

où V_{str} est la chute de potentiel typique associée à une striation. Cette dernière, déduite de l'ordre de grandeur fourni par Gibson, permet d'obtenir une estimation de E .

Pour l'air on obtient un potentiel d'ionisation de $V_{\text{str}} \approx 20$ V et un champ effectif moyen de $E = (6.38 \pm 0.2) \times 10^2$ V m⁻¹.

À titre de comparaison, pour un condensateur plan de distance L soumis à une différence de potentiel U , le champ électrique uniforme est donné par la relation classique :

$$E_{\text{cond}} = \frac{U}{L}.$$

soit, à 30 Pa, $E_{\text{cond}} = (4.0 \pm 0.2) \times 1 \times 10^3$ V m⁻¹. On observe que E_{cond} est environ 6 fois plus important que E .

Dans un tube vide, sans décharge ni plasma, le champ est donc simplement déterminé par la géométrie. La comparaison entre E dans la colonne positive et E_{cond} met en évidence l'effet structurant du plasma : le champ dans la colonne positive est plus faible et spatialement modulé, du fait de la quasi-neutralité et de la diffusion des porteurs de charge. En utilisant ces valeurs estimées ainsi que les données précédemment obtenues pour la courbe de Paschen, il est possible d'évaluer la chute de potentiel

anodique, située entre le pied de la colonne positive et l'anode. Cette chute dépend de la pression et de la longueur de la colonne positive, et se situe dans un intervalle compatible avec les régimes de décharge identifiés. La cohérence avec la courbe de Paschen confirme que la majeure partie du potentiel est dissipée dans les zones proches de la cathode, tandis que la colonne positive ne présente qu'une pente de potentiel relativement faible.

L'analyse des striations dans la colonne positive permet d'estimer le champ électrique à l'intérieur du plasma et de comparer ce champ à celui d'un dispositif sans ionisation.

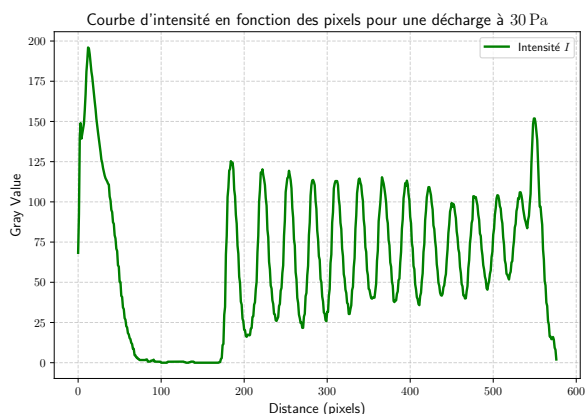


FIGURE 5 – Courbe d'intensité en fonction des pixels pour une décharge à 30 Pa.

Les mesures montrent que la présence du plasma modifie fortement la répartition du champ électrique par rapport au cas d'un condensateur plan.

Étude de la lueur négative

L'objectif de cette étude est d'estimer l'étendue spatiale de la zone où le potentiel électrique augmente à proximité de la cathode, en particulier dans la région de la lueur négative. Cette zone joue un rôle essentiel dans les mécanismes d'ionisation primaire et dans la distribution du champ électrique dans la décharge.

Pour les trois valeurs de pression où la lueur négative est visible, c'est-à-dire 10 Pa, 30 Pa et 45 Pa des photographies sont prises à proximité immédiate de la cathode. Ces pressions permettent d'observer une zone de lueur négative bien définie, plus étendue et plus lumineuse aux pressions intermédiaires.

Les images sont ensuite traitées avec le logiciel *ImageJ*. Le profil d'intensité lumineuse est extrait le long de l'axe du tube, depuis la cathode jusqu'à la limite de la colonne positive. On mesure notamment :

1. la longueur totale de la zone lumineuse associée à la lueur négative ;
2. la distance entre la cathode et le maximum d'intensité lumineuse dans cette zone.

On note cette distance x_{\max} , et la longueur totale de la lueur négative L_{LN} .

Pour chacune des pressions sélectionnées, l'analyse des profils d'intensité montre que :

1. la position du maximum de luminosité varie avec la pression ;
2. la longueur de la lueur négative diminue généralement lorsque la pression augmente ;
3. l'intensité maximale est obtenue à une distance non nulle de la cathode, liée à la dynamique d'accélération des électrons.

Les valeurs de L_{LN} et x_{\max} sont extraites pour chaque cas, permettant d'établir l'évolution spatiale des zones de champ fort dans la région cathodique.

La région de la lueur négative correspond à une zone où les électrons encore peu énergétiques commencent à ioniser le gaz, comme décrit dans les modèles classiques des régions cathodiques des décharges DC [1]. Le maximum de luminosité observé à la distance x_{\max} correspond à la position où le nombre d'excitations électroniques est maximal. Dans cette zone, la densité d'électrons augmente plus rapidement que leur énergie, produisant une forte émission lumineuse.

La réinterprétation en regard de la courbe de Paschen permet de rappeler que la tension de claquage dépend du produit pd . La position de la lueur négative varie donc selon les conditions de pression : lorsque pd se rapproche du minimum de Paschen, la zone de lueur négative est plus contractée, tandis que pour des valeurs éloignées du minimum elle peut devenir plus étendue.

La coloration distincte la colonne positive et la lueur négative s'explique par :

1. L'énergie moyenne des électrons, plus élevée près de la cathode, favorisant des transitions électroniques différentes dans les atomes du gaz.
2. La densité électronique, plus faible dans la lueur négative que dans la colonne positive, modifiant les probabilités de collisions et donc les raies spectrales dominantes.
3. La nature des excitations dominantes :
 - (a) dans la colonne positive, les électrons ont une énergie plus modérée, produisant des transitions caractéristiques du régime quasi neutre ;

- (b) dans la lueur négative, les électrons accélérés dans un fort champ électrique excitent des niveaux supérieurs, ce qui modifie la couleur émise.

Ces différences spectrales traduisent directement la répartition du champ électrique et des populations d'électrons dans les différentes régions de la décharge.

L'étude de la lueur négative permet d'identifier la zone d'augmentation significative du potentiel près de la cathode et d'observer comment sa structure dépend de la pression. L'analyse des distances caractéristiques et des couleurs émises enrichit la compréhension du rôle de cette zone dans la dynamique globale de la décharge et fournit une interprétation cohérente avec la courbe de Paschen et les régimes physiques associés.

Conclusion

Cette étude expérimentale a permis d'analyser la formation et la structuration d'un plasma généré par décharge lumineuse dans un gaz faiblement ionisé sous vide partiel. L'observation des différentes régions caractéristiques de la décharge met en évidence l'inhomogénéité spatiale du plasma, directement liée à la répartition du champ électrique et aux mécanismes d'ionisation et de recombinaison. La mesure de la tension de claquage en fonction de la pression est globalement conforme à la loi de Paschen, bien que des écarts quantitatifs subsistent en raison des limites expérimentales et des hypothèses idéalisées du modèle. L'étude électrique montre que le plasma ne se comporte pas comme un conducteur ohmique, mais présente une résistance dynamique dépendante du courant, caractéristique du régime de décharge normale.

L'analyse des striations de la colonne positive a permis d'estimer le champ électrique interne au plasma et de montrer qu'il est significativement inférieur au champ homogène théorique, ce qui souligne l'effet de quasi-neutralité du plasma et la concentration de la chute de potentiel dans les régions cathodiques. Ce travail illustre ainsi l'intérêt des décharges gazeuses comme système modèle pour l'étude expérimentale des plasmas et ouvre des perspectives vers des diagnostics plus précis des grandeurs microscopiques du milieu ionisé.

Références

- [1] Francis F. CHEN. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 3^e éd. Springer, 2016, p. 350-351.
- [2] R. G. GIBSON. « Experimental observation of ionization waves ». In : *American Journal of Physics* 51 (1983), p. 1028-1034.
- [3] V. A. LISOVSKI et AL. « Validating the Goldstein–Wehner law for the stratified positive column of dc discharge in an undergraduate laboratory ». In : *European Journal of Physics* 33 (2012), p. 1537-1548.
- [4] S. A. WISSEL et AL. « The use of dc glow discharge as undergraduate educational tools ». In : *American Journal of Physics* 81 (2013), p. 663-669.