

Filière Systèmes industriels

Orientation Power & Control

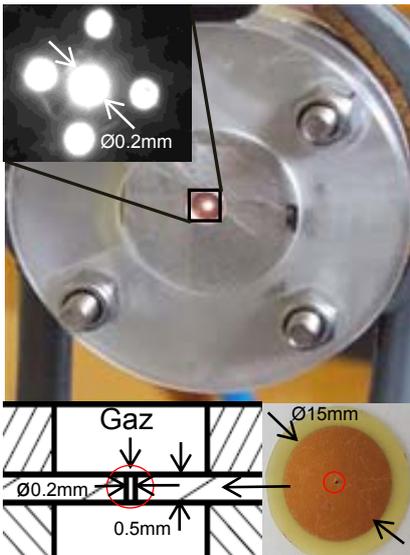
Travail de bachelor Diplôme 2016

Yohan Cordonier

Source de plasma ponctuelle

- *Professeur*
Christoph Ellert
- *Expert*
Hans-Peter Biner
- *Date de la remise du rapport*
15.07.2016

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.



Flux de gaz passant à travers le plasma.
On alimente les pastilles de cuivre imprimées des deux côtés du PCB pour générer un plasma dans le trou.

Travail de diplôme | édition 2016 |



Filière
Systèmes industriels

Domaine d'application
Power & Control

Professeur responsable
Christoph Ellert
Christoph.Ellert@hevs.ch

Source de plasma ponctuelle

Diplômant

Yohan Cordonier

Objectifs du projet

Designer et concevoir la mécanique d'un dispositif permettant la création de plasma dans différents supports à cathode creuse.
Faire des tests avec différentes alimentations (MHz, kHz, DC) afin d'analyser le comportement du plasma et d'obtenir les écarts énergétiques en fonction de certains paramètres.

Méthodes | Expériences | Résultats

La mécanique du dispositif a été confectionnée afin d'obtenir un système compact, résistant en température, permettant la circulation d'un flux de gaz et la génération de plasma dans différents supports à cathode creuse interchangeable. Pour ce projet, des trous de 0.2mm de diamètre sont utilisés comme sources ponctuelles de plasma afin d'exploiter le principe de cathode creuse.

Des mesures de tensions et courants ont été faites sur les plasmas obtenus en variant différents paramètres tels que le matériau et l'épaisseur des électrodes, la distance entre elles, la fréquence de l'alimentation, le nombre de trous, le gaz utilisé, etc. Ces mesures démontrent avec quels paramètres la génération du plasma nécessite le moins de puissance. Elles dévoilent par exemple qu'un plasma généré avec un flux d'hélium nécessite moins de puissance (0.5W) qu'un plasma généré avec un flux d'argon (1.7W).

Un plasma a également été généré dans un PCB avec cinq trous de 0.2mm de diamètre à 8kHz. A l'œil nu, le plasma semble constant et réparti dans les cinq trous. Par contre, une caméra haute vitesse (120'000 images/sec) montre que le plasma «clignote» et se génère alternativement dans un seul trou à la fois.

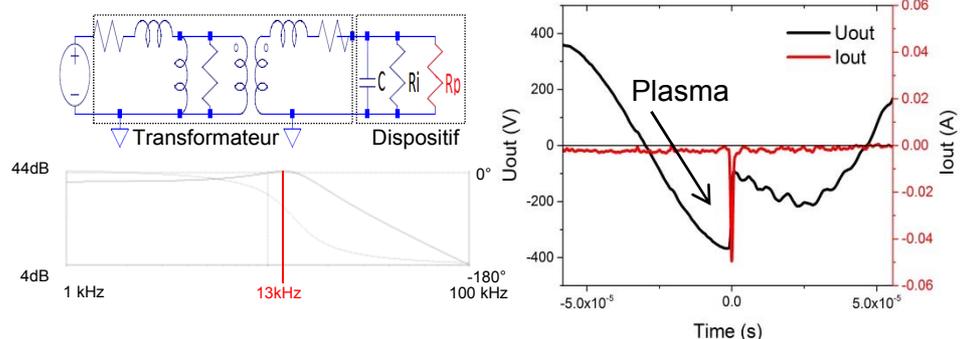


Schéma électrique et la réponse en fréquence. Avec 'C' la capacité du PCB, 'Ri' la résistance d'isolation et 'Rp' la résistance qui apparaît lors de la génération d'un plasma.

Tension et courant mesurés sur un plasma. Le pic de courant est dû à la bonne conductivité du plasma lorsqu'il est généré. Quand le courant circule dans le plasma, la tension chute.

Table des matières

Travail de bachelor	1
Diplôme 2016	1
<i>Source de plasma ponctuelle</i>	1
2	
1 Introduction.....	6
1.1 <i>Descriptif</i>	6
1.2 <i>Cahier des charges</i>	7
2 Rappel source de plasma.....	8
3 Origine du projet.....	9
3.1 <i>Principe de la cathode creuse avec électrode en aluminium</i>	9
3.2 <i>Principe de la cathode creuse avec électrode usinée sur PCB</i>	10
3.3 <i>Avec électrode à plusieurs trous submillimétriques</i>	11
4 Conception Mécanique.....	12
4.1 <i>Généralité</i>	12
4.2 <i>Electrode à trou submillimétrique en aluminium</i>	13
4.3 <i>Electrode à trou usinée sur PCB</i>	15
4.4 <i>Problèmes survenus et corrections apportées</i>	16
5 Mesures et tests	17
5.1 <i>Alimentation KHz basse tension</i>	17
5.1.1 Descriptif.....	17
5.1.2 Tests et mesures effectués.....	18
5.1.3 Résultats obtenus	19
5.2 <i>Alimentation MHz</i>	23
5.2.1 Descriptif.....	23
5.2.2 Tests et mesures effectués.....	25
5.2.3 Résultats obtenus	25
5.2.4 Observations.....	28
5.2.5 Problèmes rencontrés.....	29
5.3 <i>Alimentation KHz Haute tension</i>	30
5.3.1 Descriptif.....	30
5.3.2 Tests et mesures effectués.....	31
5.3.3 Résultats obtenus	31
5.4 <i>Schéma électrique équivalent du dispositif avec transformateur KHz</i>	49
5.5 <i>Comparaison du comportement en fréquence</i>	50
5.6 <i>DC continu et DC pulsé</i>	51
6 Orientations futures	52
6.1 <i>Mécanique</i>	52
6.1.1 Dispositif avec électrode céramique	52
6.1.2 Dispositif avec mise sous vide.....	52
6.2 <i>Alimentation MHz</i>	52

6.2.1	Obtenir un claquage en MHz	52
6.2.2	Obtenir un plasma dans plusieurs trous simultanément	52
7	Conclusion.....	53
8	REMERCIEMENTS.....	54
9	Date et signature	54
10	References	54
11	Annexes	55

1 INTRODUCTION

1.1 Descriptif

De nos jours, les sources de plasma sont utilisées par de nombreuses technologies issues de la production industrielle, par exemple : pour la production de semi-conducteur, le traitement des matériaux, la découpe du verre ou la séparation des molécules composant un gaz. Le premier objectif de ce travail de diplôme est de designer et concevoir la mécanique d'un dispositif permettant la génération de plasma dans une source ponctuelle. Pour ce projet, des trous submillimétriques sont utilisés comme source ponctuelle afin d'exploiter le principe de cathode creuse. C'est une technologie encore nouvelle et peu explorée, quelques études ont été réalisées sur ce procédé et ces études déclarent qu'avec cette source ponctuelle, la puissance nécessaire pour générer un plasma serait plus basse qu'avec les sources de plasmas déjà existantes dans l'industrie. Les tests et les mesures réalisés lors de ces études n'ont été faits qu'avec un certain nombre de gaz et avec une plage de fréquence spécifique. L'objectif de ce projet est d'expérimenter cette technologie avec une mécanique plus adaptée, des flux de gaz différents et une plage de fréquences plus large. La mécanique de ce système doit être compacte, résistante en température et doit permettre le passage d'un flux de gaz dans le plasma. Mais surtout, le montage du dispositif doit permettre la possibilité de changer facilement le support à trou submillimétrique dans lequel va être généré le plasma. La suite du projet consiste à réaliser une multitude de tests et mesures sur les plasmas générés dans différents supports à trou submillimétrique. Ces mesures permettent d'obtenir la valeur de la puissance nécessaire pour générer un plasma et de déterminer en fonction des différents paramètres de réglage, quels sont la mécanique, le flux de gaz et l'électronique de puissance les plus adaptés pour optimiser cette puissance nécessaire.



Figure 1 : Source de plasma ponctuelle avec pointe

1.2 Cahier des charges

- Designer la mécanique du dispositif à trou submillimétrique sur Inventor
- Faire usiner et assembler le dispositif à l'atelier mécanique
- Commander le matériel nécessaire
- Mesurer l'impédance et le déphasage du dispositif à trou submillimétrique alimenté en kHz basse tension
- Déterminer le schéma électrique équivalent du dispositif à trou submillimétrique
- Tester l'alimentation MHz sur les dispositifs de plasma
- Mesurer la puissance dissipée dans les différents dispositifs lors des tests en MHz
- Déterminer s'il y a une résonance électrique sur les différents dispositifs lors des tests en MHz
- Tester l'alimentation kHz avec transformateur haute tension sur le dispositif à trou avec différents flux de gaz
- Déterminer s'il y a une résonance électrique sur les différents dispositifs lors des tests en kHz avec transformateur haute tension
- Mesurer la puissance dissipée dans les différents dispositifs lors des tests en kHz haute tension
- Déterminer le schéma électrique équivalent du dispositif à trou connecté au transformateur haute tension
- Simuler le comportement en fréquence du dispositif à trou connecté au transformateur haute tension sur LTspice
- Tester les alimentations DC et DC pulsé haute tension sur le dispositif à trou
- Mesurer la puissance dissipée dans les différents dispositifs lors des tests en DC et DC pulsé
- Comparer la valeur de la puissance nécessaire à générer un plasma dans les différents dispositifs.
- Déterminer quel est le meilleur design, la meilleure électronique de puissance et le meilleur flux de gaz pour optimiser l'efficacité énergétique
- Documenter le projet

2 RAPPEL SOURCE DE PLASMA

Le plasma se forme dans un gaz ou dans un isolant électrique lorsque celui-ci est soumis à une haute température (environ 2000°C) ou lorsqu'on applique une tension très élevée à ses bornes, c'est-à-dire lorsqu'on le soumet à un champ électrique intense. Le champ électrique dépend également de la distance entre les bornes. La pression environnante et le matériau ou le gaz dans lequel est généré le plasma influencent également les conditions pour obtenir un claquage.

Le fonctionnement est le suivant : on met deux électrodes aux bornes d'un gaz électriquement neutre. Grâce au champ électrique, on accélère les électrons d'une électrode à l'autre à travers le gaz. Ces mêmes électrons vont alors percuter les charges neutres composant le gaz. Si lors de cette collision, les électrons ont une énergie cinétique supérieure à l'énergie qui rattache les autres électrons à leur atome de charge neutre, ces mêmes atomes de charge neutre vont perdre des électrons et vont être chargés positivement (on dit qu'ils se ionisent). Ces électrons perdus vont à leur tour percuter d'autres charges neutres qui vont à nouveau perdre des électrons, et ainsi de suite. On appelle cela l'effet avalanche. Lorsque l'ionisation est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit assez élevé par rapport à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide très conducteur que l'on appelle plasma.

Du fait de leurs propriétés réactives, les plasmas ont de nombreux domaines d'application : découpe du verre, traitement d'un gaz, séparation de molécules, traitement de surface des matériaux, etc.

Lors du projet de semestre [1] réalisé en début d'année, une source de plasma ponctuelle avec une pointe a été étudiée. Cette étude a permis de démontrer quelles sont les typologies d'électronique de puissance qui permettent la génération de plasma. Ce travail nous a également donné un ordre de grandeur sur la puissance nécessaire à générer un plasma et la valeur de la tension de claquage en fonction de la distance entre les électrodes.



Figure 2 : Plasma entre une pointe et une plaque

3 ORIGINE DU PROJET

L'idée de ce projet est basée sur l'objectif d'obtenir un plasma peu onéreux. On entend par là que l'on voudrait un plasma généré avec une faible puissance.

Les études existantes [4][5][6] (disponibles en annexe) démontrent que la puissance nécessaire à générer un plasma est moins importante si celui-ci est généré dans un trou submillimétrique.

Dans ces documents, il a été expérimenté que le diamètre du trou afin d'y générer un plasma varie en fonction de la pression. Ces études décrivent alors la relation suivante : pour une pression de 0.1 bar, le diamètre optimal du trou pour obtenir un plasma est de 5 à 10mm. Comme dans ce projet, les expériences sont réalisées à pression atmosphérique (1 bar), le diamètre optimal du trou pour obtenir un plasma se situe aux environs de 0.2mm.

3.1 Principe de la cathode creuse avec électrode en aluminium

Le but est le suivant : on alimente deux électrodes en aluminium avec une haute tension afin de créer un plasma dans un trou submillimétrique usiné dans l'une d'entre elles. Les électrons vont se déplacer de l'électrode négative avec le trou jusqu'à la contre électrode positive. Les charges positives (charges neutres ionisées par l'effet avalanche) vont se déplacer de manière inverse aux électrons.

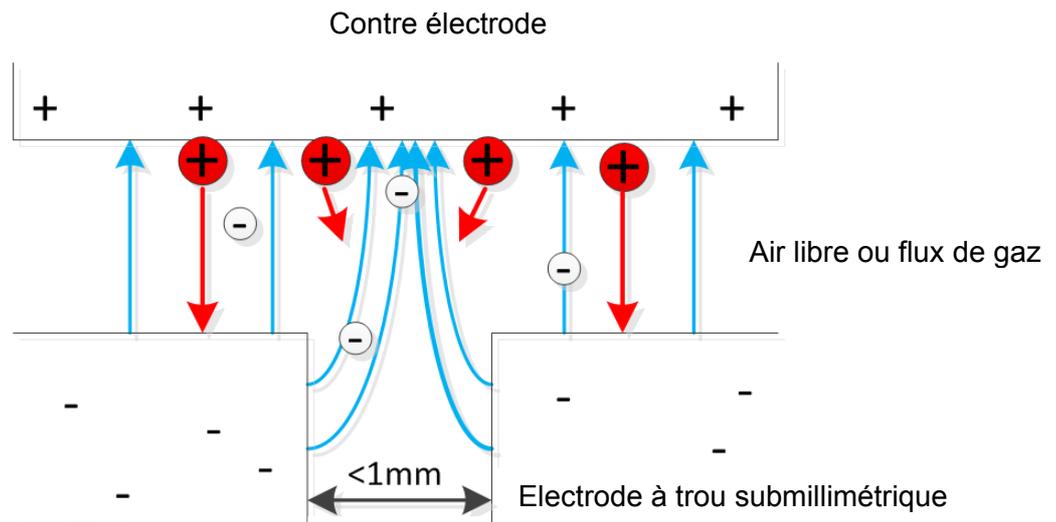


Figure 3 : Déplacement des électrons dans un trou submillimétrique en aluminium

Les charges positives, étant beaucoup plus lourdes que les électrons, vont se déplacer beaucoup plus lentement que ceux-ci. Le trou submillimétrique formé dans l'électrode négative va créer une agglomération des charges positives en forme de cône. Ce cône positif va attirer les électrons disposés à la surface du trou. Ceux-ci ne se déplaceront plus de manière verticale mais horizontale, ce qui devrait générer un plasma horizontal dans le trou. Ce phénomène à haute fréquence (jusqu'au MHz) devrait créer un effet pendulaire (résonance électrique) et permettre la génération d'un plasma avec une petite puissance. Bien entendu, ceci est théorique. Pour vraiment comprendre le phénomène et être sûr que cela fonctionne, il faut réaliser des mesures et des tests sur un dispositif réel.

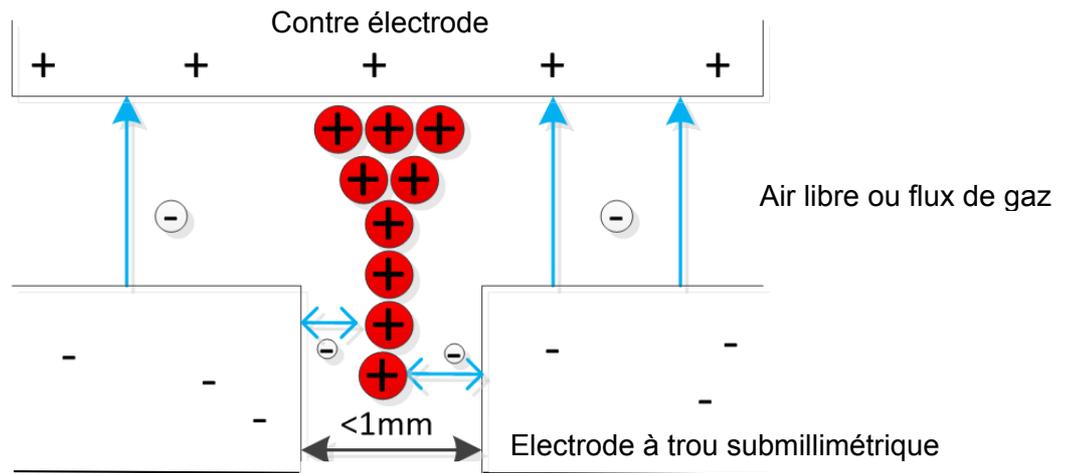


Figure 4 : Déplacement des électrons avec effet pendulaire

Les applications devraient être les mêmes qu'avec les autres sources de plasma traditionnelles (traitement de gaz, de surface, de matériau), mais avec une puissance nécessaire plus basse pour générer un plasma.

3.2 Principe de la cathode creuse avec électrode usinée sur PCB

On utilise deux électrodes en cuivre imprimées sur un PCB dans lequel est usiné un trou submillimétrique. On alimente ces électrodes avec une haute tension alternative (kHz, MHz) afin de créer un plasma dans le trou. Les électrons vont se déplacer de la contre électrode négative jusqu'à l'électrode positive et vis-versa. Les charges positives (charges neutres ionisées par l'effet avalanche), beaucoup plus lourdes que les électrons, vont se déplacer plus lentement. Lorsque l'on alimente avec une fréquence élevée (de kHz à MHz), le changement de polarité est tellement rapide que les charges positives n'ont pas le temps de changer de direction et vont donc rester à l'intérieur du trou. Par contre, le changement rapide de polarité va faire que les électrons vont se déplacer alternativement entre les électrodes de cuivre jusqu'à la colonne de charges positives créée au centre du trou. Ce déplacement à haute fréquence va créer un effet pendulaire qui devrait permettre la génération d'un plasma avec une puissance peu élevée.

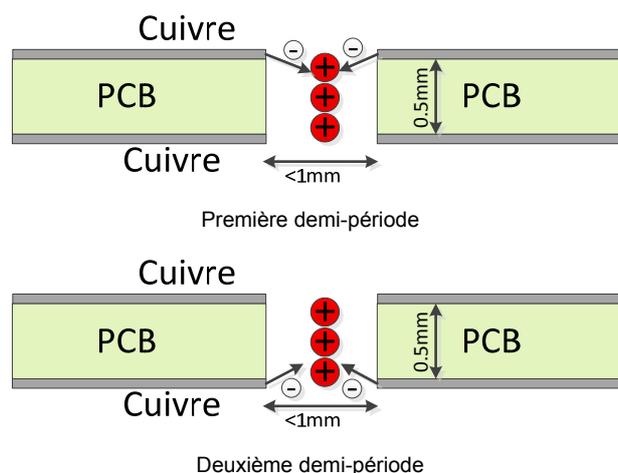


Figure 5 : Effet pendulaire dans un trou usiné sur PCB

3.3 Avec électrode à plusieurs trous submillimétriques

Si notre source de plasma est ponctuelle, toute l'énergie du système sera concentrée dans un même point. Une source de plasma à grande surface peut pallier ce problème. Une source de plasma à grande surface est composée d'une multitude de sources ponctuelles (par ex : trous submillimétriques) mises en parallèle.

Par exemple :

Si l'on veut séparer N molécules d'un gaz, il nous faudra une certaine quantité d'énergie. Si toute cette énergie est accumulée dans une seule source ponctuelle, celle-ci risque d'énormément chauffer. En créant une source de plasma grande surface, cette énergie et cette chaleur seront diluées entre les sources ponctuelles.

Pour notre projet, 5 trous sont percés dans une électrode usinée sur PCB avec une pastille de cuivre imprimée de chaque côté. C'est sur cette électrode que seront testés et mesurés les plasmas dans une source à grande surface.

4 CONCEPTION MECANIQUE

4.1 Généralité

L'un des objectifs de ce projet est de concevoir un dispositif de test permettant la génération de plasma dans les différents supports à cathode creuse et pouvant résister à des températures d'environ 100°C. Ce dispositif doit être compact afin d'optimiser le coup de fabrication et faciliter son déplacement. Le système doit être élaboré de façon à supporter le passage d'un flux de gaz et doit être conçu de manière à permettre une augmentation d'échelle sans pour autant devoir changer de design. Le dispositif doit être également facilement démontable car il faut que l'électrode à trou puisse être aisément changée selon les tests à faire. Un système pour l'alimentation électrique de l'électrode doit être également réalisé. Les pièces destinées à l'isolation électrique ont été usinées dans un matériau transparent afin de pouvoir mieux observer l'intérieur du système.

Le corps du dispositif se compose de plusieurs parties.

- 1) Tube $\varnothing 6\text{mm}$ pour le transport du gaz
- 2) Connecteur pour tube de gaz
- 3) Support en aluminium pour le connecteur
- 4) Support transparent pour isoler électriquement le support en aluminium des électrodes à cathode creuse
- 5) Anneau avec connecteur pour alimenter l'électrode à trou
- 6) Anneau avec connecteur pour alimenter la contre électrode

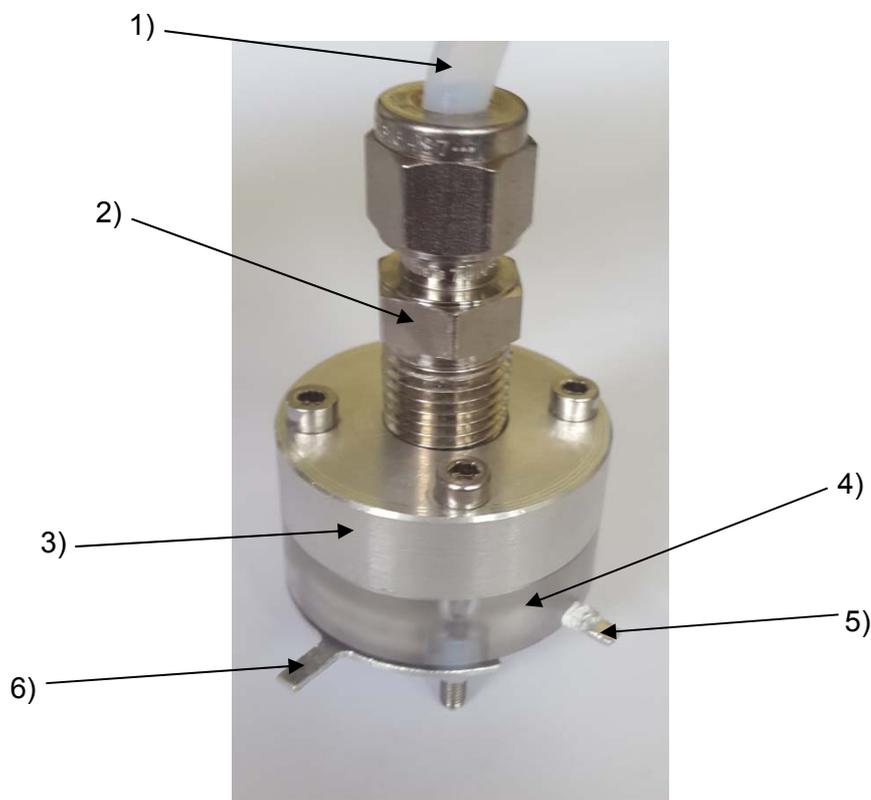


Figure 6 : Assemblage mécanique du dispositif

Ne sont présentés ici que les composants généraux du dispositif ; pour voir l'assemblage en détail et la liste de pièces, veuillez consulter les annexes 1,2 et 3

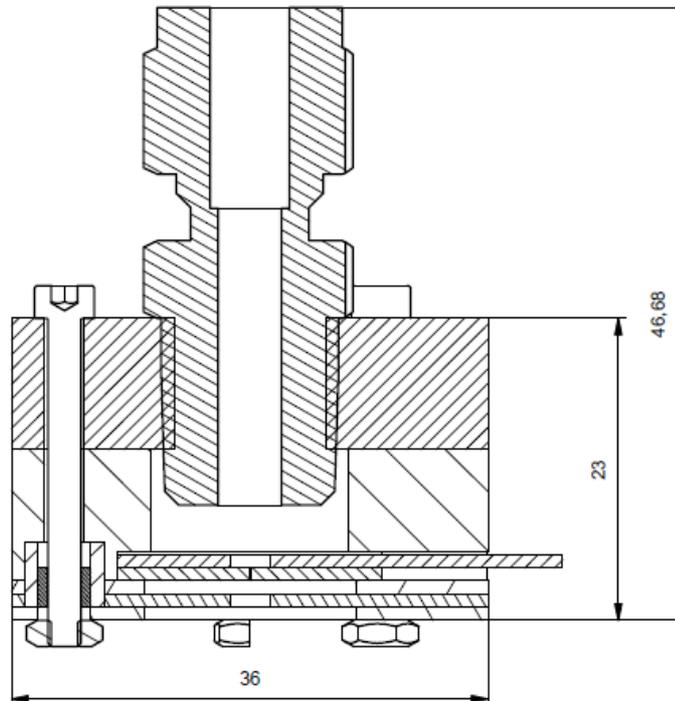


Figure 7 : Vue en coupe du dispositif entier avec cathode creuse en aluminium

Le système peut être assemblé de deux manières différentes :

- Avec une électrode à trou en aluminium
- Avec une électrode à trou usinée sur PCB

Le design global reste le même entre les deux montages. Cependant, il y a une légère modification dans la façon de disposer l'électrode à trou.

4.2 Electrode à trou submillimétrique en aluminium

Pour ce support, une pastille en aluminium de 20mm de diamètre et de 1mm d'épaisseur est utilisée comme électrode creuse. Un trou submillimétrique est usiné au centre de celle-ci. Quatre électrodes à trou en aluminium ont été usinées et testées. Le diamètre de l'électrode ainsi que son épaisseur restent identiques. Leur position dans le montage reste la même. Seul le diamètre du trou submillimétrique change (0.1, 0.15, 0.2 et 0.3mm) afin de pouvoir tester le plasma dans différentes conditions. La distance entre l'électrode à trou et la contre électrode est de 1mm.



Figure 8 : Electrode avec un trou de 0.2mm de diamètre en aluminium

Le montage de ce type de support est le suivant :

- 1) Anneau avec connecteur pour alimenter l'électrode à trou
- 2) Electrode en aluminium avec un trou de 0.2mm dans lequel doit apparaître le plasma
- 3) Anneau isolant de 1mm d'épaisseur
- 4) Contre électrode de 1mm d'épaisseur avec connecteur d'alimentation
- 5) Anneau isolant pour le serrage du système
- 6) Espace de 1mm dans un flux de gaz ou à l'air libre pour isoler entre elles les deux électrodes et pour permettre la ionisation du gaz

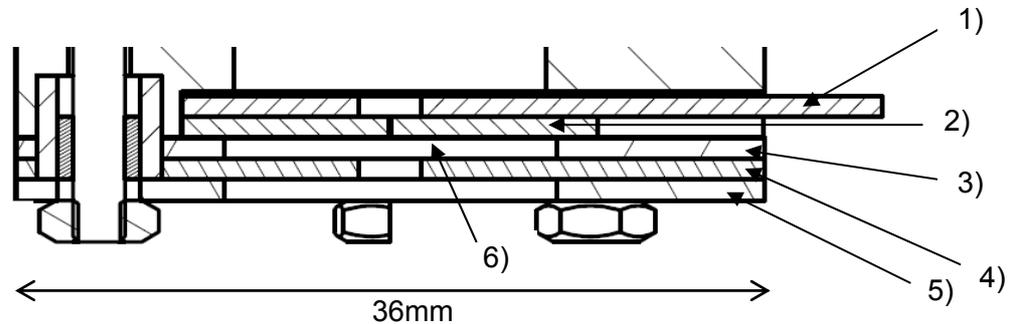


Figure 9 : Vue en coupe partielle du montage avec électrode à trou en aluminium

Le plasma est censé se générer horizontalement dans le trou usiné dans la pièce 2).

4.3 Electrode à trou usinée sur PCB

On utilise un PCB rond de 20mm de diamètre comme électrode à trou submillimétrique. Sur ce PCB on imprime un disque de cuivre de 15mm de diamètre de chaque côté du PCB. Ces pastilles de cuivre sont nos électrodes. Un trou submillimétrique dans lequel doit apparaître un plasma est usiné au centre du PCB. Plusieurs électrodes à trou submillimétrique sur PCB ont été usinées et testées. Elles font toutes un diamètre de 20mm et tous les perçages pour les trous submillimétriques ont été faits à 0.2mm de diamètre.

Voici les différents formats testés:

- 1.5mm d'épaisseur avec disques de cuivre de 15mm de diamètre avec un trou
- 1mm d'épaisseur avec disques de cuivre de 15mm de diamètre avec un trou
- 1mm d'épaisseur avec disques de cuivre de 8mm de diamètre avec un trou
- 0.5mm d'épaisseur avec disques de cuivre 15mm de diamètre avec un trou
- 0.5mm d'épaisseur avec disques de cuivre 15mm de diamètre avec 5 trous

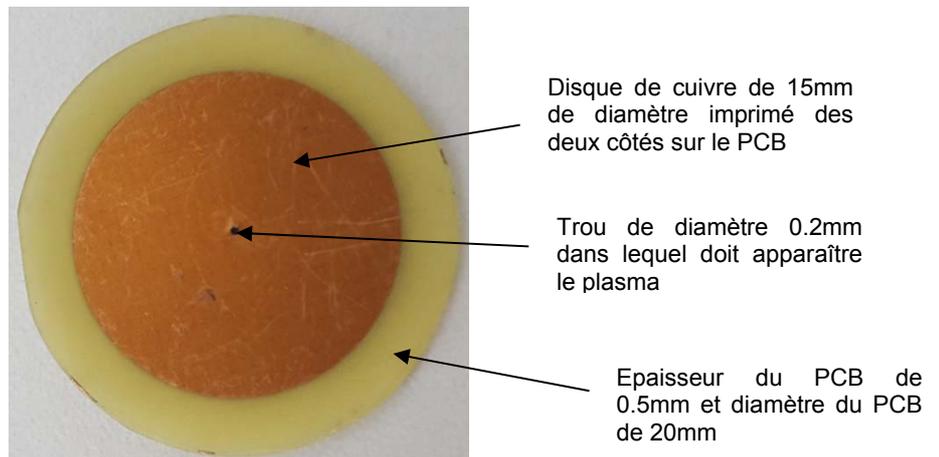


Figure 10 : Electrode à trou usinée sur PCB

Le PCB a soit un seul trou, soit cinq. Lorsqu'il en a cinq, ils sont disposés de la manière suivante :

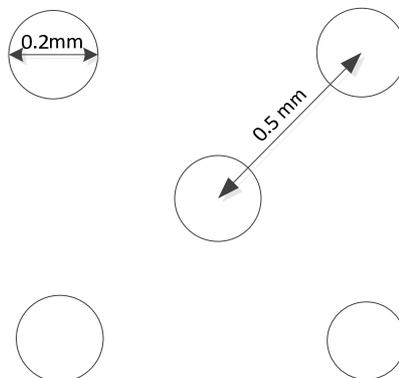


Figure 11 : Disposition des 5 trous sur le PCB avec le perçage central usiné au centre du PCB

Le montage de ce type de support est le suivant :

- 1) Anneaux avec connecteur pour alimenter la première électrode en cuivre
- 2) Assiette pour l'isolation des anneaux d'alimentation
- 3) PCB de 0.5mm d'épaisseur avec des électrodes de cuivre imprimées des deux côtés et avec un trou de 0.2mm de diamètre au centre dans lequel doit apparaître le plasma
- 4) Anneau avec connecteur pour alimenter la deuxième électrode en cuivre
- 5) Anneau isolant pour le serrage du système

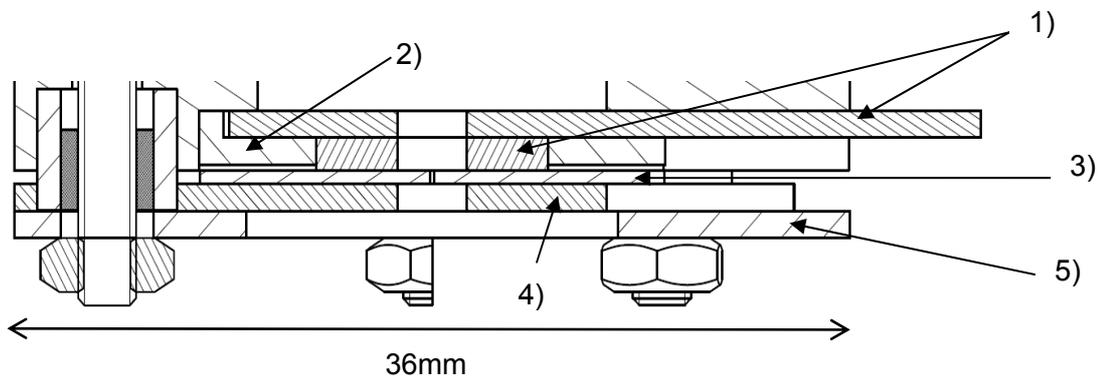


Figure 12 : Vue en coupe partielle de montage avec électrode à trou usinée sur PCB

4.4 Problèmes survenus et corrections apportées

- Lors de la conception du premier dispositif, les pièces isolantes ont été usinées en PMMA (Plexiglas). Durant les tests en kHz haute tension sur l'électrode en aluminium, ces pièces ont fondu. De ce fait, elles ont été réusinées en polycarbonate qui résiste mieux la chaleur (120°C pour la température d'utilisation du polycarbonate contre 70°C pour le PMMA).
- Durant les tests en kHz haute tension sur l'électrode à trou usinée sur PCB, le plasma ne se générait pas au bon endroit. Le claquage se produisait entre les anneaux d'alimentation (1 et 4 sur figure 12) en passant par le bord du PCB. Pour pallier ce problème, une assiette d'isolation (2 sur figure 12) a été ajoutée au système.

5 MESURES ET TESTS

Les tests et les mesures ont été faits à pression atmosphérique avec différentes alimentations et différents dispositifs.

- Les différentes alimentations :
 - Alimentation kHz basse tension
 - Alimentation MHz
 - Alimentation kHz avec transformateur haute tension
 - Alimentation DC haute
 - Alimentation DC pulsé
- Avec des dispositifs différents :
 - Electrode à trou en aluminium
 - Avec un trou de différents diamètres
 - Electrode à trou usinée sur PCB
 - Avec différentes épaisseurs
 - Avec différents diamètres de cuivre
 - Avec un ou plusieurs trous de 0.2mm de diamètre

5.1 Alimentation KHz basse tension

5.1.1 Descriptif

Avant le claquage, un dispositif de plasma est l'équivalent électrique d'une capacité. Cette capacité est souvent couplée avec une résistance d'isolation élevée (la résistance d'isolation est la résistance électrique équivalente de l'air ou d'un isolant électrique). Cependant, il faut vérifier si cette résistance est, dans notre dispositif à trou, en parallèle ou en série avec cette capacité.

Exemple de résistance d'isolation en série avec la capacité, dans le dispositif de plasma à pointe.

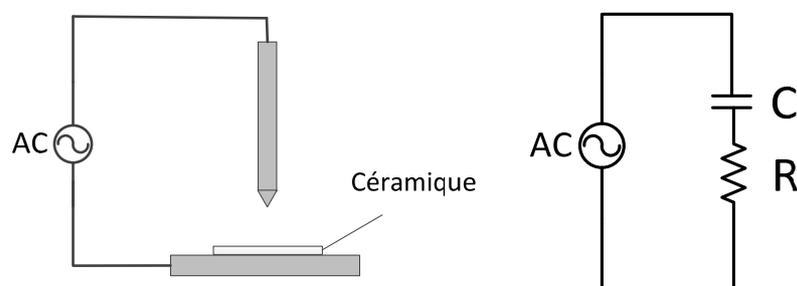


Figure 13 : Schéma du montage réel du dispositif à pointe et son schéma électrique équivalent

La capacité est l'équivalent de l'air entre la pointe et la plaque, tandis que la résistance est l'équivalent de la céramique. La valeur de capacité est faible (entre des pF et des nF) tandis que la valeur de résistance d'isolation est élevée (plusieurs M Ω).

Le but de ce test est donc de mesurer le déphasage et l'impédance du dispositif à trou usiné sur PCB et de comparer les valeurs mesurées avec celles obtenues sur un montage RC série monté sur plaque d'expérimentation. On veut également comparer ces mesures avec des valeurs calculées sur un modèle RC série et RC parallèle. Ces comparaisons permettront de définir le schéma électrique équivalent du dispositif.

Pour ce test, les mesures ont été faites sur le dispositif à plasma sur PCB de 0.5mm d'épaisseur avec un seul trou.

On utilise un générateur de fonction Topward 6303D comme alimentation kHz basse tension. On alimente en basse tension car on ne veut pas générer de plasma.

Pour mesurer le courant sur le dispositif à trou ainsi que sur la plaque d'expérimentation, une résistance série a été ajoutée au montage. On effectue une mesure de la tension aux bornes de la résistance avec une sonde Pawatron. Cette tension est ensuite divisée par la valeur de la résistance série et le résultat nous donne le courant.

Un oscilloscope Tektronix TDS 2014B affiche la tension d'entrée, la tension aux bornes de la résistance et affiche leur déphasage.

Pour mesurer la norme de l'impédance, on divise la tension d'entrée par le courant mesuré.

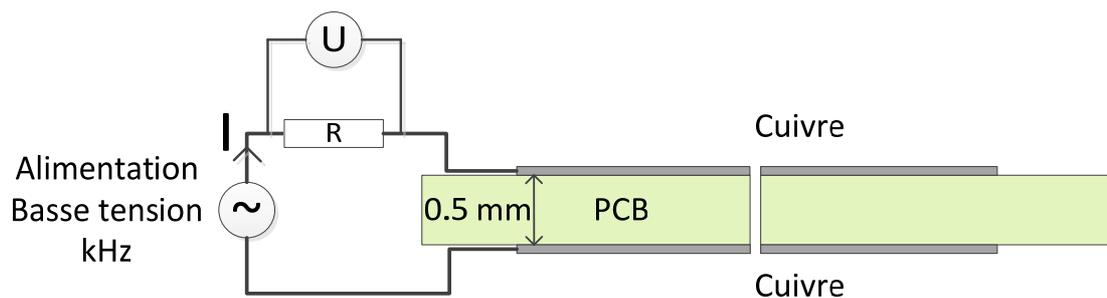


Figure 14 : Schéma de mesure simplifié avec R série = 36k Ω

5.1.2 Tests et mesures effectués

- Mesure de l'impédance et du déphasage sur dispositif à trou usiné sur PCB
- Mesure de l'impédance et du déphasage sur une plaque expérimentation avec un montage RC série
- Calcul de l'impédance et du déphasage pour un modèle RC série
- Calcul du déphasage pour un modèle RC parallèle
- Comparaison des valeurs obtenues
- Mesure de la résistance d'isolation du dispositif à trou
- Calcul et mesure de la valeur de la capacité du dispositif à trou

5.1.3 Résultats obtenus

Dans un premier temps, les valeurs de déphasage et d'impédance mesurées sur le dispositif à trou ont été comparées avec les valeurs mesurées sur le montage RC série de la plaque d'expérimentation et avec les valeurs calculées sur le modèle RC série.

Le dispositif à trou et la plaque d'expérimentation sont alimentés par une tension sinusoïdale 20Vp-p avec une fréquence de 0 à 50 kHz.

La résistance série ajoutée sur le dispositif à trou et la résistance utilisée pour le montage RC série sur la plaque d'expérimentation ont une valeur de 36kΩ. Ce choix est arbitraire.

La capacité utilisée sur la plaque d'expérimentation a une valeur de 1.1nF. On utilise cette valeur car c'est celle qui se rapproche le plus de la valeur de capacité calculée sur le dispositif à pointe.

Les calculs ont été faits avec les mêmes valeurs de fréquence, de résistance et de capacité que celles de la plaque d'expérimentation.

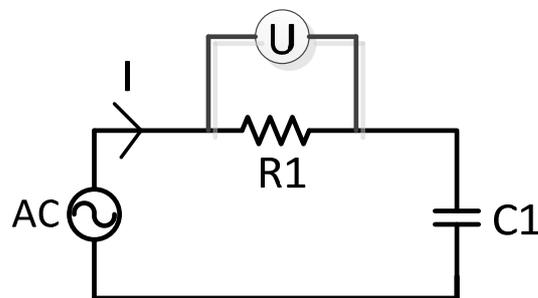


Figure 15 : Schéma de mesure de la plaque d'expérimentation RC série avec $R1 = 36k\Omega$ et $C1 = 1.1nF$

$$|Z| = \sqrt{R1^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C1}\right)^2}$$

Figure 16 : Calcul impédance RC série avec $R1 = 36k\Omega$ et $C1 = 1.1nF$

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C1}\right)}{|Z|}\right)$$

Figure 17 : Calcul déphasage RC série avec $C1 = 1.1nF$

Lorsque l'on compare les mesures et les calculs effectués on obtient :

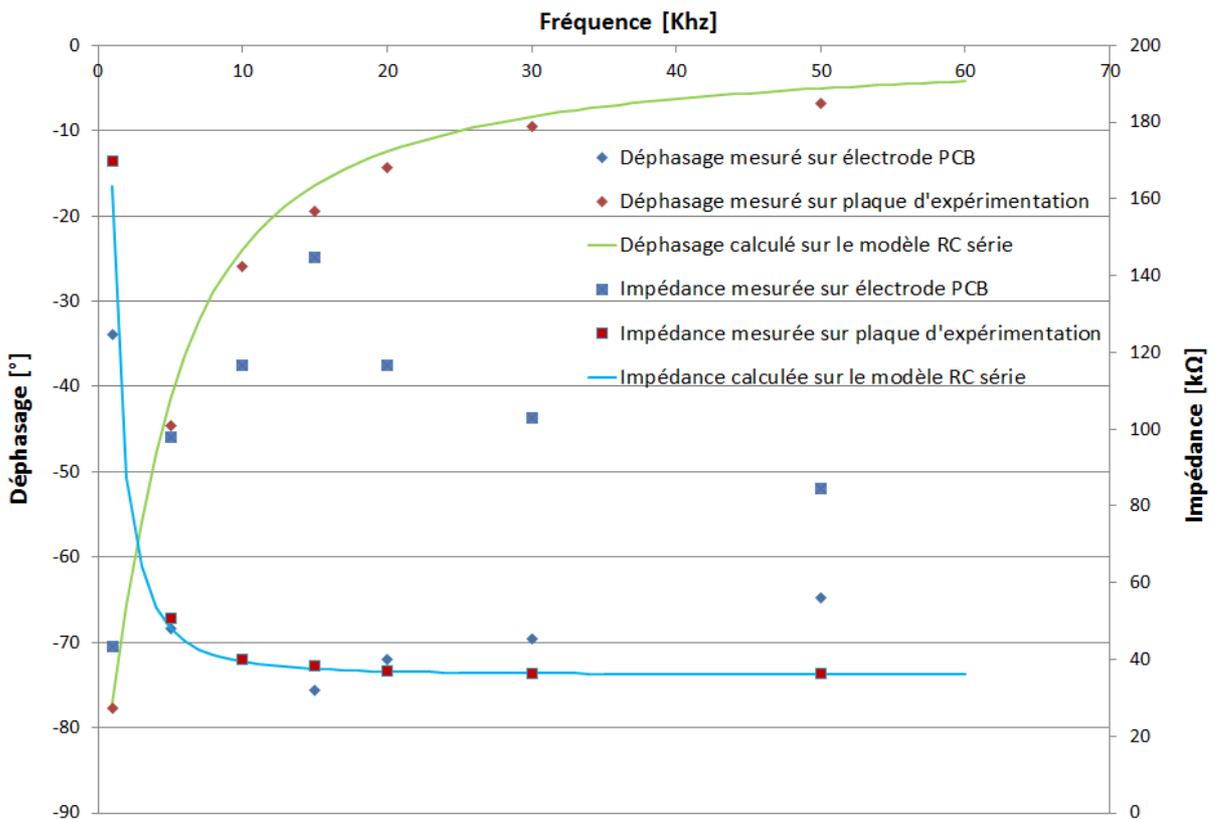


Figure 18 : Mesures et calcul des impédances et déphasages en fonction de la fréquence

Comme on peut voir sur ce graphe, les mesures faites sur la plaque d'expérimentation avec le montage RC série se comporte de la même façon que le calcul fait sur le modèle RC série.

Par contre, le dispositif à trou usiné sur PCB ne se comporte pas du tout comme un circuit RC série. La résistance d'isolation n'est donc pas en série à la capacité dans le schéma électrique équivalent.

Afin de vérifier que la résistance d'isolation est bien en parallèle à la capacité, on compare les mesures de déphasage effectuées sur le dispositif à trou avec celles calculées sur le modèle RC parallèle.

Pour cette mesure, la résistance série pour la mesure du courant sur le dispositif à trou a une valeur de 0.7Ω afin de la rendre négligeable et de ne pas la prendre en compte pour le calcul du déphasage sur le modèle RC parallèle.

Les fonctions complexes Excel IMARGUMENT et IMDIV ont été utilisées pour le calcul de l'impédance et du déphasage sur le modèle RC parallèle.

Pour le calcul du modèle RC parallèle, on utilise une valeur de capacité de 1.1nF et de $50\text{k}\Omega$ pour la résistance.

Voici ce qu'on obtient :

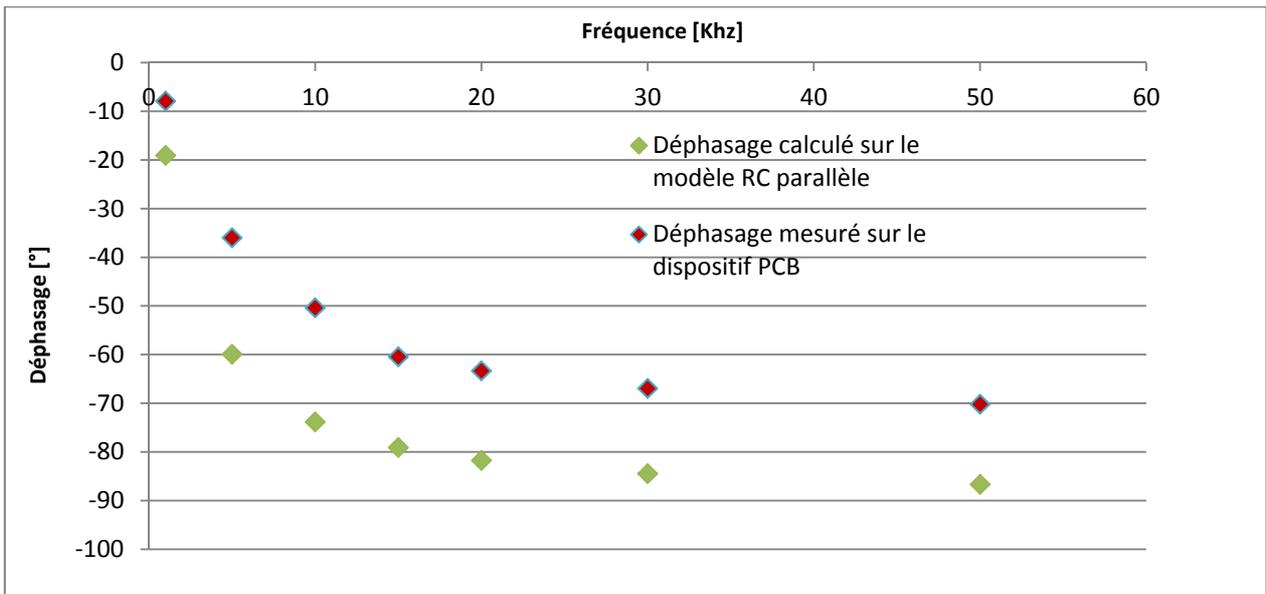


Figure 18 : Mesure et calcul du déphasage en fonction de la fréquence

On constate que le comportement est qualitativement semblable. Ce qui confirme le fait qu'on a une résistance d'isolation élevée en parallèle à la capacité. Maintenant il ne reste plus qu'à déterminer les valeurs réelles de la capacité et de la résistance.

Un testeur d'isolation Fluke 1507 a permis la mesure de la résistance parallèle. On obtient une valeur supérieure à 220MΩ.

Un capacimètre Agilent U1733C a permis la mesure de la capacité équivalente. On obtient une valeur d'environ 15pF.

Maintenant que l'on sait les valeurs réelles du modèle RC parallèle de notre dispositif à trou submillimétrique, on recompare les valeurs du déphasage mesurées sur notre dispositif à trou submillimétrique avec celles calculées. En changeant les valeurs de R et C dans le calcul, on obtient:

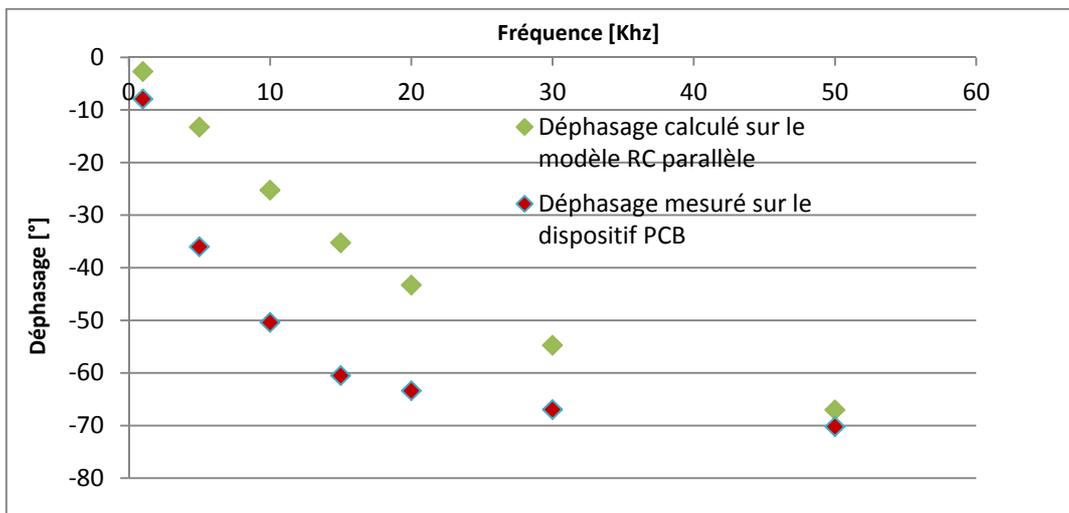


Figure 19 : Mesure et calcul du déphasage en fonction de la fréquence

On peut voir que le comportement des courbes est semblable. Cela veut dire que notre dispositif à trou est bien un circuit RC parallèle et que les valeurs de résistance et de capacité mesurées sont assez justes. Le petit écart sur le graphe est sûrement dû à des erreurs de mesure et à l'incapacité du testeur d'isolation de mesurer au-delà de $220\text{M}\Omega$.

Le schéma électrique équivalent du dispositif à trou usiné sur PCB est donc le suivant :

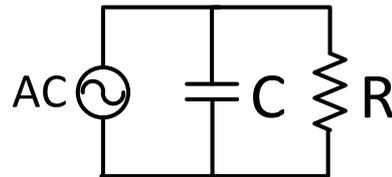


Figure 20 : Schéma électrique équivalent du dispositif à trou usiné sur PCB avec $C \approx 15\text{pF}$ et $R > 220\text{M}\Omega$

Ce schéma est important, il nous permet de pouvoir prédire le comportement en fréquence du système et il nous permet de pouvoir l'implémenter dans un autre schéma utilisant un transformateur.

Lorsqu'il y a un plasma, le schéma électrique équivalent est complexe à quantifier. On sait seulement qu'une résistance de faible valeur apparaît en parallèle à la capacité. C'est dans cette résistance que va circuler le courant durant le plasma et provoquer une chute de tension.

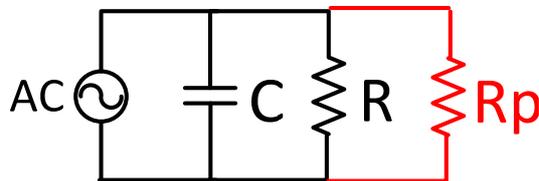


Figure 21 : Schéma électrique équivalent du dispositif à trou avec la résistance de plasma R_p en parallèle

Le schéma électrique équivalent lorsqu'il y a un plasma ne nous étant pas utile pour nos recherches, la valeur de la résistance R_p ne sera pas étudiée au sein de ce projet.

5.2 Alimentation MHz

5.2.1 Descriptif

L'alimentation vient du fabricant Barthel HF-technique. Elle est composée d'un générateur radio-fréquence RFG-10/70-400 ainsi que d'une match box Mci-600. Les valeurs de tension aux bornes du plasma et le courant traversant celui-ci sont mesurées avec la sonde Solayl vigilant-sensor et affichées sur l'oscilloscope Lecroy wave runner 6050. Un séparateur est utilisé à la sortie de la sonde de mesure afin de séparer le câble coaxial en deux fils distincts (un pour la masse et un pour le signal).

Le schéma d'alimentation est le suivant :

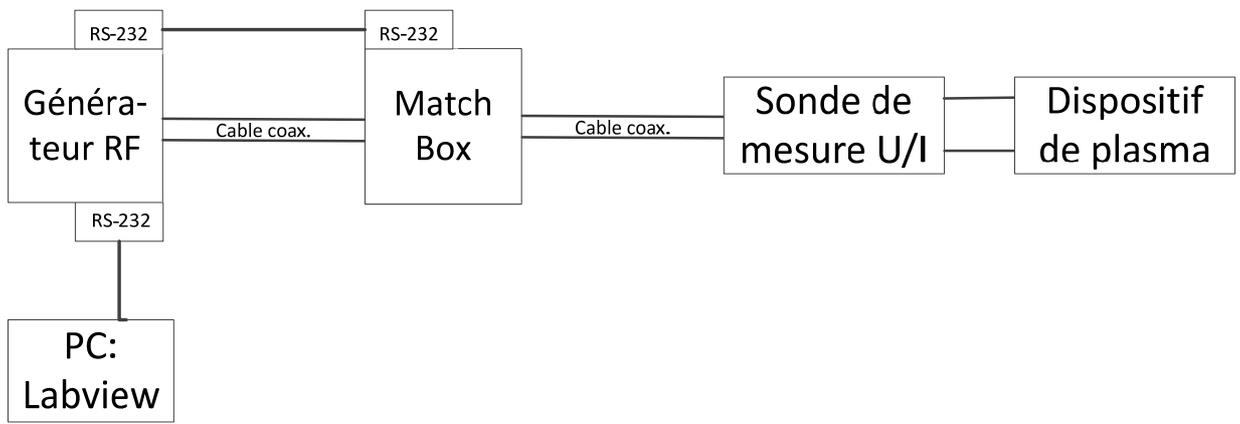


Figure 22 : Schéma d'alimentation pour les tests en MHz

Le générateur RF permet de choisir la forme, l'amplitude et la fréquence du signal. La match box est constituée d'un circuit LC. Elle permet d'obtenir la mise en phase du courant et de la tension à sa sortie en modulant les valeurs des capacités et de l'inductance.

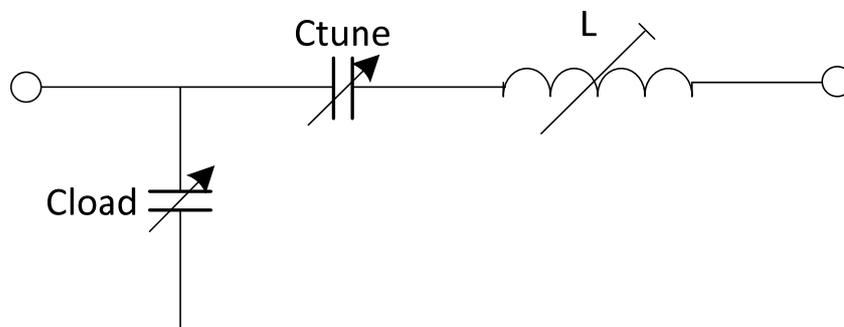


Figure 23 : Circuit interne de la Match box

Le pilotage du générateur RF et de la match box se font sur une page Labview réalisée par la HES-SO sur un PC connecté à l'alimentation MHz via un port série RS-232



Figure 24 : Page Labview pour le contrôle l'alimentation MHz

Pour les tests réalisés dans ce projet, la match box a été utilisée en mode Auto-Match. De ce fait, les valeurs des capacités sont régulées de manière automatique (quelques tests ont cependant été faits en changeant manuellement les valeurs de capacité pour essayer d'obtenir un claquage spontané mais n'ont aboutis à rien). Le générateur RF ne génère pas un courant ou une tension fixe mais une puissance fixe.

Seule la valeur des paramètres suivants a été changée :

- Fréquence d'alimentation [MHz]
- P fwd SP [W] : C'est la puissance qu'on désire envoyer dans le dispositif de plasma
- P fwd [W] : C'est la puissance réellement envoyée dans le dispositif de plasma
- P ref [W] : C'est la puissance réfléchie, c'est-à-dire la puissance qui retourne au générateur à la sortie du dispositif de plasma. Elle correspond à la puissance envoyée moins la puissance dissipée dans le plasma.
- Max Ref P [W] : C'est la valeur maximale de puissance réfléchie que l'on tolère. Si la puissance réfléchie va au-delà de cette valeur, le générateur se met en défaut.

Pour les mesures du comportement en fréquence du système, la sonde ACA-100 RF Network Analyser du fabricant AD-Tec a été utilisée.

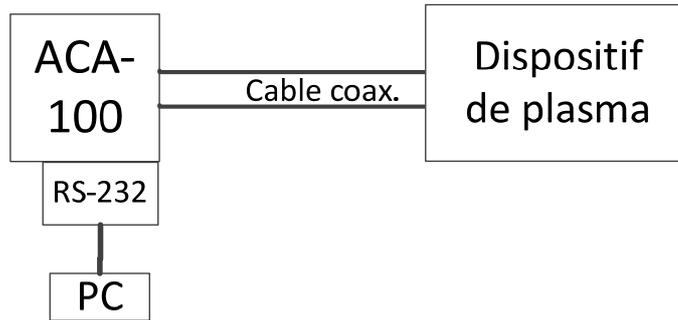


Figure 25 : Schéma câblage de l'ACA-100

Dans un premier temps, on mesure le comportement en fréquence uniquement du câble coaxial pour calibrer la sonde. Ensuite, on peut brancher le dispositif de plasma afin de faire la mesure. Un séparateur est utilisé à la fin du câble coaxial afin d'avoir deux fils distincts.

5.2.2 Tests et mesures effectués

- Test de claquage sur la pointe
- Mesure du comportement en fréquence sur la pointe
- Test de claquage sur l'électrode en aluminium
- Test de claquage sur l'électrode usinée sur PCB
- Mesure de la tension aux bornes de l'électrode usinée sur PCB et du courant traversant celle-ci

5.2.3 Résultats obtenus

- Comportement en fréquence avec et sans dispositif à pointe

Cette mesure a été faite sur le dispositif à pointe, avec la pointe en tungstène située à 1mm de la contre plaque avec une céramique de 0.5mm d'épaisseur

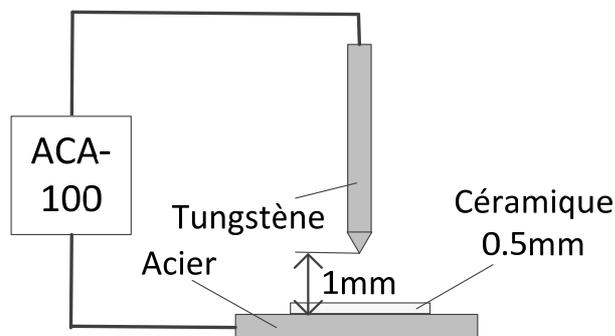


Figure 26 : Schéma du dispositif à pointe

Voici la courbe du comportement en fréquence de la réactance :

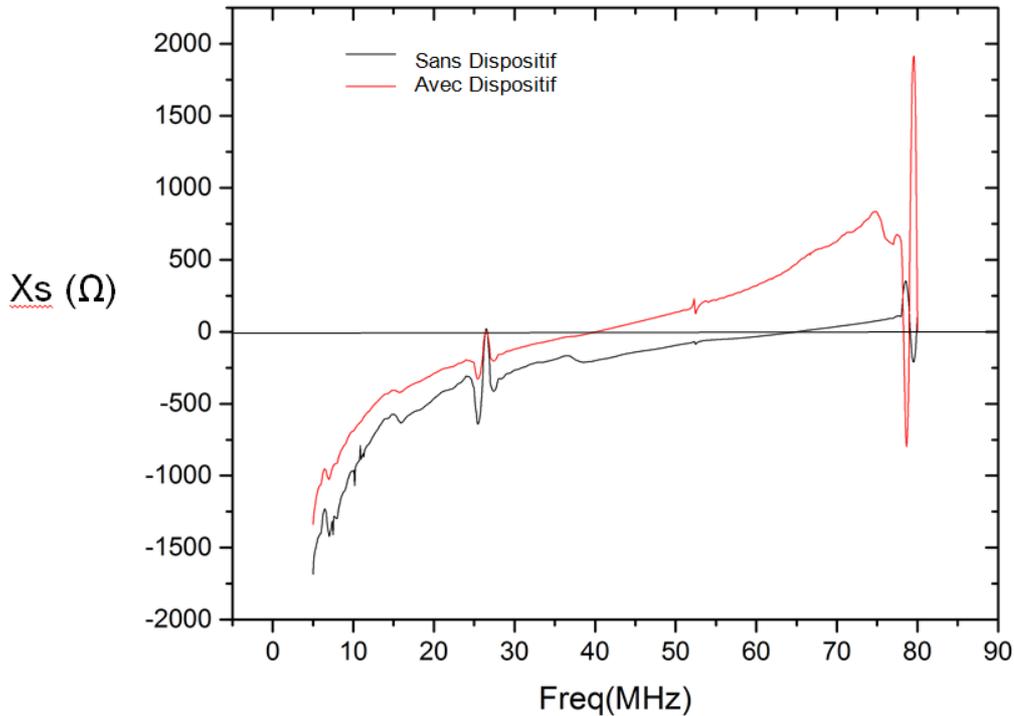


Figure 27 : Valeur de la réactance en fonction de la fréquence

On remarque que de manière qualitative, le système a, à peu près, le même comportement jusqu'à 75MHz avec ou sans le dispositif de plasma. Ça veut dire que le dispositif de plasma n'influence pas le comportement en fréquence en dessous de cette valeur. Cependant, on constate que la valeur de réactance est légèrement supérieure lorsque l'on fait la mesure avec le dispositif de plasma, ce qui signifie que la capacité avec le dispositif est plus grande. On peut expliquer cela par le fait que les câbles du signal et de la masse sont éloignés d'une dizaine de cm pour la mesure sans dispositif, contre seulement 1mm de distance entre la pointe et la plaque lors de la mesure avec le dispositif. Plus la distance entre les électrodes diminue, plus la capacité augmente.

Comme à 26MHz et à 40MHz la réactance du dispositif de plasma vaut zéro, il est intéressant d'alimenter le dispositif de plasma avec ces fréquences. Le générateur RF ne va pas plus haut que 70MHz, il est donc impossible de tester les autres fréquences où la valeur de réactance vaut zéro.

- Mesure du courant traversant le dispositif à trou usiné sur PCB et de la tension à ses bornes

La mesure du courant et de la tension a été prise sur un PCB de 0.5mm d'épaisseur, avec les pastilles de cuivre imprimées de 15mm de diamètre et avec 5 trous

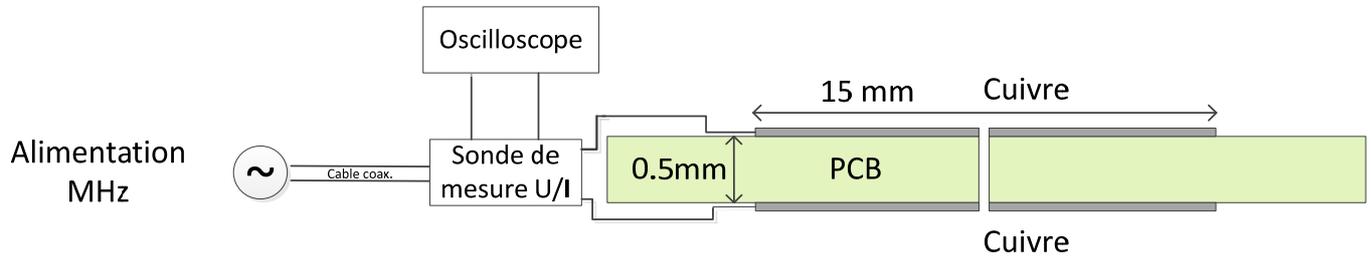


Figure 28 : Schéma de mesure simplifié du dispositif à 5 trous usinés sur PCB

Le dispositif est alimenté avec une puissance (P_{fwd}) de 50 W à 15MHz. Voici la tension et le courant mesurés par la sonde :

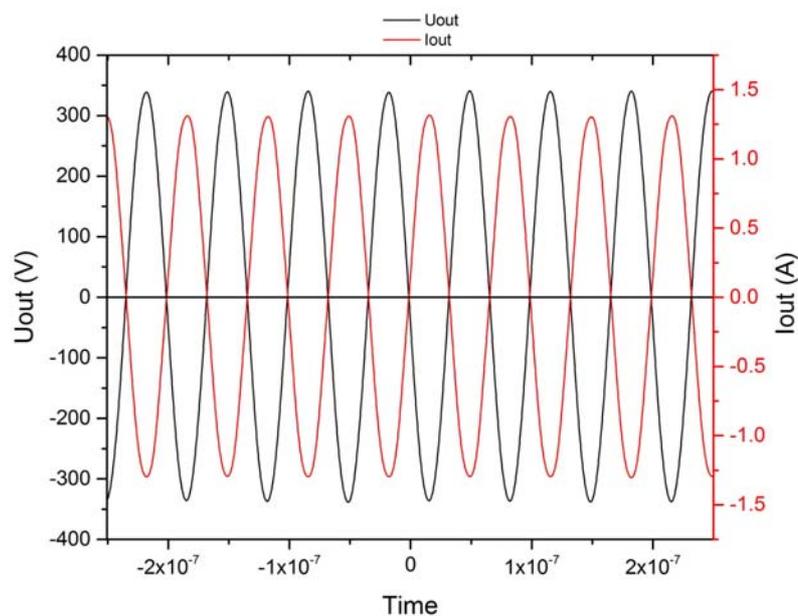


Figure 29 : Tension et courant mesurés sur le dispositif usiné sur PCB

On constate que la tension crête (350 V) n'est pas assez haute pour obtenir un claquage.

On observe également que le courant est en opposition de phase, c'est dû au fait que la sonde a été placée à l'envers lors de la prise de mesure.

On constate aussi sur ce graphe que si on moyenne la puissance instantanée obtenue en multipliant le courant par la tension, on a une valeur de puissance plus élevée que la puissance envoyée (P_{fwd}). On peut expliquer ce phénomène comme ceci : le générateur reçoit 0% de puissance réfléchi, cela veut dire que les 30W envoyés ont été dissipés sous forme de chaleur dans le dispositif. Par contre, la puissance instantanée mesurée pourrait résulter de l'oscillation provoquée par la capacité du dispositif.

5.2.4 Observations

- A pression atmosphérique, la tension fournie par le générateur RF est trop basse pour obtenir un plasma spontané avec n'importe quel dispositif même si on alimente le système avec les valeurs de fréquence où la réactance vaut zéro.
- On peut obtenir un plasma sur le dispositif à pointe et sur l'électrode en aluminium si on amorce le claquage avec une électrode flottante (pour nos tests, un tournevis a servi comme électrode flottante).

Plasma obtenu sur le dispositif à pointe amorcé avec une électrode flottante :

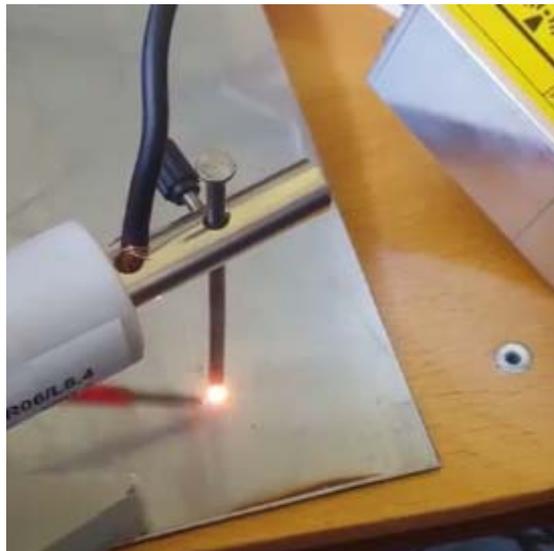


Figure 30 : Plasma obtenu entre la pointe et la plaque à l'aide d'un tournevis

Si on glisse une barrière diélectrique entre la pointe et la plaque, le plasma s'éteint. Comme le plasma ne peut pas être obtenu de manière spontanée et qu'il ne peut pas être généré avec une barrière diélectrique, aucune mesure n'est relevée en MHz sur le dispositif à pointe.

On veut un plasma sur le dispositif à pointe pouvant se générer avec une barrière diélectrique car la technologie du plasma est couramment utilisée dans des applications sur le traitement de diélectrique (exemple : pour la découpe du verre).

Plasma obtenu sur le dispositif à trou en aluminium amorcé avec une électrode flottante :



Figure 31 : Plasma obtenu entre les deux électrodes à l'aide d'un tournevis

Le plasma est stable entre les deux électrodes, mais il n'est pas dans le trou. Comme le plasma n'est pas dans le trou, le dispositif agit comme si c'était deux plaques mises en parallèle. Ce système ayant déjà été le sujet de nombreuses études, il ne nous intéresse pas. De ce fait, aucune mesure n'est relevée en MHz sur l'électrode à trou en aluminium.

Sur le dispositif usiné sur PCB, aucun plasma n'a pu être amorcé.

5.2.5 Problèmes rencontrés

Lors des tests sur l'électrode en aluminium, la puissance envoyée par le générateur RF était trop élevée. Du coup, lorsque l'on a amorcé un plasma à l'aide du tournevis entre les électrodes, le courant a circulé dans la faible résistance provoquée par le plasma. De ce fait, la puissance envoyée n'a quasiment pas été dissipée dans le dispositif. Le générateur n'a alors pas supporté la puissance réfléchie et a donc été endommagé. Il a été envoyé chez le fabricant pour réparation et nous est revenu seulement la dernière semaine du projet. De ce fait, nous n'avons pas plus en explorer d'avantage en MHz.

5.3 Alimentation KHz Haute tension

5.3.1 Descriptif

Ces tests sont réalisés à l'aide d'un générateur de fonctions Titan Compact Power qui délivre une tension sinusoïdale modulable en amplitude et en fréquence. Ce générateur vient se brancher sur un transformateur élévateur de tension. Ce même transformateur vient alimenter notre dispositif à trou.

Une sonde Pewatron mesure la tension en entrée du transformateur (U_{in}).

Deux sondes Pearson current monitor mesurent le courant d'entrée et de sortie du transformateur (I_{in} , I_{out}).

Une sonde Testec pour haute tension mesure la tension entre la terre et l'électrode à trou (U_{out}).

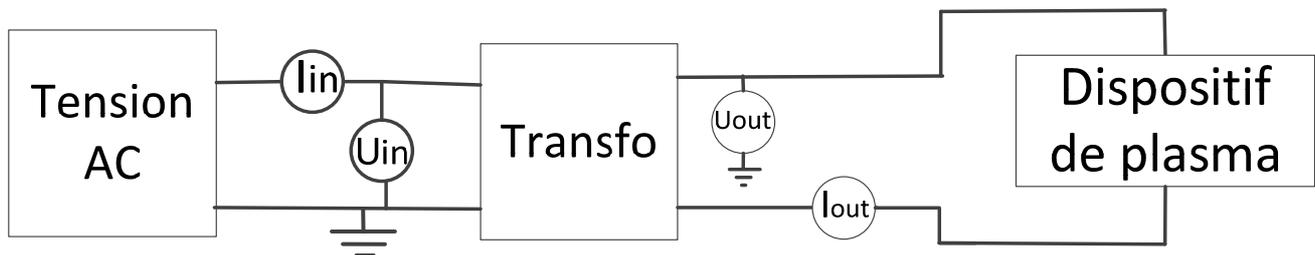


Figure 32 : Schéma de mesure pour alimentation kHz haute tension sans mise à terre du dispositif

L'objectif est d'observer le comportement du plasma et prendre des mesures du courant et de la tension afin de déterminer la puissance nécessaire pour générer un plasma en fonction des différents paramètres suivants :

- Le dispositif à trou utilisé :
 - Electrode à trou en aluminium
 - Avec un trou de diamètre 0.1, 0.15, 0.2, ou 0.3mm
 - Electrode à trou usinée sur PCB
 - Avec des épaisseurs de 1.5, 1 ou 0.5mm
 - Avec un diamètre de cuivre de 15 ou 8mm
 - Avec un ou cinq trous de 0.2mm de diamètre
- Le flux de gaz utilisé :
 - De l'air fixe
 - Un flux d'argon 4.6
 - Un flux d'hélium pur
 - Un flux 99% hélium – 1% oxygène
 - Un flux d'air comprimé

A part pour la mesure du comportement en fréquence, les tests ont été faits à **8kHz**, cette fréquence étant celle fonctionnant le mieux avec la majorité des paramètres.

5.3.2 Tests et mesures effectués

- Test de claquage sur le dispositif à électrode en aluminium et sur celui usiné sur PCB avec différents paramètres
- Mesure des tensions et courants pour le dispositif à électrode usinée sur PCB avec différents paramètres
- Mesure de la puissance nécessaire pour générer un plasma sur l'électrode usinée sur PCB avec différents paramètres
- Comparaison des différences de puissance nécessaire pour générer un plasma et de l'intensité énergétique en fonction des paramètres appliqués
- Mesure du comportement en fréquence du dispositif avec le transformateur
- Etablissement du schéma équivalent du dispositif à trou avec le transformateur
- Simulation sur LTspice du comportement en fréquence du dispositif à trou avec le transformateur

5.3.3 Résultats obtenus

- Electrode avec trou en aluminium

La génération d'un plasma a été testée sur le dispositif à trou en aluminium. Peu importe avec quel diamètre du trou on testait, le plasma généré était instable et pas dans le trou. Comme pour les mesures en MHz, le dispositif agit comme si c'était deux plaques mise en parallèle. Ce système ayant déjà été le sujet de nombreuses études, il ne nous intéresse pas. De ce fait, les tests sur l'électrode à trou en aluminium ont été arrêtés et plus aucune mesure n'a été relevée en kHz.

- Electrode avec trou usinée sur PCB

Pour les tests sur le dispositif usiné sur PCB, les mesures ont été prises avec et sans la contre électrode mise à terre.

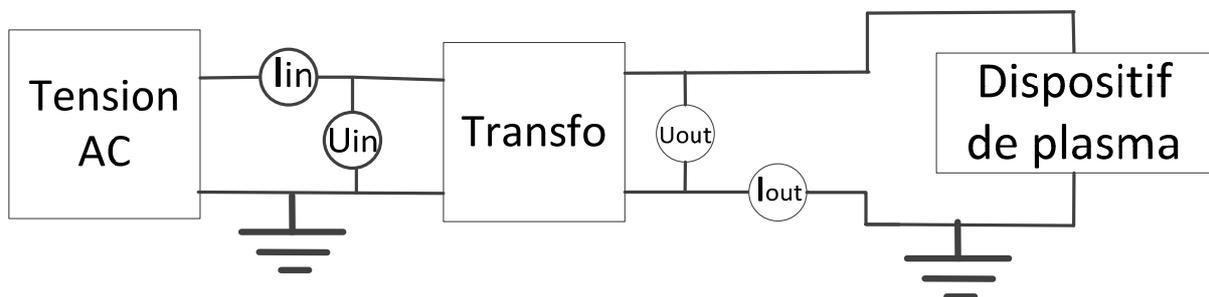


Figure 33 : Schéma de mesure lorsque le dispositif est mis à la terre

Au fil des expériences, on remarque que le comportement du plasma n'est pas le même si on relie la contre électrode à la terre ou si on la laisse flottante.

- Tests sans flux de gaz

Lors du premier test effectué, un plasma est généré dans un PCB avec un seul trou. La contre électrode n'est pas reliée à la terre. Le dispositif n'est soumis à aucun flux de gaz, uniquement l'air ambiant. On obtient un plasma intense à l'intérieur du trou.

Pour acquérir les mesures, l'oscilloscope est réglé pour trigger sur le courant. Dès que le premier pic de courant apparaît lors de la génération du plasma, l'oscilloscope prend la mesure. Le temps zéro correspond au moment où le claquage apparaît et que la tension chute.

Voici les mesures de courant et tension obtenues :

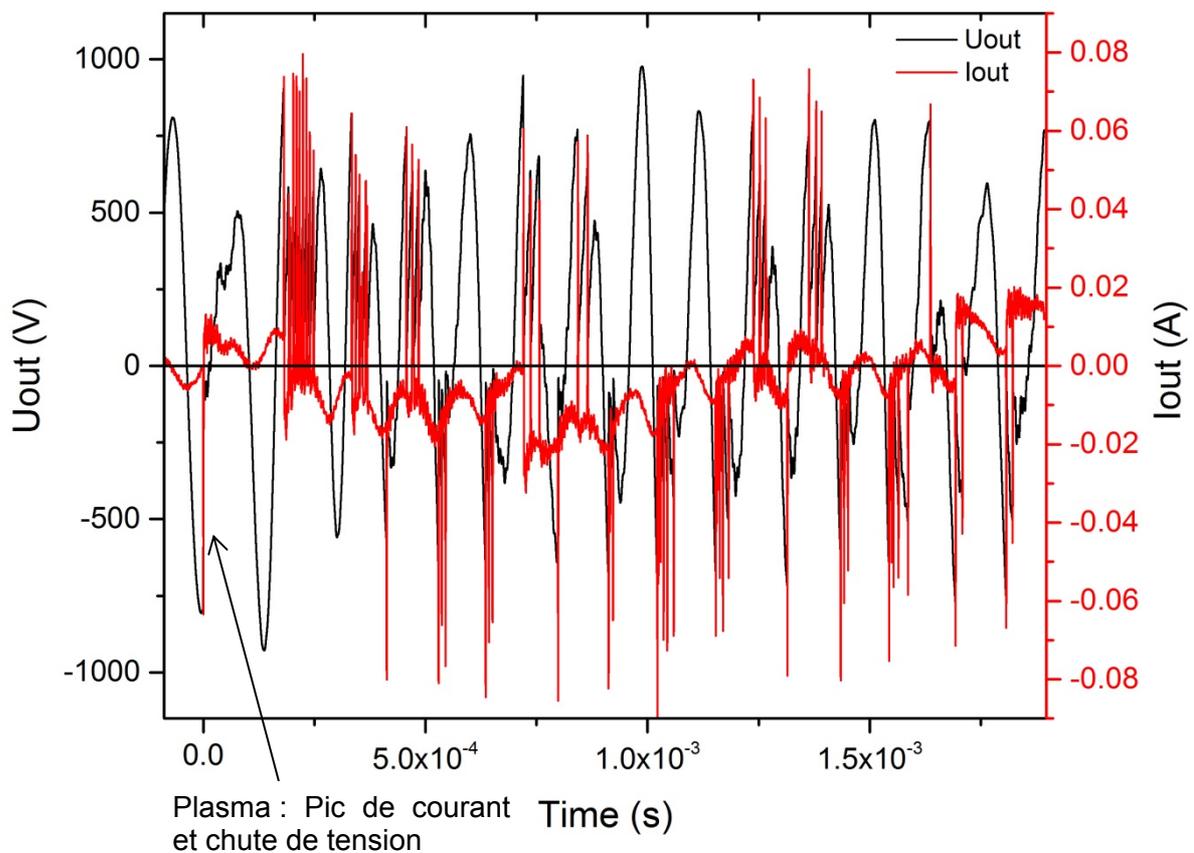


Figure 34 : Mesures sur un trou, sans mise à terre et sans flux de gaz

La génération de ce plasma intense ne dure qu'un très court instant (quelques ms). Après cela le PCB brûle et le trou est bouché. Le fait que le trou se détériore peut expliquer pourquoi la tension et le courant deviennent moins réguliers. On peut observer une tension de claquage située à 800V au temps zéro. Les pics de courant en rouge sont dus à la bonne conductivité du plasma lorsqu'il est généré. Lorsque le courant peut circuler dans le plasma, la tension chute.

Dans un premier temps, on ne savait pas qu'il était bouché, alors on a refait la génération d'un plasma dans ce même PCB.

Voici le résultat obtenu :



Figure 35 : Test de génération de plasma dans un PCB bouché

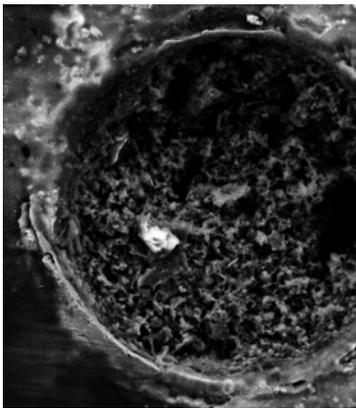
On croyait que le point rouge était un plasma.

Cependant, une mesure de résistance électrique entre les deux électrodes de cuivre a conclu que lorsqu'il a brûlé, le trou s'est bouché avec un mélange de PCB et de cuivre fondus, ce qui a court-circuité les deux électrodes. Il y a donc un courant qui passe dans ce trou. Le courant, en passant, a fait chauffer le cuivre disséminé dans le trou bouché, ce qui a provoqué cette lumière rouge.

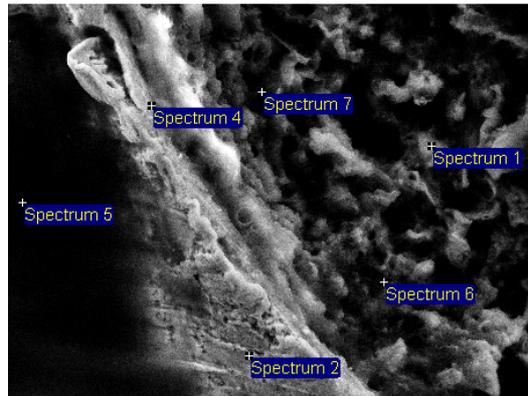
Résistance entre les électrodes du PCB	
PCB vierge	OL
PCB bouché	environ 500 Ohms

Figure 36 : Tableau de mesures de résistances entre les électrodes du PCB

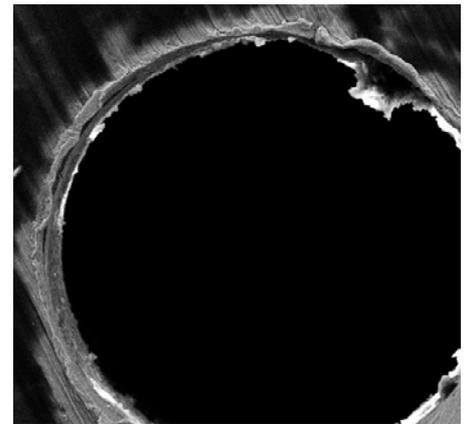
Une photo au microscope électronique a permis de valider le fait que le PCB est bien bouché et que la matière qui a bouché le trou contient bien du cuivre.



PCB bouché agrandi 1000 fois



PCB bouché agrandi 5000 fois



PCB vierge agrandi 1000 fois

Figure 37 : Photos au microscope électronique validant le fait que le PCB est bouché

Spectrum	% C	% O	% Si	%Cu
Spectrum 6	69.93	18.09	1.99	9.99
Spectrum 7				100.00

Figure 38 : Tableau d'analyse au spectromètre qui démontre qu'il y a bien du cuivre présent dans la matière qui a bouché le trou

Lors de la génération d'un plasma dans un trou sur PCB, sans flux de gaz, à l'air ambiant et sans mise à terre, le PCB se bouche et n'est donc plus utilisable. Pour pouvoir faire plus de tests, le personnel de l'atelier d'électronique a réalisé une vingtaine d'électrodes sur PCB supplémentaires.

Sur le même test, mais avec 5 trous, un plasma intense ne se génère que dans un ou deux trous, suite à cela ces mêmes trous se bouchent et le PCB devient également inutilisable.

Lorsque l'on essaye de générer un plasma dans un PCB avec un seul trou, avec la mise à terre et sans flux de gaz, aucun plasma intense n'apparaît, mais seulement de petites décharges régulières dans le trou. Sur un PCB avec 5 trous, ces petites décharges n'apparaissent que dans un seul trou.

Voici les mesures de courant et tension obtenus :

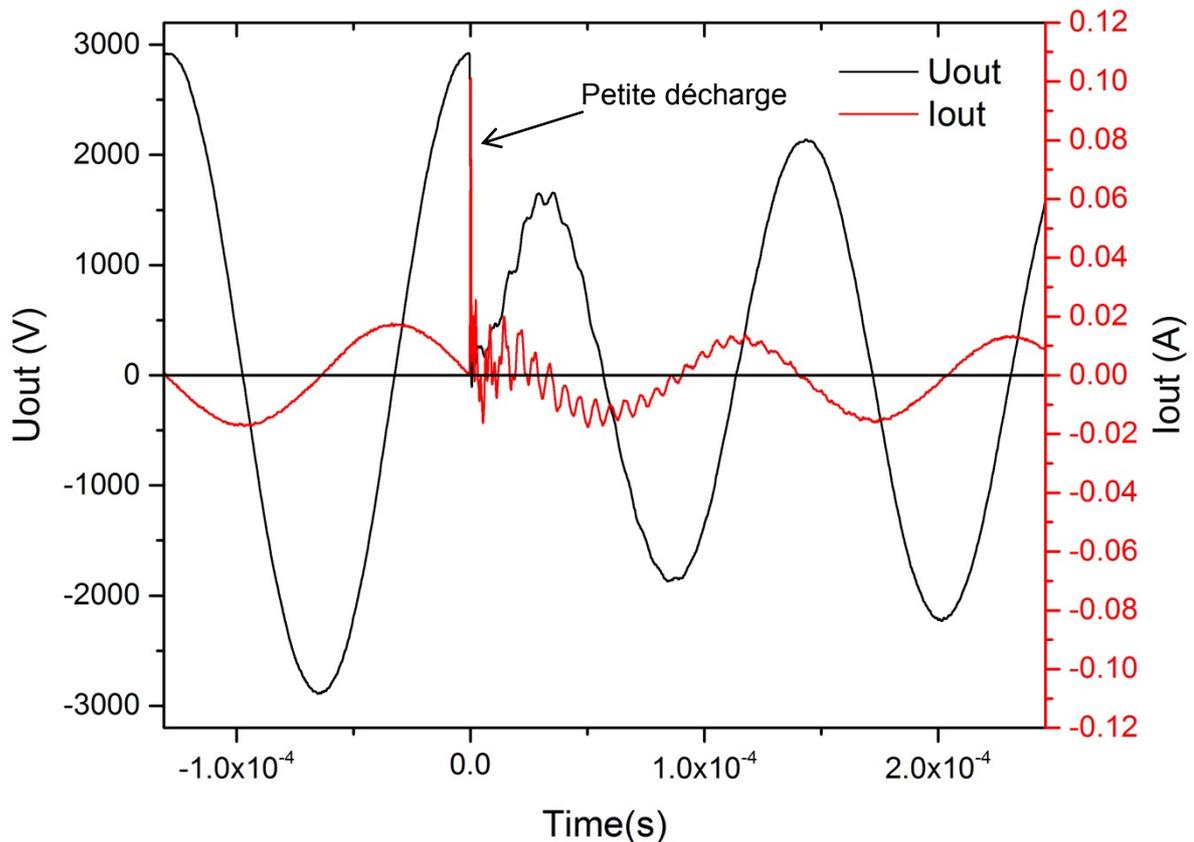


Figure 39 : Mesures sur un trou, avec mise à terre et sans flux de gaz

La génération de ces petites décharges ne détériorent et ne bouchent pas le PCB. Il peut être réutilisé à nouveau. On peut voir au temps zéro que la tension de claquage pour la petite décharge est de 3000V. On remarque aussi une différence de tension de claquage entre une contre électrode mise à la terre et une contre électrode flottante. Cette différence est due au fait que la contre électrode, si elle est flottante, n'a pas un référentiel de mesure fixe contrairement à lorsqu'elle est mise à la terre. Il est intéressant de comparer le comportement qualitatif entre un dispositif avec une électrode mise à la terre et un dispositif sans, mais pas le comportement quantitatif.

Des tests ont également été réalisés sans flux de gaz avec les électrodes de 1.5 et 1mm d'épaisseur avec les pastilles de cuivre de 15mm de diamètre et un seul trou. Mais le plasma se génère d'une électrode à l'autre en passant par le bord du PCB et non pas par le trou.

Pour pallier ce problème, des tests ont été réalisés avec une électrode de 1mm d'épaisseur avec des pastilles de cuivre de 8mm de diamètre et un seul trou. Avec ce dispositif le plasma se comporte de la même manière qu'avec un PCB de 0.5mm d'épaisseur, sauf qu'il faut une valeur de tension plus élevée pour obtenir un claquage.

Mesures de courant et tension sur le PCB avec une épaisseur de 1mm, avec les pastilles de cuivre de 8mm de diamètre, un seul trou, sans mise à terre et sans flux de gaz :

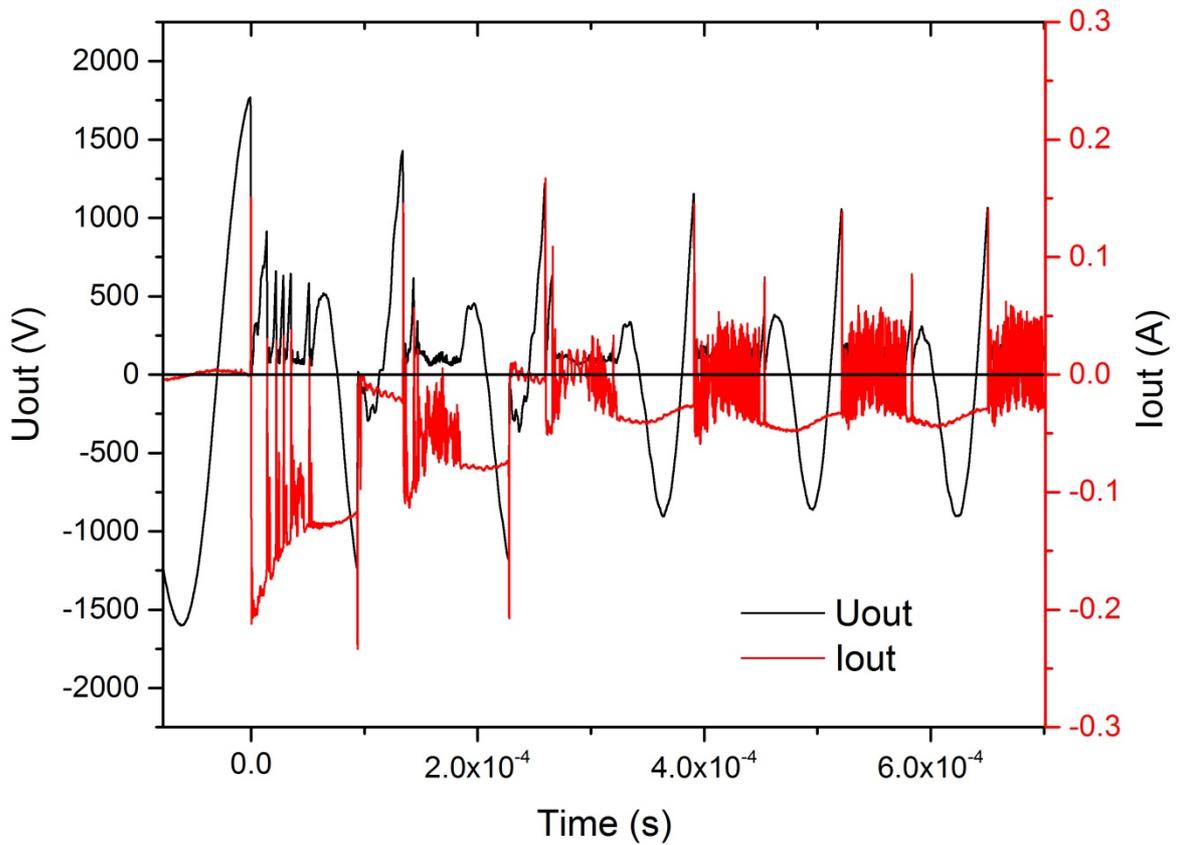


Figure 40 : Plasma sur un trou, sans mise à terre et sans flux de gaz avec un PCB de 1mm d'épaisseur

On remarque une tension de claquage de 1600V pour un PCB de 1mm d'épaisseur contre 800V pour un PCB de 0.5mm d'épaisseur. Comme la distance entre les électrodes a doublée et que la pression est restée pareille (1 bar), la tension de claquage double aussi. C'est la loi de Paschen [2] qui démontre que la tension de claquage est proportionnelle à la distance pour une pression constante. Toutefois, il y a une distance minimale à avoir entre les électrodes pour permettre la génération d'un plasma (quelques μm pour l'air à 1bar).

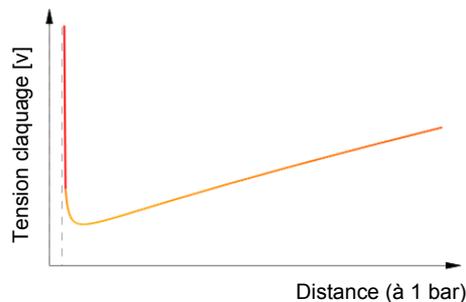


Figure 41 : Démonstration de la loi de Paschen

- Tests avec flux d'air comprimé

Des tests ont été réalisés avec flux d'air comprimé pour voir si on pouvait générer un plasma sans boucher le trou.

Les tests ont été faits uniquement sur un seul PCB avec un seul trou, avec et sans la mise à terre. La pression à la sortie du compresseur est de 4 bars.

Avec ou sans la mise à terre, on obtient uniquement des petites décharges régulières dans un trou mais pas de plasma intense. Sans la mise à terre, si on diminue la pression de l'air comprimé jusqu'à 0.5bars, un plasma intense se génère et le trou se bouche comme lors du test sans flux de gaz. Par rapport à un plasma sans flux de gaz, le flux d'air comprimé empêche la génération d'un plasma intense et empêche le PCB de se boucher.

- Tests avec flux d'argon

Pour pouvoir espérer obtenir un plasma intense dans un trou sans le boucher, des tests de claquage avec un flux d'argon ont également été réalisés.

Le premier test réalisé avec argon a été fait sur un PCB avec un seul trou, avec la contre électrode pas mise à la terre. On utilise pour cette mesure un débit d'argon de 5l/m. On obtient un plasma intense et constant dans le trou. Ce plasma ne détériore et ne bouche pas le trou.

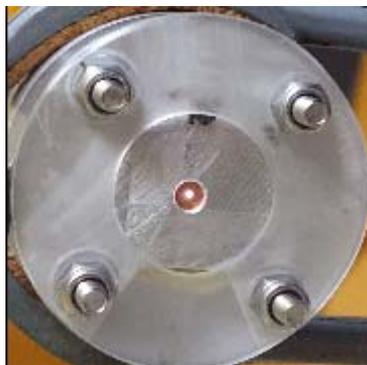


Figure 42 : Plasma constant obtenu dans le trou avec flux d'argon

Voici les mesures de courant et tension obtenus :

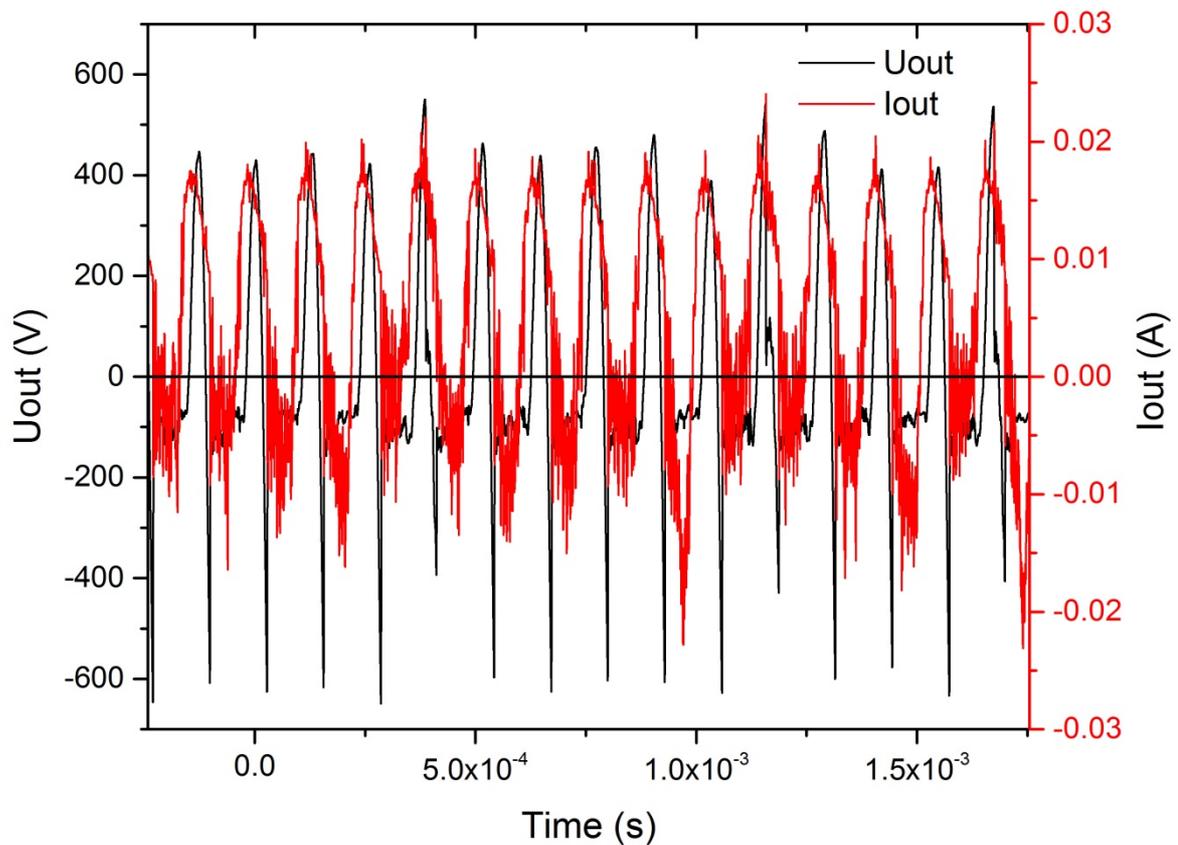


Figure 43 : Plasma obtenu dans un trou, sans mise à terre et avec un flux d'argon

On remarque que l'on n'obtient pas des pics de courant mais bien un courant de forme légèrement sinusoïdale. Cette différence, par rapport à la mesure faite sans flux de gaz, résulte de la formation d'atomes métastables dans l'argon, un phénomène propre à ce gaz noble. Les atomes neutres de l'argon, avant de pouvoir être ionisés, doivent être excités. Le processus d'excitation est le même que celui de ionisation. Une fois excités, les électrons oscillent en s'éloignant du noyau de l'atome, cet éloignement permet de pouvoir les ioniser ces atomes avec une faible tension de claquage. C'est pourquoi un courant circule dans le plasma même à basse tension après la génération du premier plasma.

On a réalisé le même test avec le flux d'argon, sauf en mettant la contre électrode à la terre. Le comportement visuel du plasma reste le même que sans mise à terre.

Voici les mesures de courant et tension obtenues :

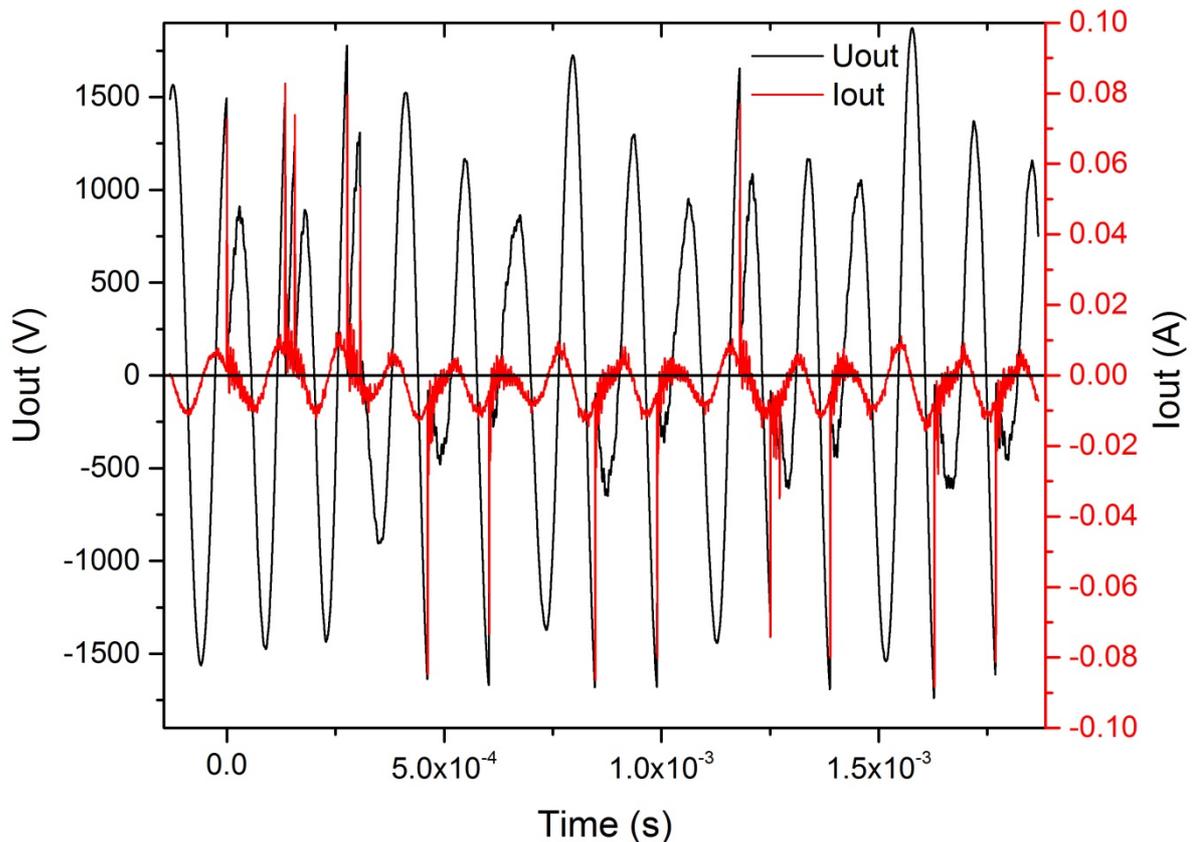


Figure 44 : Mesures sur plasma généré dans un trou, avec mise à terre et avec flux d'argon

On remarque que l'on n'a pas de phénomène d'atomes métastables et on observe une tension de claquage de 1500V au temps zéro.

Remarques : Avec de l'argon, le système a tendance à claquer plus facilement au mauvais endroit qu'avec de l'air et de l'hélium et lors des tests avec cinq trous, le plasma ne s'est généré que dans un seul trou.

- Tests avec flux 99% d'hélium – 1% d'oxygène

Ces tests ont été faits afin de voir si on arrive à obtenir un plasma intense et constant dans les cinq trous.

Un premier test a été réalisé avec ce flux, dans un trou et sans la mise à terre. Le flux est à une pression de 2bars à la sortie de la bonbonne. On obtient un plasma constant dans le trou. Ce plasma ne détériore pas le trou. Si on met la mise à terre, on obtient également un plasma constant dans le trou.

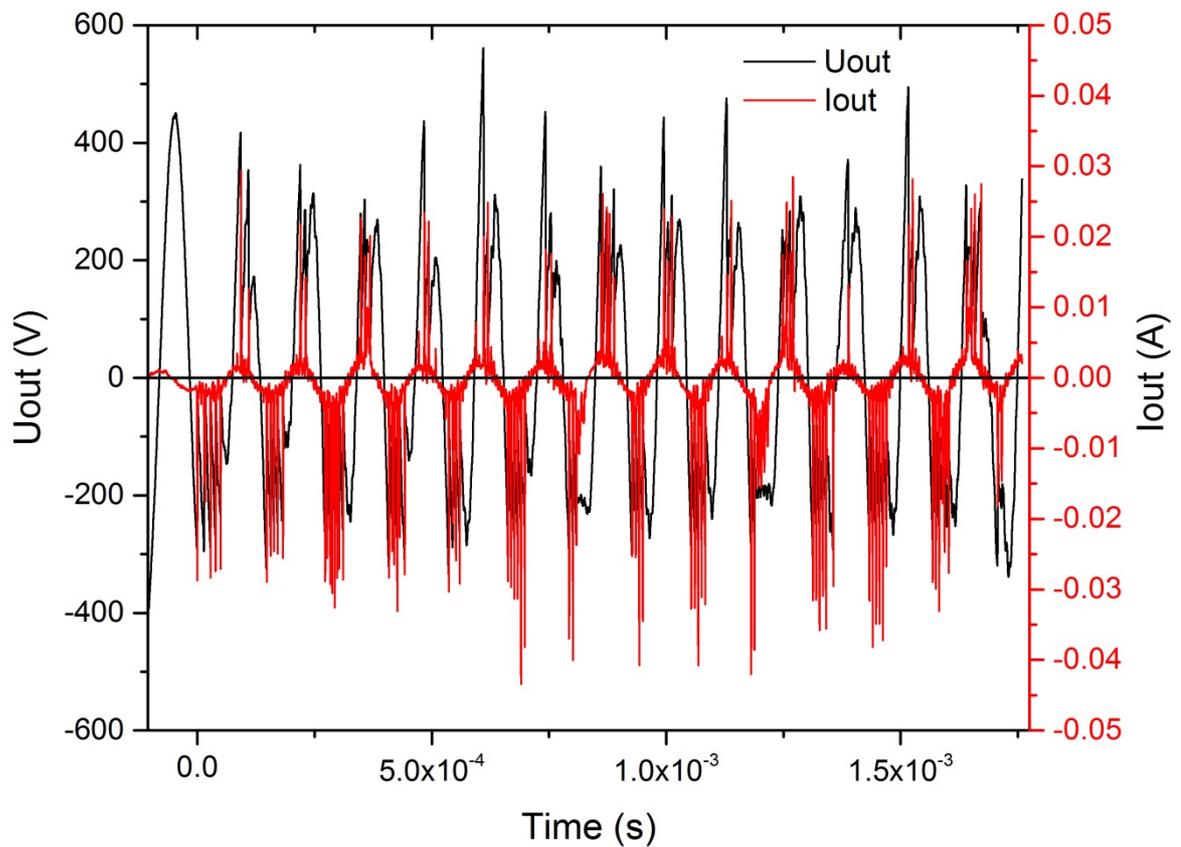


Figure 45 : plasma dans un trou, sans mise à terre avec un flux 99%He-1%O

On observe une tension de claquage à 300V.

Ces tests ont été refaits mais sur un PCB avec 5 trous.

On obtient un plasma intense constant dans les cinq trous.



Figure 46 : Plasma obtenu dans les 5 trous avec flux 99%He-1%O

Voici les mesures de courant et tension obtenues :

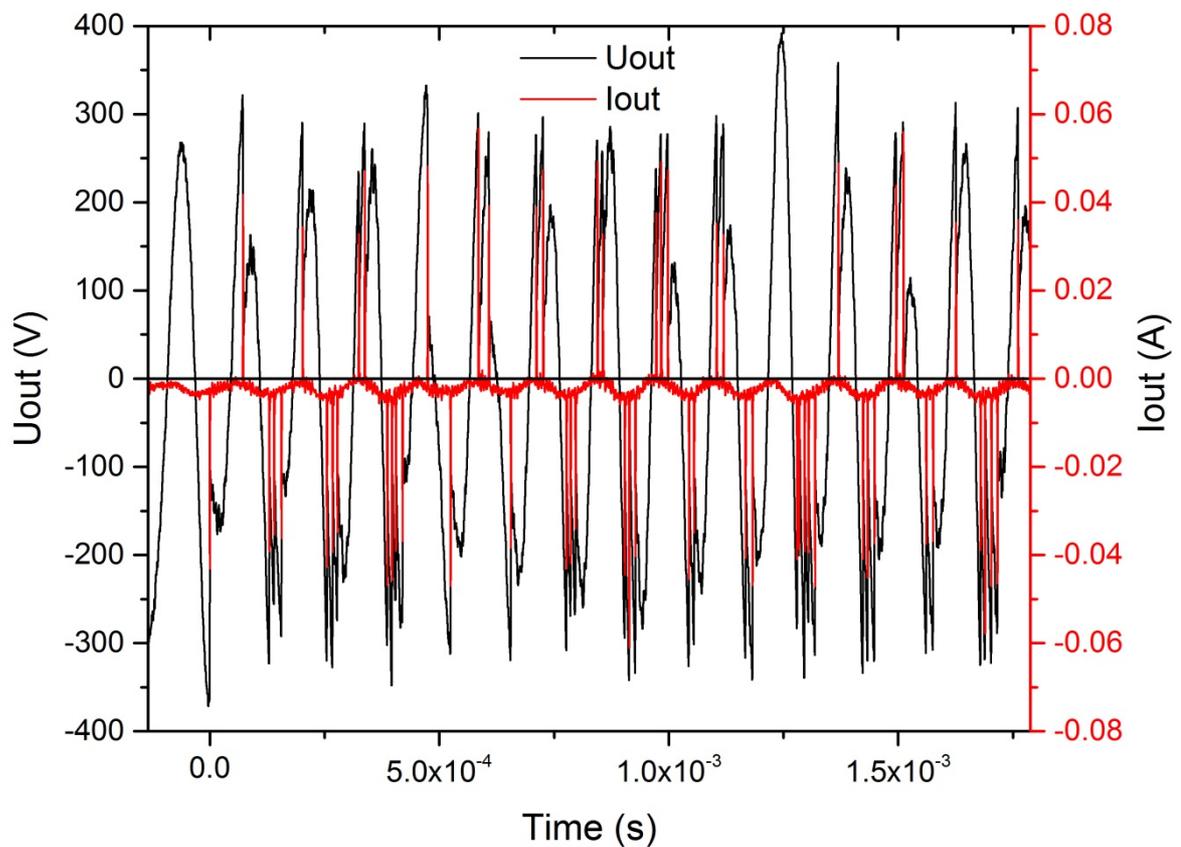


Figure 47 : Mesures sur un plasma généré dans 5 trous, sans mise à terre et avec un flux 99%He-1%O

La tension de claquage est la même que lorsqu'il n'y a qu'un seul trou. Il y a légèrement moins de pics de courant qu'avec un seul trou.

A l'œil nu, le plasma semble constant et réparti dans les cinq trous :

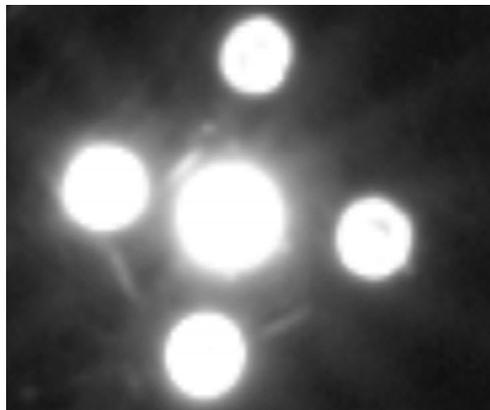


Figure 48 : Vision du plasma à l'œil nu dans les cinq trous

Alors qu'en fait, si une caméra haute vitesse (120'000 images/sec) filme le plasma au ralenti, on remarque que le plasma «clignote» et se génère alternativement dans un seul trou à la fois. Le modèle de caméra utilisée est une Phantom V411.

Les images suivantes démontrent le comportement temporel du plasma entre les 5 trous lorsque l'on filme au ralenti. Dû à la difficulté de lecture des images suivantes, les points de plasmas observés à la caméra ont été marqués d'un point rouge.

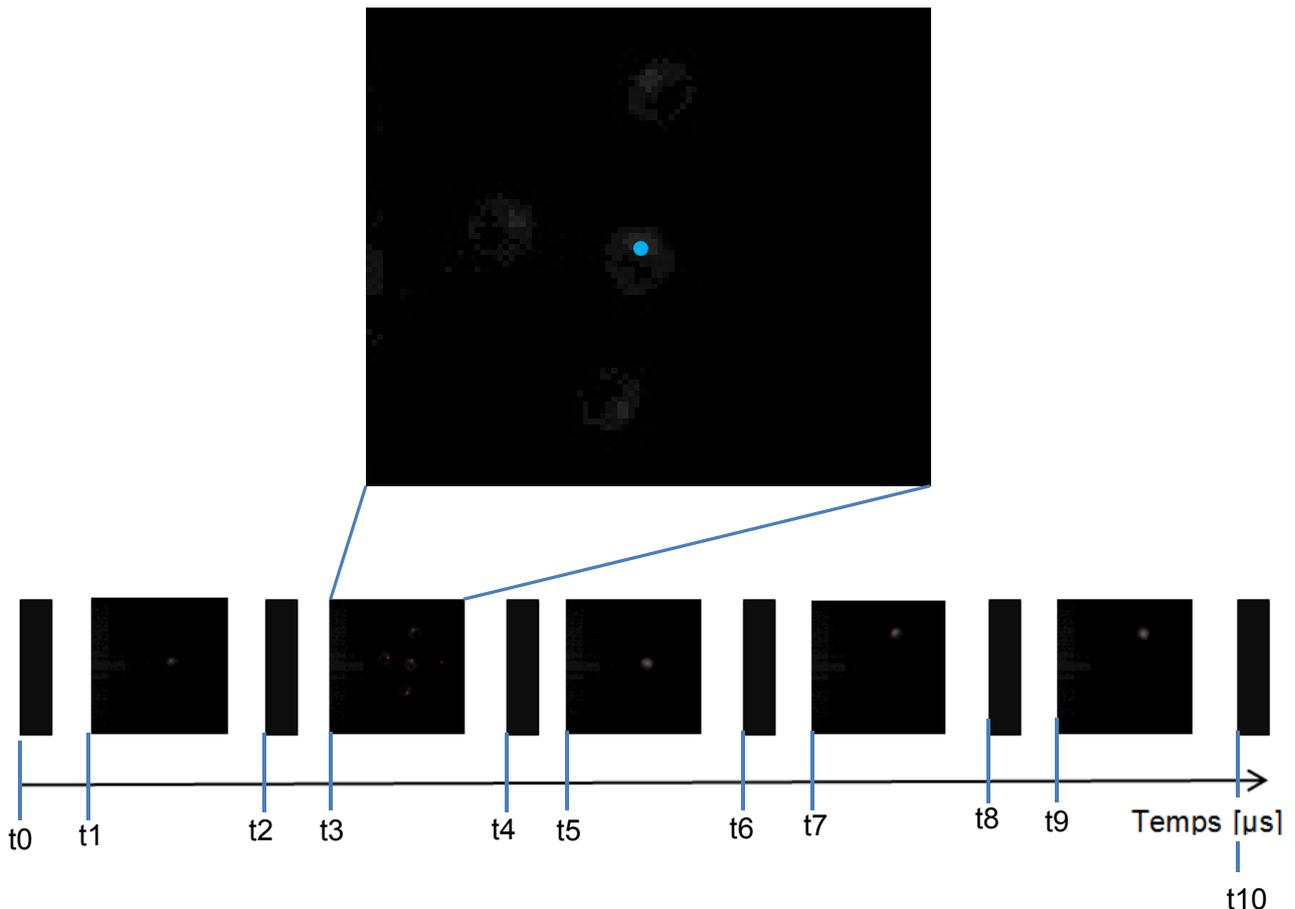


Figure 49 : Evolution du plasma dans les cinq trous en fonction du temps

$t_0 : 0 \mu\text{s} \rightarrow$ Le plasma est éteint

$t_1 : 8.32 \mu\text{s} \rightarrow$ La plasma s'allume dans le trou central

$t_2 : 66.53 \mu\text{s} \rightarrow$ Le plasma s'éteint

$t_3 : 74.84 \mu\text{s} \rightarrow$ Malgré le fait que l'on observe sur l'image les cinq trous éclairés, le plasma a lieu uniquement dans le trou central (point bleu). Le claquage s'étend d'une électrode à l'autre de manière diagonale, de ce fait il éclaire les autres trous. C'est un plasma particulier.

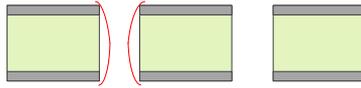


Figure 50 : Forme du plasma de manière générale

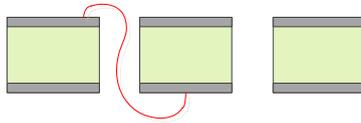


Figure 51 : Forme du plasma particulière

- t4 : 124.74 μs → Le plasma s'éteint à nouveau
- t5 : 133.02 μs → Le plasma s'allume dans le trou central
- t6 : 199.58 μs → Le plasma s'éteint à nouveau
- t7 : 207.9 μs → Le plasma s'allume dans le trou du haut
- t8 : 257.79 μs → Le plasma s'éteint à nouveau
- t9 : 266.11 μs → Le plasma s'allume dans le trou du haut
- t10 : 324.32 μs → Le plasma s'éteint à nouveau

Il aurait été intéressant d'observer avec la caméra si le plasma généré dans un trou à la fois clignote au même rythme que les pics de courant mesurés. Mais comme on peut observer sur l'image ci-dessous, la durée du pic de courant est de $2.5 \mu\text{s}$. Tandis que la caméra a un temps d'exposition de $7.67 \mu\text{s}$ et un temps où le réticule doit s'ouvrir et se fermer d'une durée de $0.65 \mu\text{s}$. De ce fait lorsqu'on prend une image avec la caméra, on prend plusieurs pics de courant en photo. Pour pouvoir observer ce clignotement, il faudrait une caméra plus rapide.

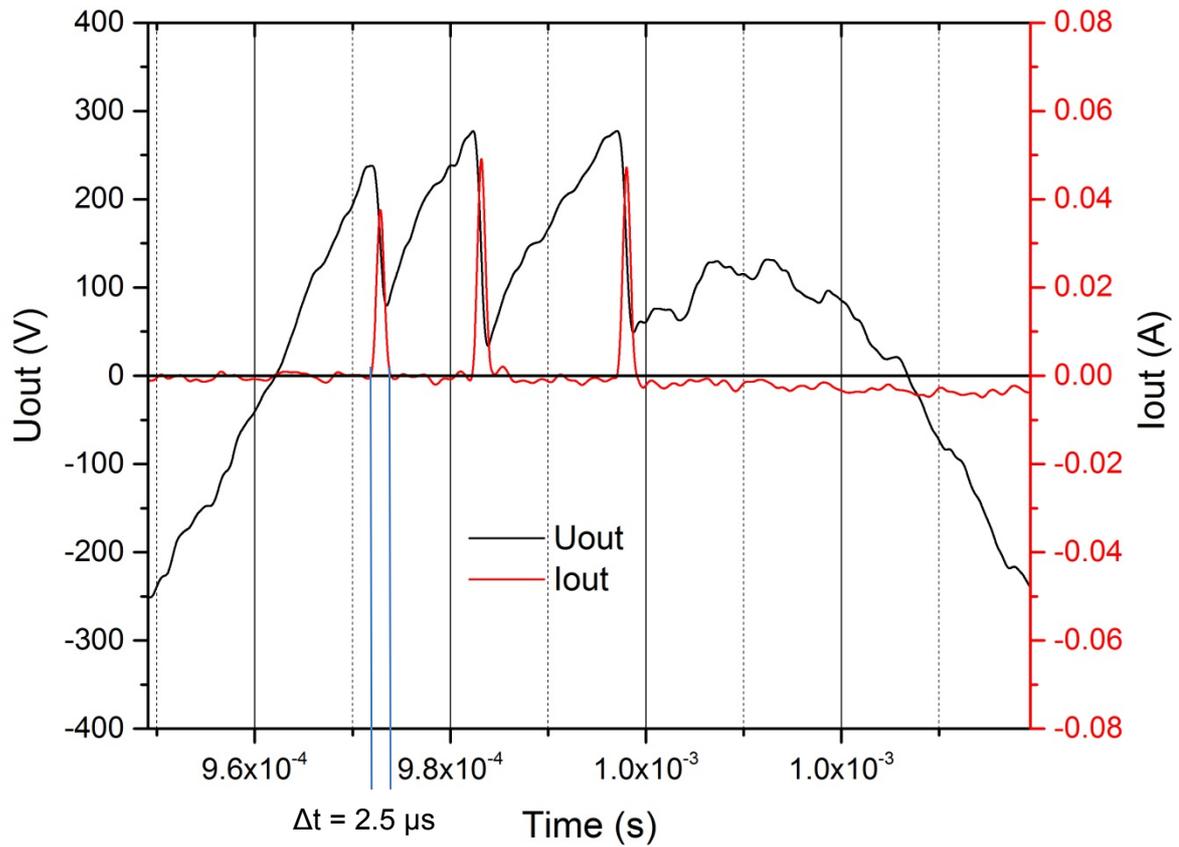


Figure 52 : Mesure du delta t d'un pic de courant

- Détérioration du PCB

Pour être sûr que les plasmas intenses générés avec un flux d'argon et d'hélium n'ont pas détérioré le PCB, des photos au microscope électronique ont été faites.

Ces photos nous ont permis de comparer l'état d'un PCB qui a généré plusieurs plasmas pour une durée totale d'environ 5 minutes avec un PCB vierge.

Les voici :

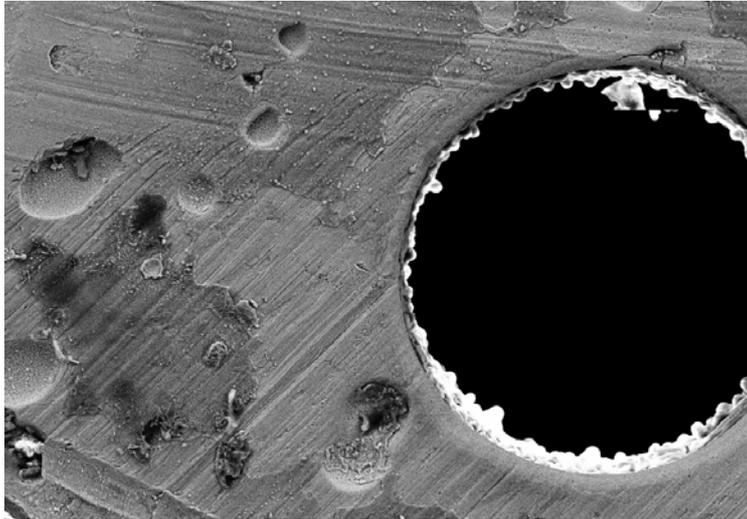


Figure 53 : Etat du PCB après utilisation agrandi 1000 fois

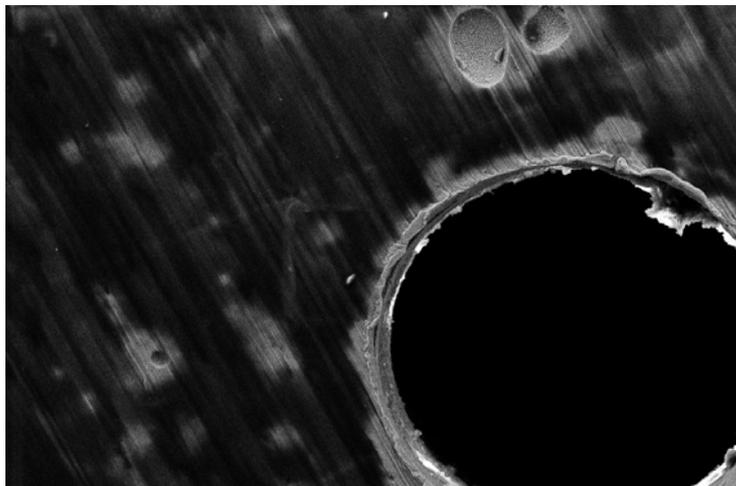


Figure 54 : Etat d'un PCB vierge agrandi 1000 fois

On peut observer sur ces images que l'état du trou sur le PCB vierge est le même que sur le PCB utilisé. Le plasma n'a donc pas endommagé l'usinage du trou. Par contre, le cuivre avoisinant est plus clair sur le PCB utilisé, ça signifie que le plasma a enlevé une petite couche d'oxydation autour du trou.

- Comparaison des puissances,

Peu importe le flux de gaz utilisé, la puissance dissipée dans un ou cinq trous est la même, la seule différence est que la chaleur dissipée par le plasma est répartie entre les 5 trous au lieu de chauffer qu'un seul trou.

La puissance instantanée a été obtenue en faisant la valeur absolue de la multiplication du courant et de la tension mesurés.

La puissance moyenne dissipée dans le plasma résulte de l'intégrale de la puissance instantanée mesurée.

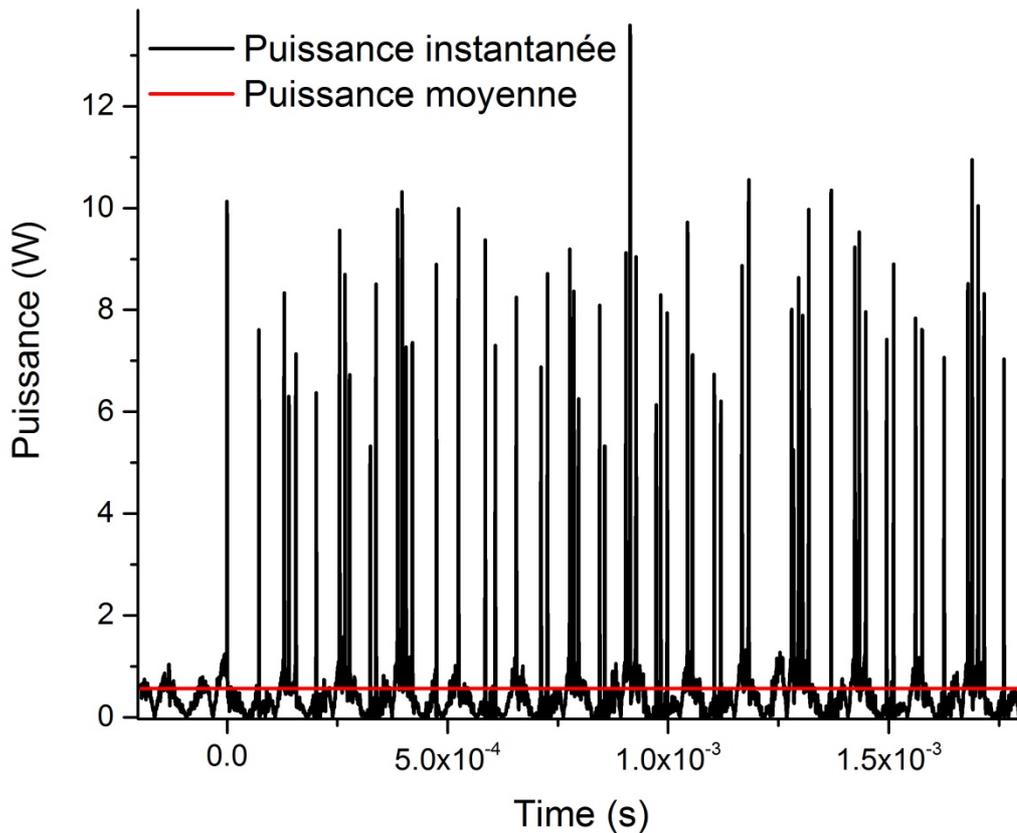


Figure 55 : Puissance instantanée et moyenne dissipée dans un plasma généré avec un flux 99%He-1%O

Une comparaison des puissances nécessaires à générer un plasma a été faite entre différents flux de gaz. Ces mesures de puissances ont été faites sans la mise à terre.

On obtient :

Flux	Puissance moyenne nécessaire à générer un plasma [W]
Pas de flux	2.996
Argon	1.725
90%Ar-10%N2O2	1.438
95%He-5%N2O2	0.735
99%He-1%O	0.568
Hélium pur	0.353

Figure 56 : Tableau de comparaison de la puissance nécessaire pour générer un plasma en fonction du flux de gaz utilisé

Le meilleur gaz pour générer un plasma est l'hélium, car il ne nécessite que 0.35W contre 1.72 pour l'Argon.

Une mesure de la puissance nécessaire à obtenir un plasma en fonction du pourcentage d'hélium présent dans un gaz argon-hélium a été faite :

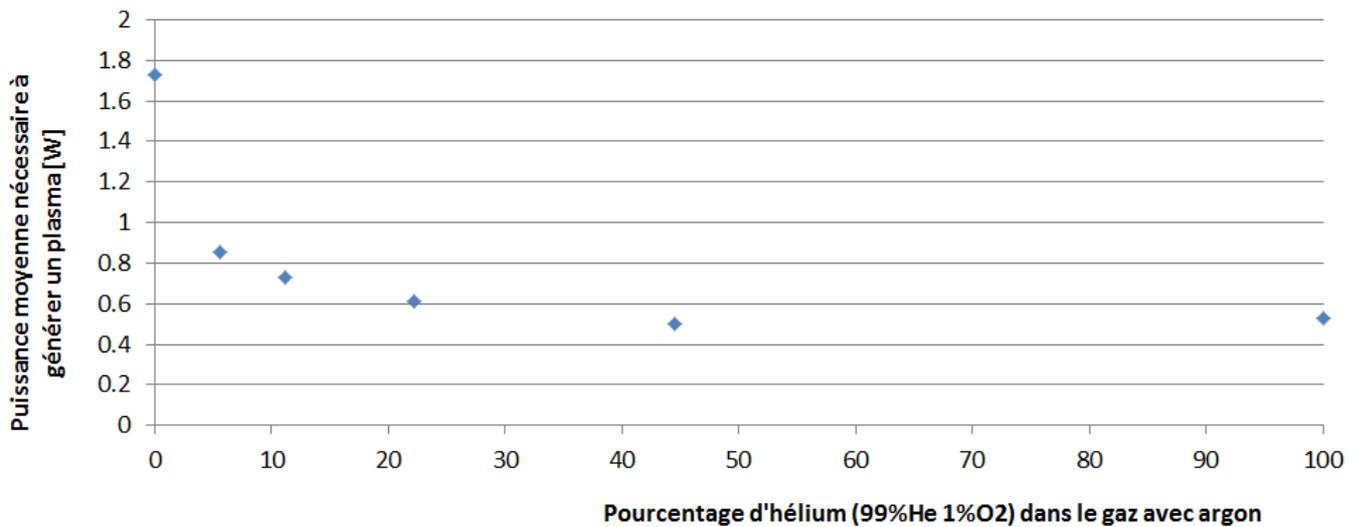


Figure 57 : Evolution de la puissance en fonction du pourcentage d'hélium

Cette courbe démontre que, plus on a d'hélium dans le gaz avec argon, moins il faut de puissance pour générer un plasma.

Avec les valeurs de puissance nécessaire à générer un plasma, l'intensité énergétique du plasma généré avec chaque flux de gaz a pu être mesurée.

Avec la formule suivante :

$$\text{Intensité énergétique} = \text{Puissance du plasma} / \text{surface du trou [w/m}^2\text{]}$$

voici les résultats obtenus :

Flux	Intensité énergétique [MW/m ²]
Pas de flux	95.36
Argon	54.92
90%Ar-10%N ₂ O ₂	45.78
95%He-5%N ₂ O ₂	23.40
99%He-1%O	18.06
Hélium pur	11.24

Figure 58 : Tableau de comparaison de l'intensité énergétique du plasma en fonction du flux de gaz utilisé

En comparaison, la valeur de l'intensité énergétique du soleil exercée sur terre est uniquement de 1000W/m²

- Calcul de la capacité du diapositif à pointe

Une mesure intéressante prise sur le dispositif à pointe nous démontre bien le fonctionnement d'un plasma et la manière de calculer la capacité entre la pointe et la plaque. Cette mesure a été prise sur le dispositif avec la pointe à 1mm de la contre-plaque, sans céramique et sans mise à terre.

La voici :

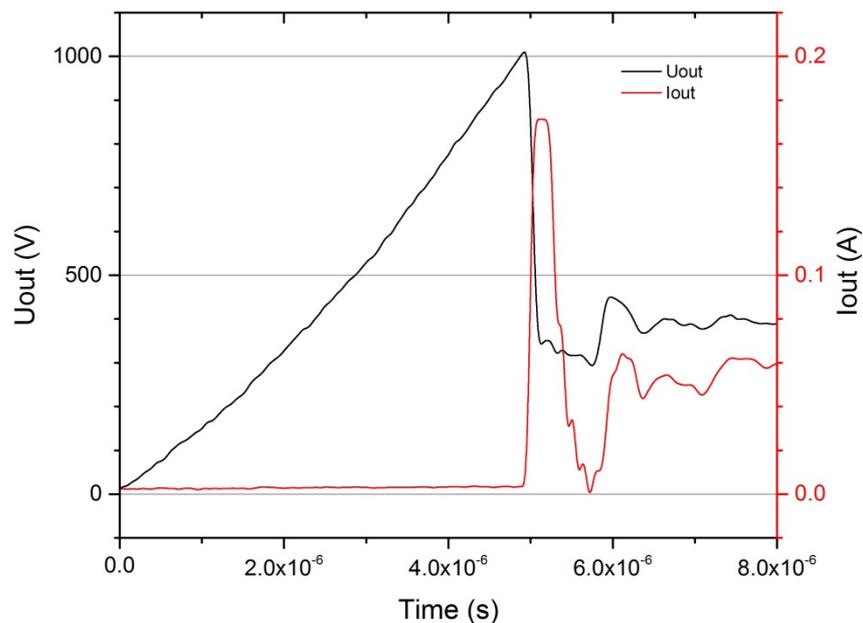


Figure 59 : Plasma sur dispositif à pointe, sans mise à terre de la contre plaque

On voit nettement la chute de tension à 1000V (tension de claquage) lorsqu'il y a un pic de courant.

En mesurant avant la génération du plasma la valeur du courant constant, la différence de tension ainsi que la différence de temps, on peut déterminer la capacité entre la pointe et la plaque par la formule suivante :

$$C = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U}$$

Figure 60 : Formule de calcul de la capacité

Avec : $I = 0.002 \text{ A}$; $\Delta t = 5 \text{ } \mu\text{s}$ et $\Delta U = 1000 \text{ V}$ on obtient $C = 10 \text{ pF}$

5.4 Schéma électrique équivalent du dispositif avec transformateur KHz

Le fabricant nous a fourni le schéma et les valeurs des composants du transformateur.

Les capacités parasites des enroulements ne figurant pas sur le schéma, il a fallu les mesurer. Avec les valeurs de capacités parasites, la valeur de la capacité du trou et la résistance d'isolation de notre dispositif à trou obtenues, le schéma équivalent du dispositif avec le transformateur a pu être établi.

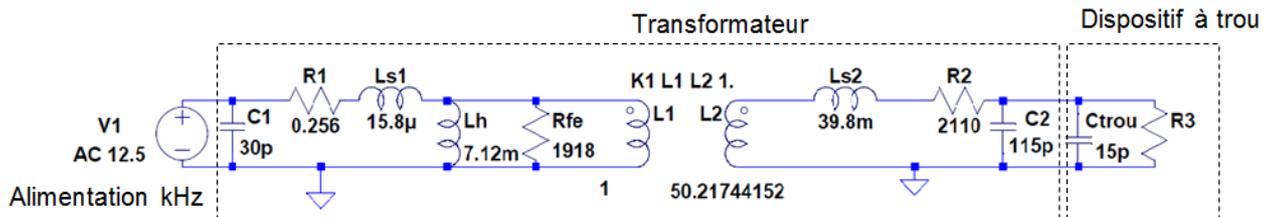


Figure 61 : Schéma équivalent du dispositif et du transformateur

Avec C1 : capacité parasite de l'enroulement au primaire

C2 : capacité parasite de l'enroulement au secondaire

Ctrou : capacité équivalente du trou

R3 : Résistance d'isolation du trou ($R3 > 220 \text{ M}\Omega$)

5.5 Comparaison du comportement en fréquence

Réponse en fréquence du dispositif avec transformateur sur LTspice

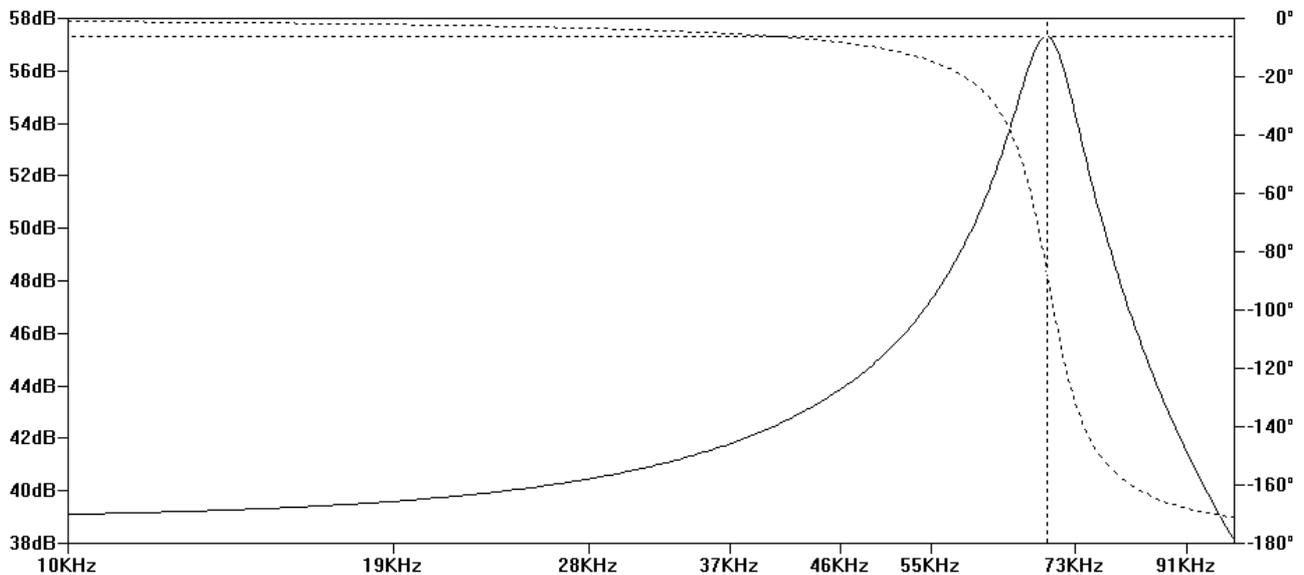


Figure 62 : Comportement en fréquence sur LTspice

Il y a une résonance électrique à 70kHz ainsi qu'un gain de 56dB pour cette fréquence

Réponse en fréquence du dispositif avec transformateur dans la réalité :

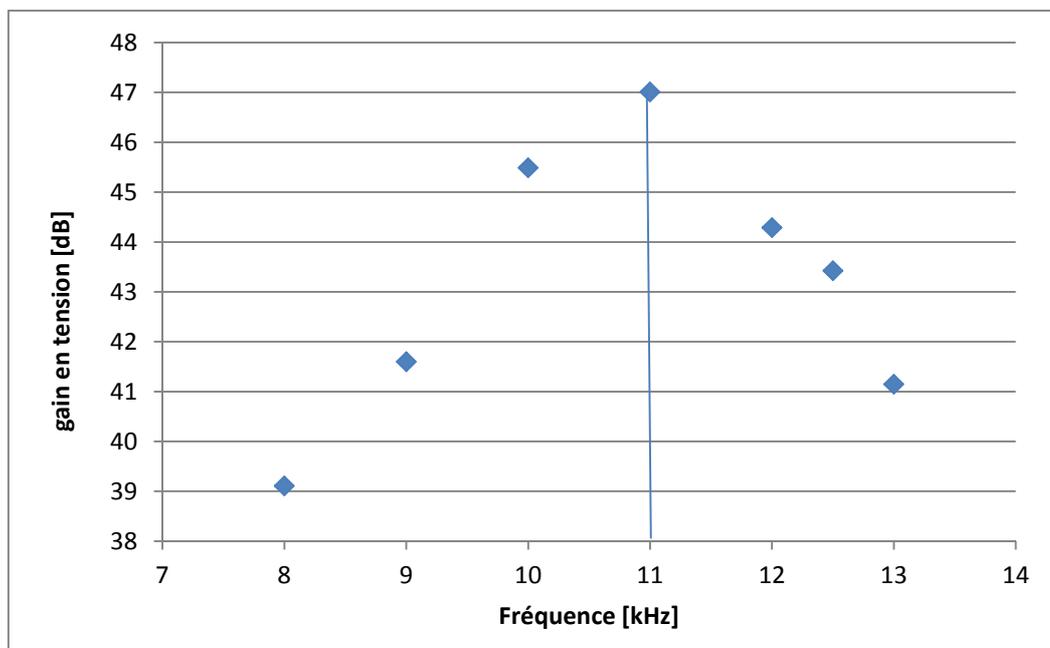


Figure 63 : Comportement en fréquence sur le dispositif avec transformateur réel

Il y a une résonance électrique à 11 kHz ainsi qu'un gain de 47dB pour cette fréquence.

La différence de gain entre la simulation et la mesure réelle peut s'expliquer du fait que la tension d'entrée est fixe pour le comportement en fréquence sur simulation, alors qu'elle change sur chaque mesure sur le comportement réel car la tension doit être diminuée au fur et à mesure qu'on approche de la résonance pour éviter de générer un plasma.

La différence de fréquence de résonance peut s'expliquer par le fait qu'avec le dispositif, la valeur de capacité totale change et que les câbles utilisés pour alimenter le trou peuvent également influencer cette valeur. Des erreurs de mesures sont également à prendre en compte.

Cependant on constate que le comportement de manière qualitative est le même sur la simulation que dans la réalité.

5.6 DC continu et DC pulsé

Des tests ont été réalisés en DC et DC pulsé haute tension sur le dispositif à trou usiné sur PCB.

L'alimentation DC pulsée a été utilisée avec une fréquence de pulsation de 8kHz ainsi qu'un rapport de modulation de 50%.

On arrive à obtenir un plasma constant dans le trou avec un flux d'hélium avec l'alimentation DC et DC pulsé

Par contre sur un PCB avec 5 trous, avec l'alimentation DC et DC pulsé, on obtient un plasma uniquement dans 3 trous.

Une puissance de 0.65W est nécessaire pour générer un plasma dans un PCB avec un seul trou sans flux de gaz.

6 ORIENTATIONS FUTURES

6.1 Mécanique

6.1.1 Dispositif avec électrode céramique

Afin d'éviter un échauffement trop important de l'électrode à trou, celle-ci pourrait être usinée dans une céramique.

6.1.2 Dispositif avec mise sous vide

Pour pouvoir générer des plasmas avec des tensions de claquage plus basses, afin notamment de pouvoir obtenir des plasmas spontanés en MHz, un système de pompe à vide pourrait être designé sur le dispositif de manière à obtenir une pression plus basse.

6.2 Alimentation MHz

6.2.1 Obtenir un claquage en MHz

Plusieurs améliorations pourraient permettre d'obtenir un plasma spontané dans le trou sur PCB avec l'alimentation MHz, afin de voir si à cette fréquence la puissance nécessaire à générer un plasma diminue encore. Pour obtenir ce claquage en MHz, le design et la conception d'un système de mise sous vide du dispositif pourraient être envisagés ainsi que le développement d'un transformateur élévateur de tension conçu pour MHz.

6.2.2 Obtenir un plasma dans plusieurs trous simultanément

La génération d'un plasma dans plusieurs trous en même temps, et non pas en clignotant comme on l'a aperçu à la caméra haute vitesse, devrait permettre la diminution de la puissance nécessaire à générer un plasma. Pour cela il faudrait essayer d'améliorer la précision de l'usinage des trous et tester dans différents matériaux comme dans une céramique par exemple. Il faudrait également réussir à obtenir un claquage en MHz.

7 CONCLUSION

- 1) Un montage permettant l'alimentation et la génération de plasma dans différents supports facilement interchangeables a été réalisé. Il permet également le passage de différents flux de gaz et il est résistant en température. Il peut être facilement alimenté par toute sorte d'alimentation (MHz, kHz, DC, DC pulsé,...). Il a également été conçu afin d'empêcher un maximum de claquages non désirés.
- 2) Le schéma équivalent électrique du dispositif à trou ainsi que celui du transformateur haute tension utilisé ont pu être établis.
- 3) Le comportement en fréquence (kHz) du dispositif accouplé au transformateur haute tension a pu être simulé et comparé avec celui obtenu sur le montage réel.
- 4) L'observation à la caméra haute vitesse a pu dévoiler que le plasma obtenu dans les 5 trous n'est en fait qu'un plasma qui se génère alternativement d'un trou à l'autre. Chose que les études déjà existantes [4][5][6] ne dévoilent pas.
- 5) Les expériences ont démontré qu'en fonction du gaz qu'on utilise et selon que le dispositif est mis à la terre ou non, le plasma ne se comporte pas de la même manière et qu'il peut ou non détériorer le trou du support.
- 6) Les tests exécutés sur les différents flux de gaz nous permettent de savoir avec quel gaz on a la puissance nécessaire pour générer un plasma la plus basse.
- 7) On connaît l'intensité énergétique des plasmas générés pour chaque flux de gaz.
- 8) On sait maintenant les avantages et les désavantages de chaque alimentation utilisée pour la génération de plasma.
 - a. kHz : Permet la génération de plasma dans un grand nombre de support en pouvant moduler un nombre de paramètres conséquents. La variation de la fréquence et l'accouplement du système à un transformateur permet l'apparition d'une résonance
 - b. MHz : Ne permet pas pour l'instant la génération spontanée de plasma. Cependant, lorsqu'un moyen d'obtenir un claquage sera disponible (à l'aide d'un transformateur par exemple), il serait intéressant d'étudier le comportement des plasmas générés
 - c. DC et DC pulsé : Facilement transportable et relativement bon marché, permettent la génération de plasma dans un grand nombre de supports. Cependant aucun plasma dans les 5 trous n'a été obtenu et cette alimentation ne permet pas l'apparition d'une résonance.

8 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

- M. Christoph Ellert pour sa proposition de sujet et son suivi durant tout le projet
- M. David Martinet pour son aide et ses conseils lors des mesures du dispositif
- Le personnel de l'atelier mécanique et de l'atelier d'électronique pour le travail effectué sur la conception du dispositif.

9 DATE ET SIGNATURE

Sion, le 15 juillet 2016.

Yohan Cordonier

10 REFERENCES

Bibliographie :

- [1] Y. Cordonier, «Travail de semestre : source de plasma ponctuelle» 2016.
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Paschen
- [3] Indrek Jogi. 2011. Trainings course and Summer school. Methods of plasma generation and plasma sources. University of Tartu
- [2] Liangliang Lin, Qi Wang. 2015. Microplasma: A new generation of technology or functional nanomaterial synthesis. University of Eindhoven
- [4] Adam Lodes, Randy Curry. 2009. Atmospheric glow discharge plasma using a microhollow cathode device. University of Missouri-Columbia
- [5] H. Barankova and L.Bardos.1999.Fused hollow cathode cold atmospheric plasma. University of Uppsala
- [6] Cordula Meyer, Richard Heming, Evgeny L. Gurevich, Ulrich Marggraf, Michael Okruss, Stefan Florek and Joachim Franzke. 2010. Radiofrequency driven and low cost fabricated microhollow cathode discharge for gaseous atomic emission spectrometry.

11 ANNEXES

Annexe 1 : Liste des pièces

Annexe 2 : Assemblage mécanique avec électrode en aluminium

Annexe 3 : Assemblage mécanique avec électrode usinée sur PCB

Annexe 4 : Document sur le principe de la cathode creuse (référence [4])

Annexe 5 : Document sur le principe de la cathode creuse (référence [5])

Annexe 6 : Document sur le principe de la cathode creuse (référence [6])