



HAL
open science

Initiation à l'étude des plasmas froids dans le domaine aérospatial

Giacomo Galli, Valentin Mazieres, Cyril Cailhol, Naomi De Mejanès

► **To cite this version:**

Giacomo Galli, Valentin Mazieres, Cyril Cailhol, Naomi De Mejanès. Initiation à l'étude des plasmas froids dans le domaine aérospatial. La Revue 3E.I., 2022, 107 (110). hal-04266260

HAL Id: hal-04266260

<https://hal.science/hal-04266260>

Submitted on 31 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INITIATION A L'ETUDE DES PLASMAS FROIDS DANS LE DOMAINE AEROSPATIAL

GIACOMO GALLI, VALENTIN MAZIERES, CYRIL CAILHOL, NAOMI DE MEJANES, INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE, 10 AVENUE EDOUARD BELIN, 31055 TOULOUSE, FRANCE, GIACOMO.GALLI1235@GMAIL.COM

Résumé : Le plasma, qui est souvent vu comme le « quatrième état de la matière », possède de nombreuses applications dans divers domaines, dont le domaine aérospatial. Ces applications, ainsi que les plasmas correspondants, sont de natures très diverses. Ils sont utilisés par exemple pour de la combustion assistée par micro-onde pour des moteurs, ainsi que pour du contrôle d'écoulement, ou encore pour le traitement de surface de nombreuses pièces aéronautiques, mais aussi pour la propulsion de satellite dans l'espace.

Les étudiants de l'ISAE-SUPAERO sont déjà totalement immergés dans le domaine aérospatial. Ce cours constitue une ouverture sur la physique des plasmas froids. Il leur permettra d'acquérir une connaissance approfondie des méthodes requises pour contrôler et étudier un plasma DC, à travers des travaux expérimentaux et de simulation.

I/ Positionnement de l'activité

Le plasma, qui est souvent vu comme le « quatrième état de la matière », constitue, selon certaines estimations, la majorité de la matière connue de notre univers (autour de 99%). Sur Terre, on ne le rencontre pas à l'état naturel, si ce n'est dans les éclairs ou les aurores boréales, mais on le produit artificiellement par exemple en appliquant des champs électriques suffisamment élevés pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz (on dit que l'atome ou la molécule est *ionisée*). Dans notre vie quotidienne, les plasmas ont de nombreuses applications (micro-électronique, écrans plats de nos téléviseurs, ...), dont la plus familière est le tube néon qui éclaire nos salles de bain [1]. Suivant la température, le gaz peut être partiellement ou totalement ionisé (en fonction de la proportion d'atomes ou de molécules qui sont ionisés). Un plasma peut donc être considéré comme un mélange d'ions chargés positivement et d'électrons chargés négativement,

coexistant éventuellement avec des atomes et des molécules neutres. Par exemple, dans notre tube luminescent, les ions et les électrons sont peu nombreux par rapport aux atomes et aux molécules [2]. Par contre, dans les plasmas produits pour les expériences de fusion, le gaz est fortement ionisé, et les atomes et molécules sont en faible proportion, voire totalement absents dans le cœur de la décharge [3]. Dans les deux cas, il est possible de décrire les plasmas en s'inspirant de la mécanique des fluides, en utilisant des grandeurs macroscopiques habituelles, telles que densité, température, pression, vitesse d'écoulement (le modèle que l'on utilise alors pour décrire de plasma s'appelle « modèle fluide »). Les plasmas trouvent aussi de nombreuses applications dans le domaine aérospatial. Ces applications, ainsi que les plasmas correspondants, sont de natures très diverses. Ils sont utilisés par exemple pour de la combustion assistée par micro-onde pour des moteurs, ainsi que pour du contrôle

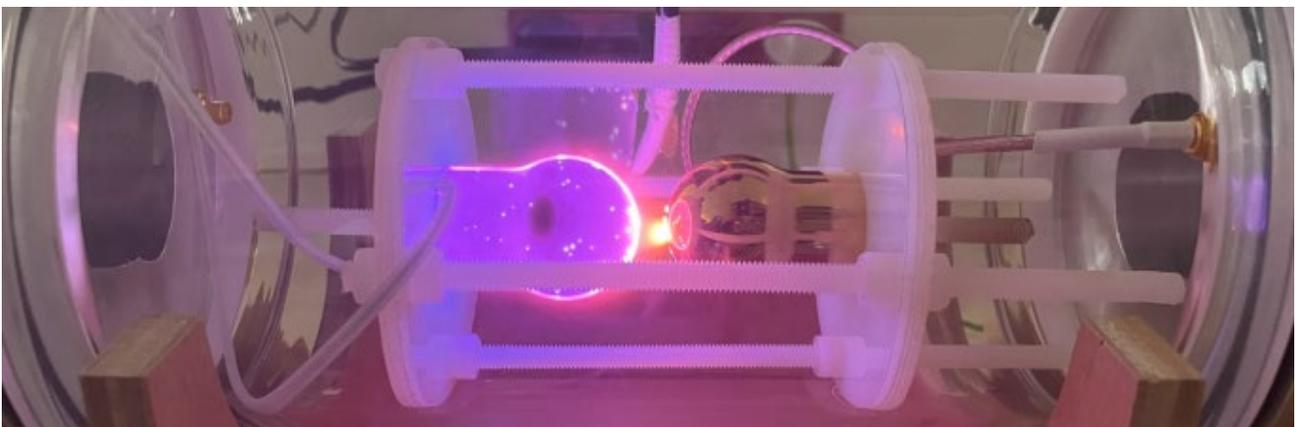


Figure 1 : Plasma DC à basse pression (~1Torr) allumé dans l'enceinte à vide conçue pour le cours « Initiation à l'étude des plasmas froids dans le domaine aérospatial ».

d'écoulement, ou encore pour le traitement de surface de nombreuses pièces aéronautiques, mais aussi pour la propulsion de satellite dans l'espace [4]. Le plasma est un milieu à la fois très intéressant et très complexe, et le but de ce cours est de donner aux étudiants un premier aperçu de la physique de ces objets.

Le cours présenté dans cet article propose une structure basée sur l'expérience (70%), avec une part de simulation (20%) et quelques rappels théoriques (10%).

L'idée derrière le cours est de familiariser les étudiants :

- aux techniques pour contrôler et mesurer la pression dans un espace confiné,
- aux techniques et les problèmes liés au contrôle du champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes, y compris grâce à l'utilisation de simulations de champs électrostatiques,
- à la génération du plasma et à son étude paramétrique en faisant varier les conditions externes (pression ou type de gaz, tension ou puissance, géométrie des électrodes, polarité, matériau, ...).

Chaque compétence est utilisée avec l'objectif final de créer et contrôler un plasma stable dans la chambre d'expérience (figure 1).

II/ Moyens mis en œuvre avec détail des coûts

Pour toutes les simulations électrostatiques nous avons choisi d'utiliser ANSYS Maxwell, logiciel qui était déjà à disposition de l'ISAE-SUPAERO. En tout état de cause, le même type de simulations (avec les mêmes résultats) aurait été possible par exemple avec COMSOL Multiphysics.

Une pompe « EDWARDS nEXT turbomolecular pumping stations » a été utilisée pour obtenir le vide nécessaire aux expériences de conductance (~0.1 mTorr) ainsi qu'aux expériences plasma (~0.1 Torr). Deux sondes « Pfeiffer VACUUM CMR 361 et 364 » de pression ont été utilisées pour mesurer la pression dans la chambre à vide.

Une alimentation électrique DC flottante « MAGNA-POWER XR Series (2kV, 2A) » a été utilisée pour créer la différence de potentiel (champ électrique) entre les deux électrodes. Une sonde de tension « TECPEL DP-25 High Voltage Differential Probe 25MHz » a été utilisée pour mesurer la différence de potentiel entre les deux électrodes.

La chambre d'expérience consiste en un seul bloc de verre cylindrique avec trois raccords pour le pompage et pour l'alimentation électrique (figure 2).

Le Tableau 1 liste les différents appareils expérimentaux spécifiques à l'allumage de plasmas basse pression utilisés dans le cours ainsi que leurs fonctions. De plus, le prix de chaque instrument est aussi mentionné pour permettre au lecteur d'avoir une idée des coûts derrière la conception d'un tel cours.

Nom	Fonction	Prix
EDWARDS nEXT turbomolecular pumping stations	Diminution de la pression dans la chambre d'expérience	8000 €
Pfeiffer VACUUM CMR 361 et 364	Mesure de la pression dans la chambre d'expérience	3000 €
MAGNA-POWER XR Series	Créer une différence de potentiel entre les électrodes	7000 €
Chambre d'expérience en verre	Confiner le gaz à basse pression	1600 €

Tableau 1. Matériel utilisé, coûts et objectifs.

Pendant le cours, d'autre matériel d'expérimentation moins spécifique à l'allumage de plasma, tel que des sondes, des câbles et des oscilloscopes sont aussi utilisés pour détecter/afficher les tensions et les courants des différents montages électriques, ainsi que des ordinateurs qui sont utilisés pour effectuer des simulations.

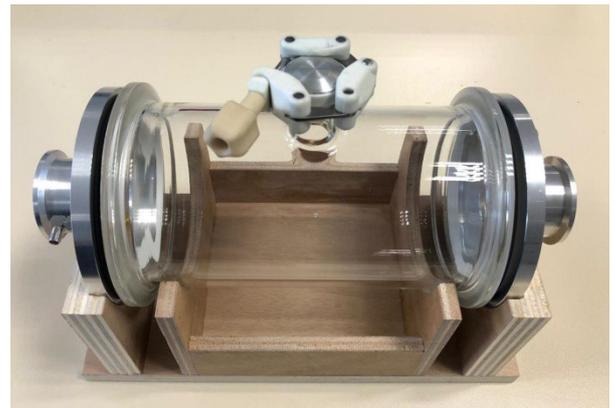


Figure 2. Chambre à vide en verre pour permettre les manipulations plasma et ajuster la pression.

III/ Configuration expérimentale

La figure 3 montre un schéma du dispositif expérimental. Il est constitué d'une enceinte à vide dans laquelle deux électrodes sphériques en cuivre ont été placées à une distance d'environ 5,5 mm. L'air gazeux à l'intérieur de la chambre pouvait être pompé jusqu'à une pression de l'ordre de 50 mTorr. Un champ électrique intense est généré entre les deux électrodes à l'aide d'une alimentation flottante en courant continu haute tension MAGNA-POWER XR Series ($\pm 2\text{kV}$, 2A). Une résistance de protection de 2 k Ω a été placée entre l'alimentation et l'électrode non à la masse, pour limiter le courant pendant la décharge électrique (la limitation des courants rend le système plus sûr pour les utilisateurs et réduit les dommages causés aux électrodes par la décharge elle-même). La tension et le courant ont été surveillés à l'aide d'une sonde haute tension et d'une

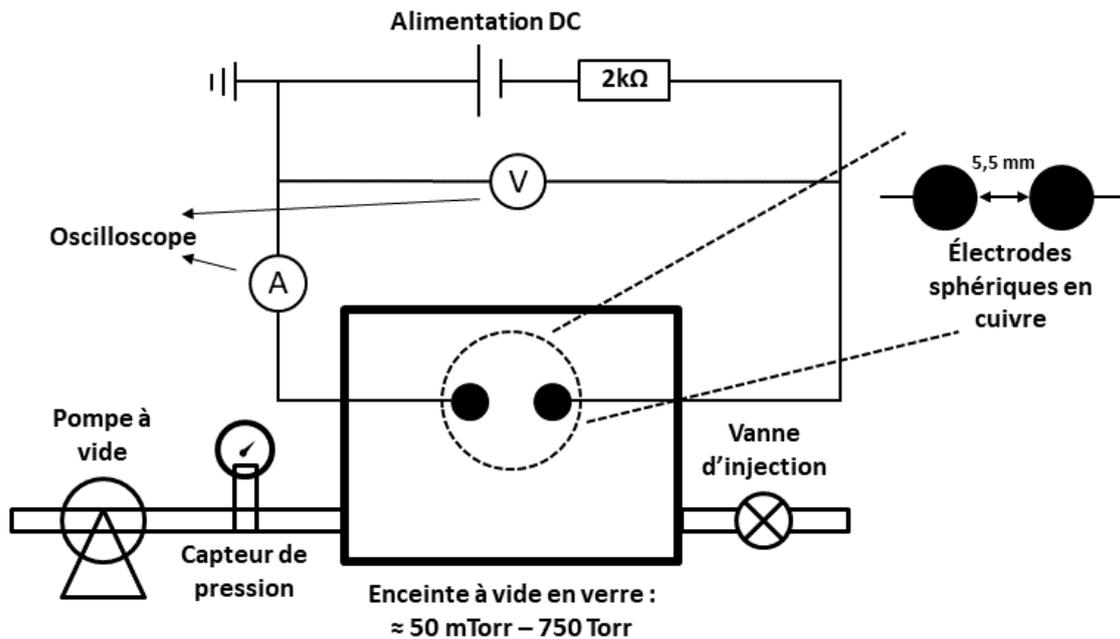


Figure 3. Montage expérimental pour la mesure de la tension d'amorçage et d'extinction de la décharge partielle.

sonde de courant, toutes deux connectées à un oscilloscope.

La tension de claquage de la décharge plasma a été mesurée de trois manières différentes, en augmentant progressivement la tension appliquée jusqu'à l'observation :

1. d'un courant sur la sonde de courant,
2. d'une chute de tension sur la sonde de tension,
3. de la détection visuelle de la lumière émise par le plasma.

Ces trois méthodes ont été choisies car, en fonction du type de plasma généré (pression, forme des électrodes ou type de gaz), ils ne sont pas tous en mesure de détecter la tension de claquage. A titre d'exemple, à la distance choisie (5,5 mm) et avec deux électrodes sphériques, en dessous d'une pression de 500 mTorr, seule la détection visuelle est efficace.

Une fois la tension de claquage mesurée, la tension a ensuite été lentement réduite jusqu'à ce que la disparition du courant soit observée, et la tension d'extinction a été enregistrée. Cette même procédure a ensuite été utilisée pour différentes pressions de gaz. Enfin toute cette séquence de mesures a été répétée deux fois afin d'avoir trois mesures pour chaque condition expérimentale.

IV/ Consignes

Le cours dure 20 heures, les étudiants (3 pour chaque groupe de TP) sont encadrés la moitié du temps (~10 heures) par deux enseignants. Pendant les 10 heures restantes, les étudiants effectuent des recherches ou simulations en autonomie. Dans le cas des expériences en laboratoire, la tension est appliquée en présence d'au moins un des professeurs, ensuite (si rien ne change dans le circuit électrique) les étudiants sont libres de continuer à manipuler de manière autonome.

IV.1/ Compétences visées

- C01 : Créer un système à partir d'un cahier de charge
- C02 : Être capable de contrôler la pression dans un espace confiné
- C03 : Comprendre les problèmes liés au contrôle du champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes en termes d'uniformité et d'intensité
- C04 : Simuler le champ électrique entre deux électrodes
- C05 : Comprendre les mécanismes qui régissent la génération des plasmas froids et leurs caractéristiques en fonction de paramètres externes (pression ou type de gaz, tension ou puissance, géométrie des électrodes, polarité, matériau, ...)

IV.2/ Critères d'évaluation

- Volonté et curiosité.
- Autonomie des binômes/trinômes dans le travail à effectuer (recherches, simulations et manipulations).
- Création et fonctionnement de l'expérience.
- Qualité du travail et de la participation pendant le cours.
- Qualité du compte rendu en termes :
 - Présentation et rédaction
 - Justifications et commentaires des choix effectués et des résultats obtenus
 - Capacité de synthèse

V/ Présentation générale

Le cours présenté dans cet article sera divisé en quatre parties :

1. Présentation des plasmas froids (décharge électrique) et loi de Paschen.
2. Techniques du vide.
3. Techniques du contrôle de l'alimentation électrique.

4. Expérience plasma.

Pour une grande partie des sujets présentés, des supports ont été construits pour les étudiantes et seront joints à l'article.

V.1/ Présentation des plasmas froids (décharge électrique)

Une décharge électrique peut se produire lorsqu'un électron germe (initialement présent dans le gaz) accéléré par un champ électrique acquiert une énergie supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes/molécules du gaz, conduisant à une avalanche électronique. Les sources naturelles d'électrons germes comprennent les rayons cosmiques et la photo-ionisation.

En supposant la présence d'électrons germes, les conditions qui conduiront à une avalanche d'électrons sont décrites par la loi de Paschen [5-7] (1) :

$$V = \frac{B \times P \times d}{\ln(A \times P \times d) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (1)$$

où P et d sont respectivement la pression du gaz de remplissage de l'enceinte et la distance inter-électrodes, γ est le coefficient d'émission secondaire (le rendement des électrons provenant de l'impact des ions positifs sur la cathode qui est normalement de l'ordre de 10^{-4} - 10^{-2}) et A et B sont des coefficients qui dépendent de la nature du gaz et qui sont présentés, pour les principaux gaz, dans le tableau I.

Table 1. Coefficients empiriques de la loi de Paschen [8]

	A (Torr ⁻¹ cm ⁻¹)	B (V Torr ⁻¹ cm ⁻¹)
H_2	5	130
N_2	12	342
Air	15	365
He	3	34
Ne	4	100
Ar	14	180
Xe	26	350

La figure 4 montre les courbes de Paschen pour différents gaz. L'abscisse est le produit de la pression par la distance inter-électrode, et l'ordonnée est la tension au-dessus de laquelle une décharge pourrait se produire. La tension de décharge passe par une valeur minimale de l'ordre de quelques centaines de volts, selon le type de gaz.

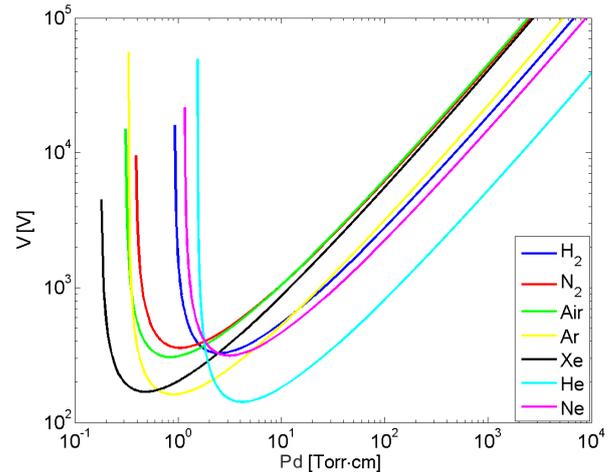


Figure 4. Courbe de Paschen pour différents gaz.

La loi de Paschen est dérivée pour un cas d'électrodes planes infinies, en d'autres termes, pour le cas d'un champ électrique uniforme.

A la fin de cette partie, les étudiants doivent être capables de comprendre et d'interpréter ces courbes de Paschen et ainsi de comprendre l'importance de contrôler la pression et le champ électrique pour amorcer un plasma froid

V.2/ Techniques du vide

Le vide est ordinairement défini comme l'absence de matière dans une zone de l'espace [9].

Pour le cours présenté dans cet article, nous allons explorer un niveau de vide allant de 10mTorr à la pression atmosphérique (750Torr).

Les étudiants sont donc d'abord initiés au système de pompage (figure 5), aux systèmes de mesure (figure 6) et aux erreurs de mesure de la pression.



Figure 5. Système de pompage utilisé, qui consiste en une pompe primaire, une turbopompe moléculaire et un système de contrôle électronique.



Figure 6. Sondes de pression à membrane utilisée (Pfeiffer VACUUM CMR 361 et 364) [10-11].

Deux sources principales d'erreurs de mesure de la pression peuvent être identifiées. La première vient de la précision de la sonde elle-même, qui est donnée sur la fiche technique de la sonde. La deuxième vient de la différence de pression qui peut être induite entre l'entrée et la sortie d'une connexion (en fonction de sa conductance). Dans ce cas la pression qui est lue au niveau de la sonde (entrée de la connexion) n'est pas une image fidèle de la pression présente dans l'enceinte à vide par exemple (sortie de la connexion).

V.2.1/ Conductances

La conductance (C) entre deux points d'une conduite est définie comme le débit de gaz traversant la conduite divisé par la chute de pression qui le met en mouvement.

En fonction du produit de la pression du gaz (P) et du diamètre de la conduite (d), le gaz peut se trouver dans différents régimes fluidodynamiques, dans lequel la conductance ne dépend pas des mêmes paramètres. Dans le régime turbulent ou laminaire ($P \cdot d \geq 0.02$) la conductance est donnée par :

$$C = \frac{\pi d^4}{12.8 \cdot \eta L} \left(\frac{P_2 + P_1}{2} \right) \quad (2)$$

alors que dans le régime moléculaire la conductance est donnée par :

$$C = \frac{10}{6} \sqrt{\frac{2\pi K T}{M}} \cdot \frac{d^3}{L} \quad (3)$$

avec η , K et M respectivement la viscosité du gaz (en bars), la constante de Boltzmann et la masse molaire (en kg/mol) et P_1 et P_2 la mesure de pression en deux points de la conduite entre lesquels la conductance va être calculée.

En utilisant deux sondes de pression identiques, trois raccords à vide d'un mètre de long et de différents diamètres (1mm, 16mm et 40mm), une pompe à vide et

tous les raccords nécessaires pour connecter les différents éléments, les étudiants font l'expérience de l'erreur de mesure entre l'entrée et la sortie d'une connexion, qui peut se produire lorsque l'on passe sans le savoir d'un régime laminaire ou turbulent (la valeur de la conductance dépend de la différence de pression entre deux points, comme dans la formule 2) à un régime moléculaire (la valeur de la conductance ne dépend plus de la pression moyenne entre deux points mais uniquement du diamètre et de la longueur de la canalisation, comme dans la formule 3).

V.3/ Techniques du contrôle de l'alimentation électrique

Une alimentation électrique (MAGNA-POWER XR Series) flottante à haute tension en courant continu a été utilisée pour alimenter les électrodes (figure 7).



Figure 7. Alimentation électrique utilisée pour générer la différence de potentiel entre les électrodes.

Les étudiants ont été sensibilisés aux dangers de la tension et du courant dans le cadre d'un cours théorique agrémenté d'exemples pratiques. Ensuite, les étudiants se sont familiarisés avec les commandes de l'alimentation électrique, qui, bien que capable de délivrer 2KV et 2A, a été limitée à 1KV et 500mA (ce qui a été considéré comme suffisant pour la poursuite du projet) pour des raisons de sécurité des étudiants ainsi que des équipements.

V.3.1/ Simulations électrostatiques

Historiquement, les paramètres A et B de la loi de Paschen présentés table 1 ont été obtenus empiriquement afin de décrire la tension de claquage entre deux électrodes plates infinies à une distance d (champ électrique parfaitement homogène).

En pratique, il n'existe pas d'électrodes de taille infinie, mais il est possible d'obtenir un champ électrique homogène en utilisant d'autres géométries. Pour choisir les types, la forme et la taille des électrodes, les étudiants se sont appuyés sur des simulations électrostatiques réalisées à l'aide d'ANSYS MAXWELL. Deux électrodes plates et deux électrodes sphériques ont ensuite été comparées.

Bien que l'utilisation de deux électrodes plates donne les meilleurs résultats en simulation en ce qui concerne l'homogénéité du champ électrique, les effets de bord ainsi que la difficulté à gérer le parallélisme (et donc la distance entre les électrodes) induisent une complexité plus élevée pour la conception du dispositif expérimental.

Les étudiants ont donc été invités à réfléchir à la taille des électrodes sphériques nécessaire pour obtenir

un champ électrique homogène sur un volume le plus élevé possible avec une distance entre elles de 6 mm.

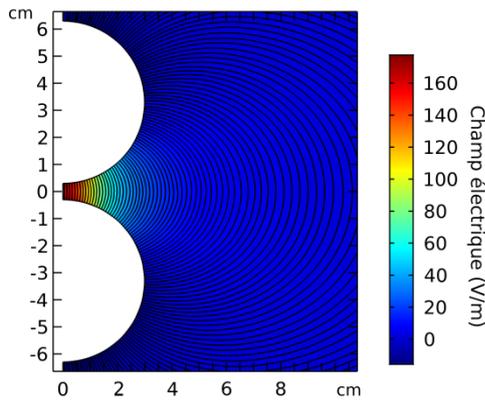


Figure 8. Simulation du champ électrique, par éléments finis, dans une géométrie sphère-sphère, avec une distance inter-électrodes de 6mm et un diamètre de sphère de 6cm.

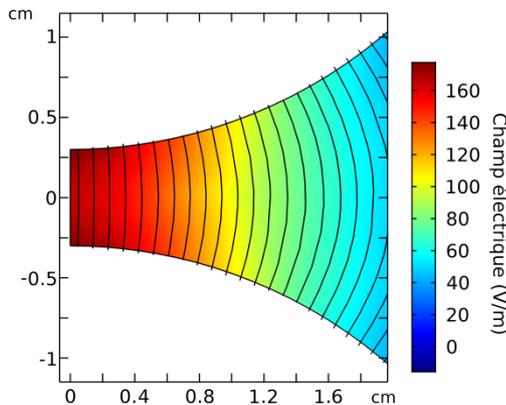


Figure 9. Zoom de la figure 8, entre $\pm 1\text{mm}$ en axe y et de zéro à 2mm en axe x .

Les résultats des simulations en figures 8 et 9 montrent comment le champ électrique, entre des électrodes sphériques de rayon 3cm, est relativement uniforme axialement sur la ligne centrale des sphères (entre 0 et 0.4cm de rayon, la variation horizontale verticale est inférieure à 2%). Ainsi, pour des décharges plasma amorcées pour des produits Pd supérieurs au minimum de la courbe de Paschen (partie droite des courbes de la figure 4) les résultats expérimentaux suivront le comportement prévu par la théorie, puisque les décharges seront toujours amorcées dans la région de « chemin » le plus court (*ie* la région où le champ est relativement uniforme). Par contre pour des produits Pd inférieurs au minimum de la courbe de Paschen (partie gauche des courbes de la figure 4), la valeur du champ de claquage trouvée expérimentalement sera toujours égale à celle du minimum de la courbe de Paschen (il existera toujours un « chemin » d'une certaine distance d le long duquel les conditions d'amorçages sont les plus favorables). On note ici la contrepartie de l'utilisation d'électrodes sphériques : la conception du dispositif est plus simple mais il n'est pas possible de tracer la « partie gauche » de la courbe de Paschen. Cela permet en revanche d'être sûr que les étudiants ont bien compris les « courbes de Paschen » pour être capable de comprendre ce qu'il se passe sur leur dispositif pour de

faibles valeurs de Pd (côté gauche de la courbe de Paschen).

Afin d'aller plus loin, les étudiants ont aussi à leur disposition une paire d'électrode « pointe-plan » pour investiguer l'influence d'un champ fortement non-uniforme dans une configuration non-symétrique. Cette configuration d'électrode a aussi été simulée par les étudiants.

V.4/ Expérience plasma

Au cours de l'expérience plasma, les étudiants sont mis au défi de tracer la courbe de Paschen et d'étudier le comportement du plasma froid pour différentes pressions et configurations d'électrodes.

Les électrodes utilisées seront de trois types :

- hémisphériques polies,
- hémisphériques sablées,
- point-plan.

Les sujets qui seront abordés sont les suivants :

1. La cause à la base de la luminosité du plasma,
2. La diffusion du plasma à différentes pressions et leurs causes,
3. La courbe de Paschen,
4. Les effets de pointe (renforcement du champ électrique).

Pour les points 1 et 2 ont été utilisées les électrodes hémisphériques polies (figure 10) car ce sont celles qui permettent le mieux d'obtenir des résultats conformes à la courbe de Paschen « classique » (électrodes plan-plan infinies). En effet, compte tenu de leur taille (6 cm de diamètre) et de la distance entre les électrodes (5,5 mm), ils créent un champ électrique relativement homogène entre les deux électrodes, comme l'ont démontré les simulations du chapitre V.3.1.



Figure 10. Électrodes hémisphériques avec polissage (à gauche) et sablé (à droite) à utiliser pendant ce cours.

Toutes les photos et graphiques qui seront présentés dans ce chapitre ont été obtenus par les étudiants du cours.

V.4.1/ La lumière du plasma

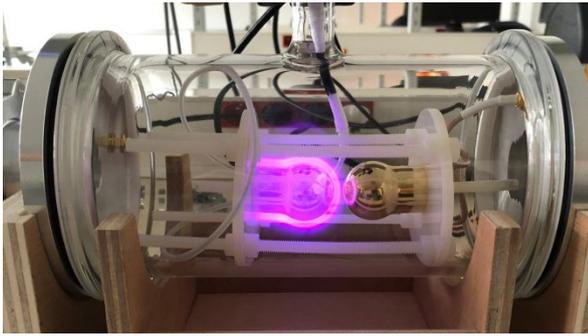


Figure 11. Plasma allumée dans l'air.

Dans le plasma, comme on l'a expliqué, il se produit des phénomènes d'ionisation, mais aussi des phénomènes d'excitation des atomes. C'est pourquoi, une fois que les électrons des atomes excités reviennent à leur état fondamental, ils émettent des photons dont la longueur d'onde dépend du saut d'énergie entre l'état excité et l'état fondamental.

Le spectre d'émission est donc dépendant du type de gaz utilisé.

Les étudiants ont pu allumer des plasmas dans différents gaz (Argon, air et néon) et ainsi observer les différences de couleur.

V.4.2/ La diffusion du plasma à différentes pressions et leurs causes

Le plasma froid, comme déjà mentionné, est dans ce cas généré par une avalanche d'électrons entre les deux électrodes. Ce sont donc les électrons qui ionisent la matière lorsqu'ils la traversent, perdent de l'énergie (vitesse) et génèrent d'autres électrons.

S'il n'y a pas d'intensification du champ électrique dû à une asymétrie entre les électrodes (les deux électrodes sont similaires) le plasma aura tendance à s'allumer sur la cathode (comme par exemple montré sur la figure 11).

La distance que les électrons peuvent parcourir entre deux collisions est inversement proportionnelle à la pression du gaz, donc le plasma est observé plus loin de la cathode à basse pression et plus près de la cathode à haute pression. En suivant la même procédure, à basse pression, le plasma sera moins lumineux, car l'énergie est répartie sur un plus grand volume, tandis qu'à haute pression, il sera plus lumineux, car l'énergie est répartie sur un plus petit volume.

Les étudiants ont pu en faire l'expérience directe (figure 12) en créant des plasmas dans l'air à différentes pressions et en observant le comportement des plasmas générés.

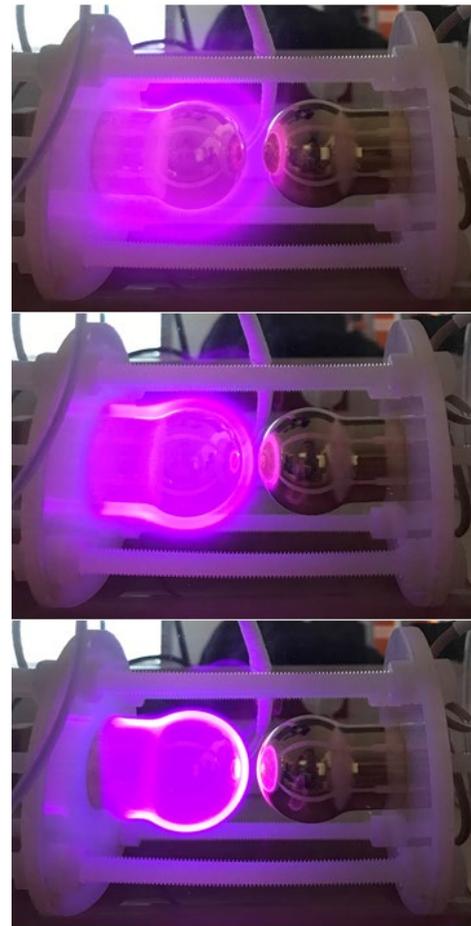


Figure 12. Evolution de la diffusion des plasmas générés dans l'air à : 100 mTorr (en haut), 1 Torr (au milieu), 10 Torr (en bas).

V.4.3/ La courbe de Paschen

La théorie de la courbe de Paschen a déjà été largement décrite dans le chapitre V.1. Les étudiants sont mis au défi de tracer la courbe de Paschen (avec les incertitudes de mesure), en suivant le protocole présenté à la figure 13.

Pour une pression donnée, le protocole a été appliqué trois fois afin de recueillir trois valeurs de tension de décharge, ce qui a ensuite permis de calculer une valeur moyenne et une barre d'erreur. L'erreur de pression a été prise en compte en considérant l'erreur intrinsèque de la sonde de pression utilisée. Il est important de noter que l'utilisation de seulement trois mesures pour calculer une moyenne ou une barre d'erreur sur la tension de claquage n'est bien sûr pas suffisante. Ce choix de trois mesures a été pris à cause de la contrainte de durée du cours, qui ne permettait pas aux étudiants de faire plus de mesures sur le temps qu'il leur était imparti. Ce point a été spécifié aux étudiants, l'important étant que ces derniers puissent vérifier expérimentalement que le phénomène de claquage a une composante statistique.

Les étudiants ont tracé la loi de Paschen pour deux géométries d'électrodes (sphère-sphère et point-plan) schématisées dans la figure 14.

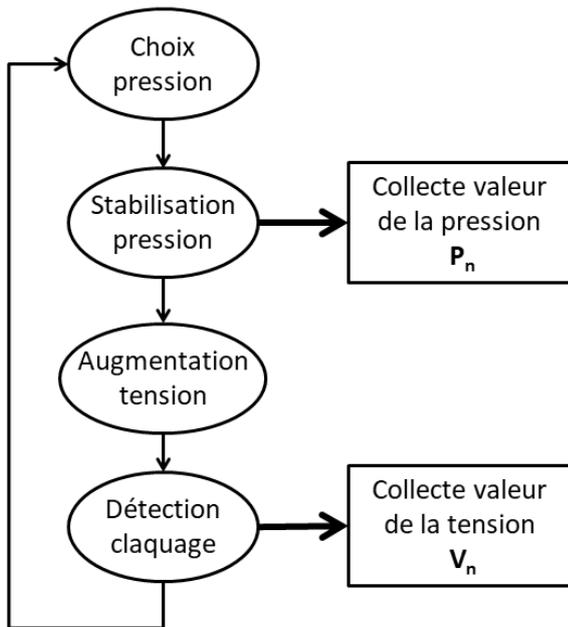


Figure 13. Protocole utilisé par les étudiants pour mesurer la tension de claquage afin de tracer la courbe de Paschen.

Comme expliqué précédemment, la géométrie sphère-sphère a été utilisée pour tracer une courbe de Paschen dans des conditions standards (champ électrique relativement homogène), tandis que la géométrie électrode point-plan a été utilisée pour explorer la courbe de Paschen dans des conditions de renforcement du champ électrique au niveau d'une électrode (champ électrique hétérogène).

Les étudiants ont ensuite tracé la courbe de Paschen pour les deux géométries d'électrodes qui leur ont été proposées, et les ont comparées à la courbe de Paschen théorique

Sur la figure 15 est tracé la comparaison des résultats expérimentaux avec la courbe de Paschen théorique, pour un claquage dans l'air et des électrodes sphère-sphère (polie-polie et sablée-polie). La courbe théorique a été tracée avec un coefficient d'émission secondaire $\gamma = 10^{-2}$ [12-13].

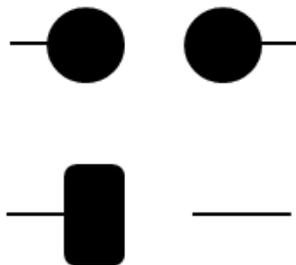


Figure 14. Schématisation des électrodes (distance inter-électrodes de 5.5 mm) utilisées par les étudiants pour mesurer la tension de claquage afin de tracer la courbe de Paschen.

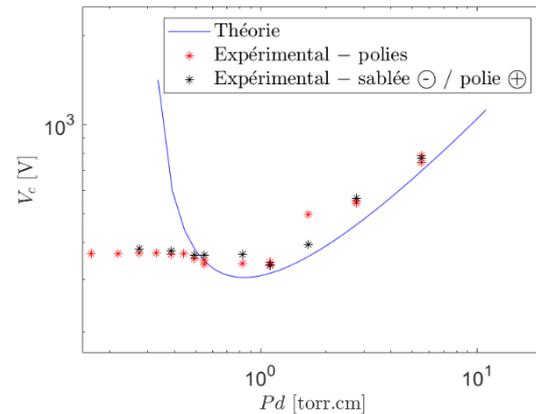


Figure 15. Courbe de Paschen théorique pour l'air (noir) et points expérimentaux sur la courbe de Paschen obtenus en faisant varier la pression du gaz dans la chambre expérimentale avec des électrodes sphère-sphère (polie-polie et sablée-polie)

Comme spécifié précédemment, les points obtenus à l'aide des électrodes sphériques devraient suivre le comportement de la courbe théorique pour des produits Pd supérieurs au minimum de Paschen et être constants pour les Pd inférieurs.

Comme attendu, les étudiants ont immédiatement observé que les points en question suivent relativement fidèlement la courbe théorique en ce qui concerne le minimum Paschen et le bras droit de la courbe. De plus, les points obtenus sont bien constants sur la « partie gauche » de la courbe.

Les étudiants ont ensuite étudié l'influence de l'état de surface des électrodes (polie ou sablée) sur les courbes de Paschen. Les étudiants ont pu se rendre compte visuellement que les décharges plasmas n'étaient pas de même nature selon les états de surfaces (des points localisés scintillants dans le cas des électrodes sablées). Cela est certainement dû à des concentrations locales de champ électrique avec les électrodes sablées. En revanche, pour notre dispositif expérimental, l'état de surface n'a pas un impact significatif sur les courbes de Paschen expérimentales (comme le montre par exemple la figure 15 pour un cas sablée-polie).

Pour finir, les étudiants se sont aussi intéressés à la configuration pointe-plan. Cette configuration est souvent étudiée puisqu'elle représente un problème de décharges parasites que l'on trouve dans divers domaines, par exemple dû à un défaut de fabrication induisant une forte intensification du champ électrique. Ils ont pu alors observer l'influence de l'intensification du champ dû à la présence de la pointe. De plus, dû à la forte asymétrie de la configuration, ils ont pu se rendre compte de l'influence de la polarité des électrodes sur la décharge plasma obtenue.

VI/ Conclusion

Ce cours est réalisé en fin de second semestre de première année et a pour objectif d'initier les étudiants à la physique des plasmas froids.

A la fin du cours, les étudiants ont préparé une présentation de 15 minutes suivie de 5 minutes de questions pour mettre en forme ce qu'ils avaient appris pendant le cours.

Bien que n'ayant qu'une compréhension approximative des plasmas, les étudiants ont beaucoup apprécié le cours, les exemples et les manipulations proposés, et lorsqu'ils ont été interrogés sur les différents aspects de la création, de la stabilisation et du développement d'un plasma froid, ils ont pu fournir des réponses adéquates.

Le cours en question, comme indiqué dans le titre et l'introduction, vise à initier les étudiants et non à fournir une compréhension complète des plasmas froids

Sur la base des commentaires des étudiants à la fin du cours, pour les années à venir, nous essaierons de varier beaucoup plus les manipulations en ajoutant la création et la stabilisation de plasmas inductifs, ainsi que l'initiation des étudiants à la spectrométrie d'émission optique.

VII/ Bibliographie

- [1] D. A. Gurnett, A. Bhattacharjee, « Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications », Cambridge University Press, 2005.
- [2] F. Llewellyn-Jones, « The Glow Discharge: And an Introduction to Plasma Physics », London, Methuen; New York, Wiley, 1966.
- [3] Jean-Marcel Rax, Bernard Bigot, « Physique des plasmas : Cours et applications », Dunod, 2005.
- [4] Stéphane Mazouffre 2016 Plasma Sources Sci. Technol. 25 033002.
- [5] J.M Meek and J. D. Craggs, « Electrical Breakdown of gases », Wiley, 1978.
- [6] E. Badareu and I. Popescu, « Gaz ionisés : décharges Electriques dans les Gaz », Editions Dunod (1965).
- [7] A. E. D. Heylen, « Sparking Formulae for Very High-Voltage Paschen Characteristics of Gases », IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, 2006.
- [8] R Altenburger, C. Heitz and J. Timmer, « Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach », Journal of physics D: applied physics, 2002.
- [9] Pfeiffer-vacuum, Introduction to Vacuum Technology, <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/introduction-to-vacuum-technology/general/vacuum-definition/>
- [10] Pfeiffer-vacuum, CMR 361, 1000 hPa F.S., DN 16 CFR, <https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PTR24602.en.pdf>.
- [11] Pfeiffer-vacuum, CMR 364, 1 hPa F.S., 8 VCR, <https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PTR24633.de.pdf>.
- [12] A.A. Martins, M.J. Pinheiro, On the propulsive force developed by asymmetric capacitors in a vacuum, Physics Procedia, Volume 20, 2011,

Pages 112-119, ISSN 1875-3892
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.08.010>.

- [13] Yuri P. Raizer, Gas Discharge Physics, Springer Berlin, Heidelberg, 1991.