



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final 2 décembre 2010

Lampe au soufre à bulbe séparé

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Energie dans les bâtiments
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Mandataire:

Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud
Institut de Micro et Nano Techniques
14, Av. des sports
CH-1400 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Solaronix SA
129, Rue de l'Ouriette
CH-1170 Aubonne
www.solaronix.com

Auteurs:

Sergio Marques Dos Santos, heig-vd,
Gilles Courret, heig-vd, gilles.courret@heig-vd.ch
Andreas Meyer, Solaronix SA, andreas@solaronix.com

Responsable de domaine de l'OFEN: Andreas Eckmanns

Chef de programme de l'OFEN: Charles Filleux

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 154144 / 103152

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Table des matières

1	But.....	10
2	Montage	13
2.1	Prototype	13
2.2	Monitoring.....	14
3	Essais du magnétron	16
3.1	Conditions d'allumage	16
3.2	Mesures.....	18
3.2.1	Fréquence 10kHz, rapport cyclique 10%.....	18
3.2.2	Fréquence 10kHz, rapport cyclique 5%.....	19
3.2.3	Fréquence 5kHz, rapport cyclique 10%.....	20
3.2.4	Fréquence 5kHz, rapport cyclique 5%.....	21
3.2.5	Essais complémentaires à plus hautes fréquences	22
4	Essais d'allumage	23
4.1	Influence du rapport cyclique	23
4.2	Études de la tension cathodique	24
4.3	Tests de l'influence du câble coaxial	25
4.3.1	Objet	25
4.3.2	Câble n°5	26
4.3.3	Câble n°5'	27
4.3.4	Câble n°3	28

4.4	Influence des conditions initiales	29
4.5	Influence de la forme de l'antenne de couplage du bulbe	32
4.6	Antenne auxiliaire d'allumage	32
4.6.1	Fil conducteur épais.....	32
4.6.2	Fil conducteur fin	34
4.7	Conclusion.....	35
5	Essais opérationnels	37
5.1	Analyse du photo-signal.....	38
5.2	Seuil de détection.....	41
5.3	Future version de l'algorithme du régulateur	42
6	Version à bulbe en alumine translucide	43
6.1	Spectre de transmission.....	43
6.1.1	Objectif.....	43
6.1.2	L'échantillon	44
6.1.3	Conditions de mesure.....	44
6.1.4	Résultats.....	45
6.1.5	Conclusion	46
6.2	Approvisionnement en bulbes en alumine translucide	46
7	Conclusion	47
8	Annexes	49
8.1	Corps de l'antenne de couplage du bulbe	49
8.2	Vis de bout d'antenne	49

8.3	Bulbe en quartz fondu	51
8.4	Difficultés rencontrés et résolution	51
8.4.1	Problème de décharge dans l'antenne.....	51
8.4.2	Rupture du bulbe	52
8.5	Bulbe en alumine	52
9	Bibliographie	54

Résumé

Pour que le spectre d'émission ne dérive pas au fur et à mesure de l'usage du bulbe, celui-ci est dépourvu d'électrode, contrairement à ceux des lampes à décharge standards. En contrepartie son allumage procède par résonance électromagnétique. Le résonateur est constitué du guide d'onde creux, du câble coaxiale et de l'antenne de couplage du bulbe. Bien que le câble pénalise fortement le facteur de qualité, l'allumage a quand même pu être obtenu. Pour arriver à cela nous avons réalisé un modulateur capable de pulser le magnétron de sorte à hacher le flux microonde et, en conservant la puissance moyenne, faire atteindre à l'énergie stockée dans le résonateur une valeur pic suffisamment élevée. Nous avons testé différents câbles coaxiaux de divers diamètres et longueurs, pour explorer les limites de notre modulateur.

Deuxième grand progrès atteint dans ce projet, la cage de Faraday qui doit entourer le bulbe ne fait plus partie du résonateur électromagnétique, ce qui permet de libérer son design. Ainsi le réflecteur métallique du luminaire peut constituer une partie de cette enceinte. La grille a dû être raccourcie, et l'allumage était quand même obtenu. Nous avons aussi constaté expérimentalement que l'allumage peut être facilité en ajoutant une antenne auxiliaire du côté opposé de l'enceinte, de sorte à ce que le bulbe se trouve entre les deux antennes.

Une première version de l'algorithme de régulation de la lampe a été testée, ce qui a permis de mettre en évidence les aspects clés de cette partie. Le schéma d'une version plus sophistiquée est maintenant posé. Prolonger ce développement nous ferait toutefois dépenser plus qu'autorisé dans ce projet. Enfin, nous avons mesuré le spectre en transmission de l'alumine translucide, un meilleur réfractaire que le quartz fondu, et vérifier son applicabilité à la lampe au soufre. Un bulbe en céramique permettrait en effet d'augmenter la température du plasma et donc l'efficacité de la lampe, en conséquence.

Abstract

To avoid the spectrum fading, the bulb has no electrode, as opposed to the ones of standard discharge lamps. In counterpart the ignition is obtained by electromagnetic resonance. The resonator

is composed of a hollow waveguide, a coaxial cable and the antenna that couples the bulb. Although the cable dumps heavily the resonator, the ignition was obtained. To reach this success we have design a modulator able to pulse the magnetron so that the microwave flux is hashed and, as the average power is kept constant, the peak value of the energy stored in the resonator is raised enough. We have tested different cables, of different diameter and different length, to explore the capability of our modulator.

Second great progress achieved in this project, the metallic grid that must surround the bulb as a Faraday's enclosure doesn't take part in the electromagnetic resonator any more, which set free its design. As an advantageous result, the metallic reflector of the luminary can serve as a part of the Faraday's enclosure. The grid had to be shorted, and the ignition was still obtained. We have also observed experimentally that the ignition can be eased by adding an auxiliary antenna on the opposite side of the Faraday's enclosure, in such a way that the bulb lies in between the two antennas.

A first version of the algorithm of regulation of the lamp has been tested, allowing us to identify the key aspects of this part. The schema of a more sophisticated algorithm has been laid down. Further development would however lead us to spend more than allowed in the present project. Besides, we have measured the spectrum of transmission of translucent alumina, a better refractory material compared to fused quartz, and checked its suitability to the sulfur lamp. A bulb in ceramic would indeed allow raising the temperature of plasma and hence the luminous efficiency of the lamp, as a result.

Résumé complet

Faisant suite à deux rapports intermédiaires [1, 2], le présent rapport achève les étapes n° 6 et 7 du projet « Lampe au soufre à bulbe séparé »

(RemoteSulphurLamp) :

- Etape 6 : Montage du prototype et tests.
- Etape 7 : Développement de la version à bulbe translucide.

Il s'agit donc maintenant, en plus de conclure l'étape n° 7, de monter et tester le prototype de lampe au soufre à bulbe séparé (étape 6).

Le prototype réalisé est exempt de mercure, il répond ainsi à la directive européenne sur l'environnement [3], contrairement à la principale technologie concurrente utilisée dans les luminaires de moyenne et forte puissance à bon rendu de couleur (halogénure métallique).

Pour l'allumage du prototype on cherche premièrement à éléver la valeur pic de l'énergie stockée dans le résonateur électromagnétique, qui est constitué du guide d'onde, du câble coaxial et l'antenne de couplage du bulbe. Dans ce but, la fréquence de modulation est abaissée en dessous 10 kHz. On cherche aussi à éléver la valeur pic de la puissance instantanée délivrée par le magnétron en abaissant le rapport cyclique. Ces deux réglages sont déterminants à l'allumage. Nous avons montré par l'expérience que le magnétron peut supporter des fréquences de l'ordre de 1 kHz avec des rapports cyclique de 20, 10 et 5 %.

Les tests effectués avec différents câbles coaxiaux montrent que diamètre et longueur sont des facteurs importants, influençant non seulement la dissipation d'énergie, donc l'efficacité de la lampe, mais l'accordage du résonateur électromagnétique. Pour chaque câble, nous avons déterminé la position idéale du sabot de la terminaison et nous avons étudié le délai d'allumage, qui est une variable aléatoire. Nous avons pu observer de plus que l'humidité de l'air n'est pas un facteur critique pour allumage la lampe, en se mettant dans des conditions significatives, c'est-à-dire en condition estivale dans un bâtiment sans traitement d'air.

Par ailleurs nous avons constaté expérimentalement que l'allumage peut être facilité en ajoutant une antenne auxiliaire du côté opposé de la cage qui entoure le bulbe, de sorte à ce que ce dernier se trouve entre l'antenne de couplage et l'auxiliaire. Pour le design de celle-ci, certaines précautions sur sa taille, son diamètre et sa forme doivent être prises pour éviter qu'une décharge n'apparaisse ailleurs que dans le bulbe.

Les essais opérationnels ont mis en évidence une difficulté dans l'élaboration de l'algorithme de régulation de la fréquence de répétition. La cause du problème est cernée : dans une phase transitoire d'allumage, la FFT de la photodiode ne montre plus aucun pic émergeant du bruit. La fréquence saute alors au hasard, ce qui a entraîné l'extinction subite du plasma dans le cas de nos essais. Le futur algorithme devra donc passer à travers cette phase transitoire en boucle ouverte, en incrémentant la consigne puisque la température dans le bulbe est alors en augmentation. La version la plus avancée de notre algorithme de régulation a donné des résultats prometteurs. Le plan d'une future version de l'algorithme a été échafaudé. Mais le développement complet du régulateur s'avère sortir largement des moyens alloués dans le présent projet.

Concernant l'alumine translucide, nos essais sur un échantillon tubulaire montrent que ce matériau est aussi transparent sur l'ensemble du domaine spectral d'émission du plasma de soufre que sur celui du sodium. Les bulbes des lampes au sodium sont fabriqués en alumine translucide. Meilleur réfractaire que le quartz fondu, son emploi pour la fabrication des bulbes de la lampe au soufre devrait accroître son efficacité lumineuse. Un prototype n'a toutefois pas pu être testé faute de fournisseur car fabriquer et surtout sceller un bulbe de forme sphérique fabriqué dans ce matériau pose des problèmes technologies ardues. A cause d'un changement de stratégie, le fournisseur que nous envisagions ne donne pas suite à notre demande d'offre. Cette compétence est rare. Nous sommes à la recherche d'une source de substitution.

1 But

Le but final de ce projet est de réaliser un prototype industrialisable dont les coûts de fabrication soient acceptables.

Les 5 premières étapes du projet sont réalisées et font l'objet de rapports intermédiaires [1, 2, 4] :

- Etape 1: Tests de câbles coaxiaux.
- Etape 2: Développement d'un système accordable de couplage capacitif du bulbe (par antenne) avec mise sous vide de l'extrémité de l'antenne.
- Etape 3: Accordage du couplage du bulbe afin d'allumer la décharge par mise en résonance électromagnétique.
- Etape 4 : Développement d'un modulateur à semi-conducteur.
- Etape 5 : Tests du modulateur à semi-conducteur.

Il s'agit maintenant de monter et tester le prototype de lampe au soufre à bulbe séparé (étape 6). En outre ce rapport conclue aussi la septième et dernière étape : Développement de la version à bulbe en alumine translucide et tests.

Le prototype réalisé est exempt de mercure ; il répond ainsi à la directive européenne sur l'environnement¹, contrairement aux technologies concurrentes actuelles (allochrome métallique est lampe fluorescente).

Le bulbe est placé au bout d'un câble RF (cf. Figure 1). Comme la majeure partie de la dissipation d'énergie provient du ballast (alimentation électronique, magnétron), on sépare de cette manière l'émission de lumière (bulbe) de la majeure partie de l'émission thermique. Ainsi en encastrant le ballast dans un faux plafond, on peut alléger considérablement la charge de climatisation du bâtiment.

¹ Directive 2002/95/CE

Dans le présent travail, il s'agit d'effectuer des campagnes de mesure pour caractériser notre prototype de lampe de manière qualitative et quantitative.

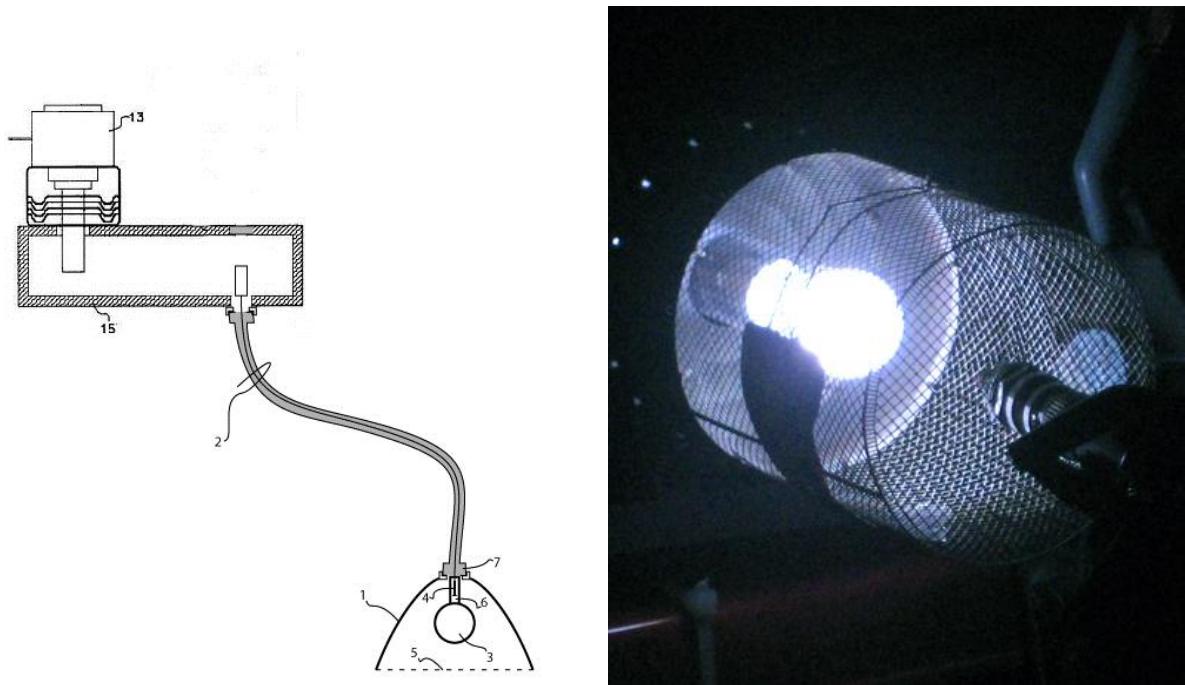


Figure 1 Prototype de lampe à plasma à bulbe séparé

Nous allons lister les principales différences entre la lampe au soufre proposée actuellement sur le marché (Figure 2), donc à bulbe tournant, et notre prototype à bulbe statique et séparé (Figure 1) afin de mettre en évidence ses avantages.

La cavité résonante cylindrique (2, Figure 2) est remplacé par un câble coaxial (2, Figure 1), dont la longueur est ajustée pour obtenir l'allumage par résonnance magnétique [1, 4]. La résonnance n'étant plus nécessaire dans la partie bulbe (1, Figure 1), il est désormais possible de mettre un réflecteur fermé par une grille plane (5, Figure 1). Ce dispositif est nettement moins cher à produire que l'ancienne grille cylindrique (2, Figure 2) et moins encombrant. Cette configuration ouvre la porte à de nouvelles possibilités d'intégration (projecteur, lustre, applique, plafonnier).

Nous utilisons un bulbe en quartz fondu (3, Figure 1). Grâce à ce projet nous avons trouvé le moyen de s'affranchir de la nécessité de faire le vide dans le volume contenant l'antenne (6, Figure 1, cf. §2.1 Prototype, p. 13). Dans une version future, le bulbe pourrait être fabriqué en alumine translucide (cf. §6 Version à bulbe en alumine translucide, p. 43). Son point de fusion étant plus élevé que celui du

quartz fondu, en augmentant la température du plasma cette solution devrait accroître l'efficacité lumineuse de la lampe.

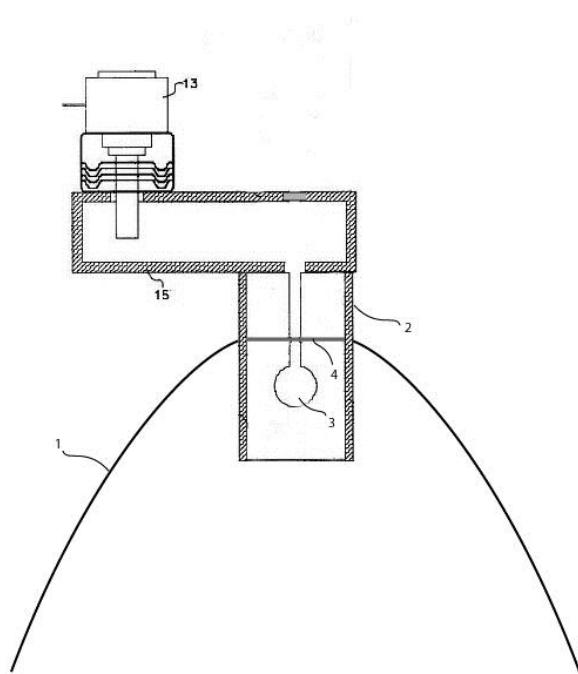


Figure 2 Modèle actuellement sur le marché

2 Montage

2.1 Prototype

Une description détaillée du prototype est disponible dans le rapport intermédiaire II [2]. Quatre modifications ont été implémentées :

- 1- La grille a été amputée de sa partie opaque afin de pouvoir suivre la température du bulbe par thermographie (cf. Figure 3, à g.).
- 2- Une antenne auxiliaire d'assistance d'amorçage a été ajoutée au fond de la grille. Elle est constituée d'un bout de fils de cuivre de 1 mm de diamètre (cf. Figure 4, à d.). Elle sert à faciliter l'amorçage d'une décharge électrique dans le bulbe.
- 3- Le bouchon de mise sous vide du bout de l'antenne a été supprimé puisque, comme nous l'avons montré expérimentalement, l'antenne n'engendre pas de risque de décharge électrique atmosphérique si elle est suffisamment épaisse à son extrémité. En conséquence, le bout de l'antenne de couplage du bulbe a été élargi : le diamètre de la tête de la vis qui termine l'antenne passe de 9 à 10 mm (cf. §8.1, page 49). Pour maintenir l'antenne dans l'axe de la terminaison, nous l'avons passé dans une bague de quartz fondu (cf. Figure 3, à d.).
- 4- Le bulbe, qui est aussi en quartz fondu, est légèrement plus gros : son diamètre extérieur passe de 25 à 26 mm (cf. §8.3, page 51).



Figure 3 Grille raccourcie (à g.) et antenne élargie (à d.).



Figure 4 Antenne auxiliaire d'assistance d'amorçage.

2.2 **Monitoring**

Le monitoring est assuré comme suit :

- a- Pour mesurer la température du bulbe, une caméra infrarouge est installée au-dessus du bulbe, comme on le voit en haut à droite de la Figure 5.



Figure 5 Vue d'ensemble de l'installation

b- Pour mesurer les variations du rayonnement produit par la lampe, une photodiode rapide munie d'un amplificateur est installée à environ 1 mètre du bulbe. La photodiode est montée à l'extrémité d'une fibre optique, dont on voit l'extrémité en bas à gauche de la Figure 5. Ce montage permet de la placer à plus de 2 mètre du modulateur de sorte à éviter le parasitage par le rayonnement du modulateur. En outre son amplificateur étant alimenté par batterie, le parasitage par le secteur est exclu. L'immunité obtenue est testée en observant l'effet de l'obturation de la fibre optique. Le signal reçu de la photodiode est enregistré puis analysé par FFT.

3 Essais du magnétron

3.1 Conditions d'allumage

Comme dans la lampe au soufre standard (version commercialisée), l'allumage de notre prototype est initialisé par un claquage du gaz rare contenu dans le bulbe, ce qui est obtenu par une résonance électromagnétique. Mais dans notre nouveau prototype, le résonateur comporte en plus un câble coaxial, ce qui diminue considérablement le facteur de qualité. Ceci explique pourquoi l'allumage de ce nouveau prototype est plus difficile, bien que l'ensemble câble terminaison ait été accordé au magnétron. Ce problème a été résolu grâce à notre nouveau modulateur [4]. L'allumage est obtenu en envoyant dans le bulbe des flashes de microonde, que le magnétron produit lorsqu'il est alimenté par pulses [2]. Une méthode pour augmenter la puissance pic d'un pulse consiste à réduire le rapport cyclique.

En effet, la durée d'un pulse est le produit du rapport cyclique τ par la période de pulsation T :

$$\text{durée} = \tau \cdot T \quad 3.1$$

La puissance moyenne absorbée par le magnétron est :

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) \cdot dt \quad 3.2$$

Passons en temps adimensionnel 6.1:

$$\begin{aligned} t^* &= \frac{t}{T} \\ dt^* &= \frac{dt}{T} \end{aligned} \quad 3.3$$

Faisons apparaître la valeur moyenne de la puissance pendant le pic $P_{\text{pic}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p(t^*) \cdot dt^*$, que l'on nomme puissance pic.

$$\bar{P} = \int_0^1 p(t^*) \cdot dt^* = \int_0^{\tau} p(t^*) \cdot dt^* = P_{\text{pic}} \cdot \tau \quad 3.4$$

Nous voyons que la puissance moyenne ne dépend pas de la fréquence mais seulement de la puissance pic et du rapport cyclique.

La puissance est fournie par l'alimentation haute tension. Celle-ci est régulée en courant. Grâce au condensateur de découplage, sa tension de sortie est en outre pratiquement constante. Ainsi la puissance débitée est aussi pratiquement constante. Donc, on décuit de l'équation 3.4 que pour augmenter la puissance pic, il faut et il suffit diminuer le rapport cyclique :

$$\frac{\bar{P}}{\tau} = P_{pic} \quad 3.5$$

D'autre part, l'énergie apportée au résonateur est aussi un paramètre clé pour l'allumage du bulbe. En effet, le carré du champ électrique à l'intérieur du bulbe est proportionnel à l'énergie stockée dans le résonateur [4]. L'énergie délivrée à chaque pulse est donnée par :

$$E_{pulse} = P_{pic} \cdot \tau \cdot T \quad 3.6$$

Reformulons l'équation 3.6 en faisant apparaître la puissance moyenne, ce qui nous donne la relation entre l'énergie délivrée à chaque pulse et la fréquence f de répétition des pulses :

$$E_{pulse} = \bar{P} \cdot T = \frac{\bar{P}}{f} \quad 3.7$$

On voit que pour stocker un maximum d'énergie dans l'oscillateur, sans faire varier la puissance moyenne, il est nécessaire et suffisant de réduire la fréquence de répétition. Notons que le rapport cyclique n'intervient pas dans l'équation 3.7. Ceci rejoint ce que l'on a vu plus haut : augmenter la puissance pic en réduisant le rapport cyclique ne modifie pas l'énergie des pulses.

Puisque fréquence de répétition et rapport cyclique doivent abaissés pour l'allumage, nous sommes amenés à étudier le comportement de notre système aux faibles fréquences de répétition² et faibles rapports cycliques³.

² $f = 10$ et 1 kHz

³ $\tau = 10$ et 5 %

3.2 Mesures

Avant la mise en place du bulbe, nous allons observer le comportement du système pour des paramètres permettant d'avoir une grande puissance pic et stocker une grande quantité d'énergie à chaque pulse. Nous pourrons détecter les éventuels problèmes et les corriger mais aussi optimiser les paramètres pour un allumage aussi rapide que possible.

Dans un premier temps on test le ballast, c'est-à-dire l'ensemble alimentation, modulateur et magnétron, en condition standard, c'est-à-dire avec une terminaison 50 Ohm en bout de câble à la place de celle qui contient le bulbe. Les graphiques présentent, dans l'ordre :

1. La tension de commande
2. La partie variable de la tension anodique
3. Le courant anodique

3.2.1 Fréquence 10kHz, rapport cyclique 10%

Conditions de mesures : l'alimentation haute tension donne en sortie $i = 100\text{mA}$, $U = 3,79 \text{ kV}$

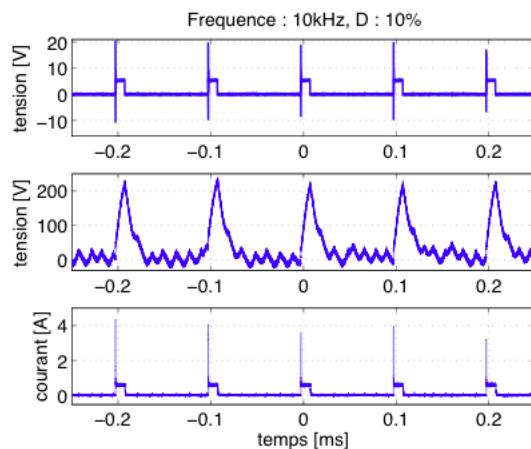


Figure 6 $f = 10 \text{ kHz}$, $\tau = 10 \%$

Sur la Figure 6, la tension de commande est fortement perturbée lors de la commutation ; il s'agit d'une oscillation amortie de haute fréquence. Ce phénomène a déjà été abondamment observé, que nous avons déjà expliqué et que nous avons réussi à limiter en adoucissant le front de montée du

courant dans la ligne d'alimentation du magnétron en y mettant une résistance en série ainsi qu'une auto-inductance [4] ; nous ne revenons pas là-dessus.

Dans le second graphique, qui représente la tension anodique, on observe une pulsation suivie par de petites répliques qui se succèdent les unes aux autres à la façon d'un sautissement presque régulier et continu. Il semble donc qu'un oscillateur soit excité par la commutation. Mais ceci n'a toutefois pas de conséquence néfaste, puisque le courant anodique n'est pas perturbé (troisième graphique) : celui-ci reste stable après le pic de commutation. L'émission des micro-ondes n'est donc pas perturbée par les sautissements de la tension anodique, semble-t-il du moins.

3.2.2 Fréquence 10kHz, rapport cyclique 5%

Conditions de mesures : l'alimentation haute tension donne en sortie $i = 100 \text{ mA}$, $U = 3,57 \text{ kV}$

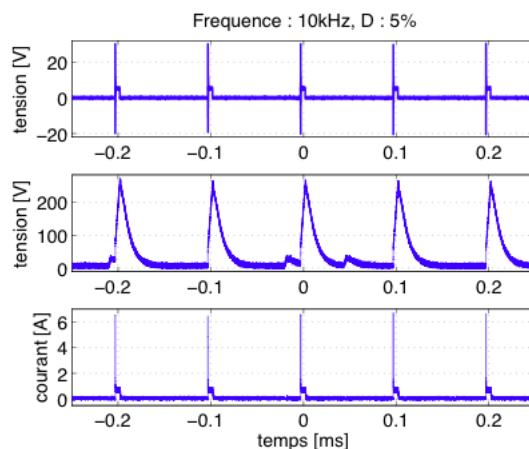


Figure 7 $f = 10 \text{ kHz}$, $\tau = 5 \%$

Comme dans la Figure 6, la tension de commande subit à la commutation une forte perturbation. Par contre, il est notable que la tension anodique n'a plus de sautissement. La puissance pointe est à 20 kW, elle correspond à une utilisation du magnétron qui ne pourrait pas être maintenue en continu. La puissance pic s'élève à environ 3 kW. Donc avec un rapport cyclique de 5 %, la puissance moyenne est d'environ 150 W. Le magnétron, qui est prévu pour une puissance continue de 1 kW, ne risque donc pas de surchauffer. Toutefois, il est prudent d'effectuer d'autres essais afin de vérifier que le bon fonctionnement du magnétron.

Le courant anodique est stable après le pic du à la commutation. Sa valeur pointe atteint 6 A, ce qui est plus élevé qu'avec un rapport cyclique de 10 %, voir Figure 6. Il est probable que ce courant n'est pas absorbé par le magnétron, mais qu'il est dû aux capacités parasites présentes entre le commutateur et la tête du magnétron. Une meilleure intégration de modulateur contre le magnétron pourrait certainement les réduire. Une observation à la caméra thermique, nous a montré que le modulateur ne chauffait pas plus que pour un cas normal avec une fréquence de 30 kHz et un rapport cyclique de 20 %, cf. Figure 8. On ne risque donc pas, à priori, de détériorer l'installation dans ce régime.

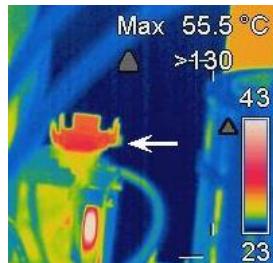


Figure 8 Thermographie infrarouge du commutateur et de la résistance série de 47 Ohm

On peut supposer que dans ces conditions, le magnétron émettra des pulses de micro-ondes dans des conditions optimales.

3.2.3 Fréquence 5kHz, rapport cyclique 10%

Conditions de mesures : l'alimentation haute tension donne en sortie $i = 100 \text{ mA}$, $U = 3,69 \text{ kV}$

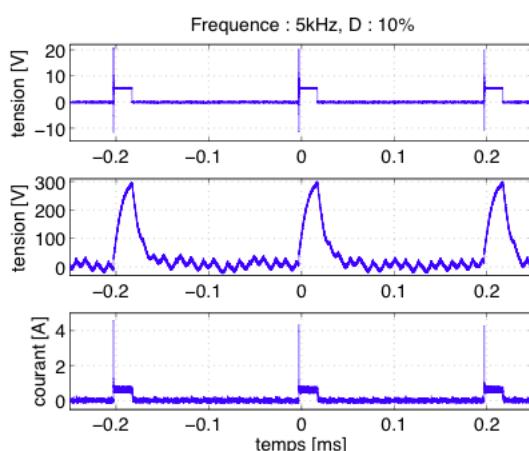


Figure 9 $f = 5 \text{ kHz}$, $\tau = 10 \%$

Comme dans l'autre cas de rapport cyclique $\tau = 10\%$ (cf. § Fréquence 10kHz, rapport cyclique 10%, Figure 6), la tension anodique subit des sautillements après la pulse. Le pic de courant est à nouveau d'environ 4 A. Donc ce cas est très semblable à celui de la section 3.2.1 : le passage de 10 à 5 kHz n'a donc que peu d'effet à $\tau = 10\%$.

3.2.4 Fréquence 5kHz, rapport cyclique 5%

Conditions de mesures : haute tension $i = 100$ mA, $U = 3,91$ kV

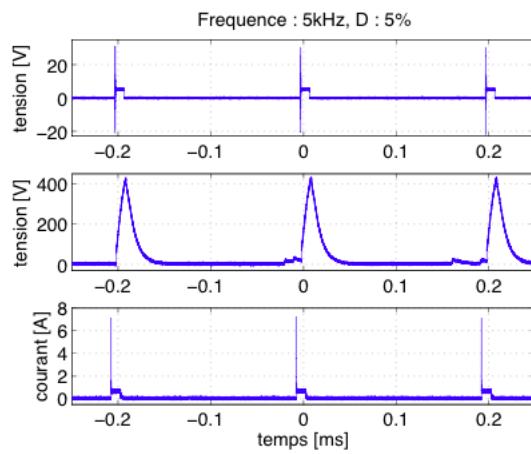


Figure 10 $f = 5$ kHz, $\tau = 5\%$

Comme dans la Figure 7 (§Fréquence 10kHz, rapport cyclique 5%), la consigne est fortement perturbée lors de la fermeture du commutateur. Le courant anodique passe par une pointe qui atteint cette fois 8 A, avant de se stabiliser. La tension anodique ne subit pas d'oscillation après la pulse. La puissance pic est d'environ 3 kW. Le rapport cyclique étant de 5%, on obtient une puissance moyenne de 150W, ce qui est bien en dessous de la limite que peut supporter ce type de magnétron. Une petite perturbation est observée sur la tension anodique mais elle est négligeable en comparaison des sautillements observés sur la Figure 9.

3.2.5 Essais complémentaires à plus hautes fréquences

D'autres tests ont été faits pour des fréquences de 1, 15 et 20 kHz. Les résultats sont proches de ceux évoqués précédemment. Nous pouvons tirer la conclusion que notre système supporte des fréquences de l'ordre de 1 kHz avec des rapports cyclique de 20, 10 et 5 %. Les thermographies n'ont pas montré de hausse significative de température dans l'installation⁴.

Le fait de descendre le rapport cyclique à 5 % permet au magnétron de fonctionner dans un régime normal, ce qui évite la plupart des sautillements de la tension anodique. On peut raisonnablement espérer dans ces conditions émettre des pulses de micro-ondes avec de haute puissance pic et charger le résonateur à haute énergie, ce qui devrait faciliter l'allumage du bulbe.

⁴ Commutateur et résistance série de 47 Ohm

4 Essais d'allumage

4.1 Influence du rapport cyclique

Pour ces essais le câble en place est le n°6 et l'antenne d'assistance d'amorçage du fond de la grille est remplacée par une simple antenne « quart-d'onde » qui est reliée à un fluxmètre afin de mesurer le niveau d'énergie stockée dans l'enceinte entourant le bulbe. Cette antenne de mesure est dénommée le plongeur.

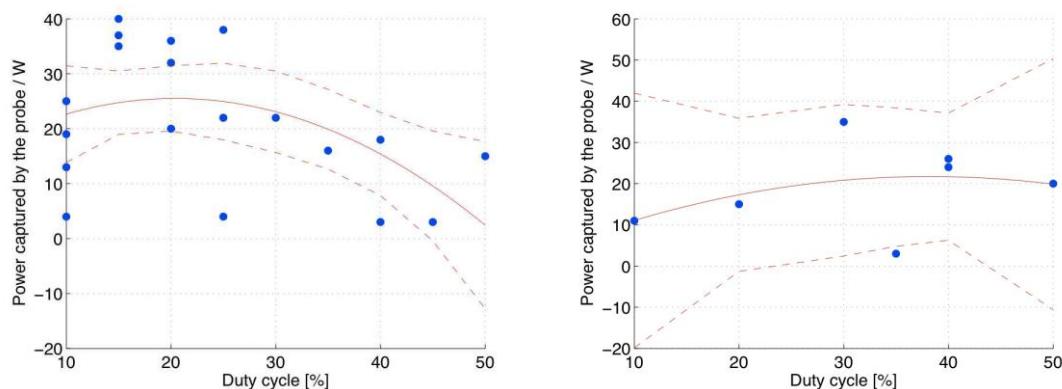


Figure 11 Puissance captée par le plongeur. Gauche : juste avant allumage ; Droite : pas allumage après 2 minutes de mise en marche.

La Figure 11 montre la puissance en fonction du rapport cyclique de la modulation. En tenant compte de tous les points disponibles, les régressions prennent des profils de types quadratiques « $a \times X^2 + b \times X + C$ ». Nous avons un R^2 de 0,25 dans la figure de gauche et de 0,14 dans celle de droite. Avec des valeurs aussi basses, il semble que ces paramètres sont peu corrélés. Il doit y avoir au moins un autre paramètre plus influent que le rapport cyclique.

Nous séparons les mesures en fonction du temps d'allumage :

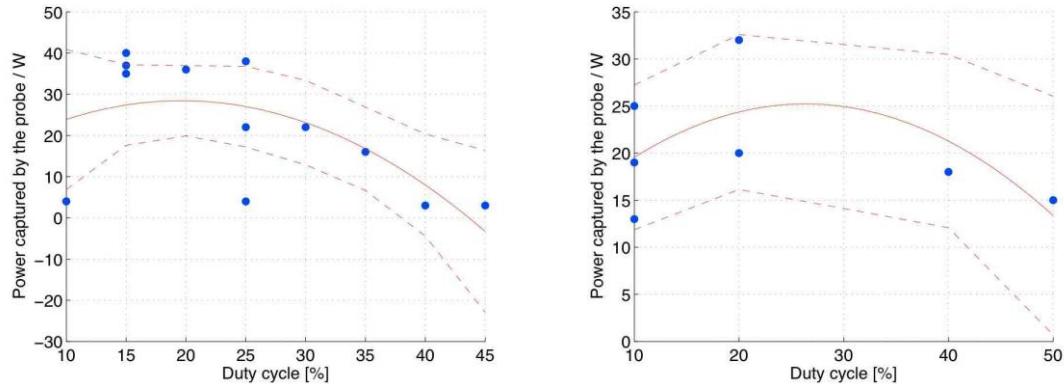


Figure 12 Puissance captée par le plongeur en fonction du rapport cyclique. Gauche: allumage en moins de 30 secondes, Droite : en plus de 30 secondes

Sur la Figure 12, nous voyons que les courbes sont plus propres. Nous avons un R^2 de 0,42 pour un allumage en moins de 30 secondes et de 0,34 si l'allumage prend plus de temps. Nous pouvons conclure que le paramètre inconnu dont l'existence est mentionnée plus haut influence le temps d'allumage du bulbe.

Il est à noter que lorsque l'allumage prends moins de 30 secondes, le souffre est répartit sur une grande portion du bulbe. Si l'allumage prend plus de temps⁵, le souffre est en général rassemblé en un bloc dans la partie basse du bulbe.

De plus, après un allumage lors duquel l'évaporation du souffre a été complète puis un repos d'une heure, il n'y a pas eu allumage. Nous supposons qu'une partie du souffre était encore visqueuse. Une part substantielle des micro-ondes serait absorbée par ce souffre non solidifié, empêchant le claquage du gaz, donc l'allumage de la lampe.

4.2 Études de la tension cathodique

Pour ces essais le câble en place est le n°6. La Figure 13 montre une évolution de la tension cathodique similaire à celle obtenue en fonction de la fréquence⁵. La tension cathodique augmente

⁵ Dans ce cas l'allumage se produit avec un retard de 1 à 2 minutes

avec la diminution du rapport cyclique. L'énergie d'une pulse est envoyée dans un temps plus cours ; cela donne donc une puissance pic plus élevée (cf. Equation3.6).

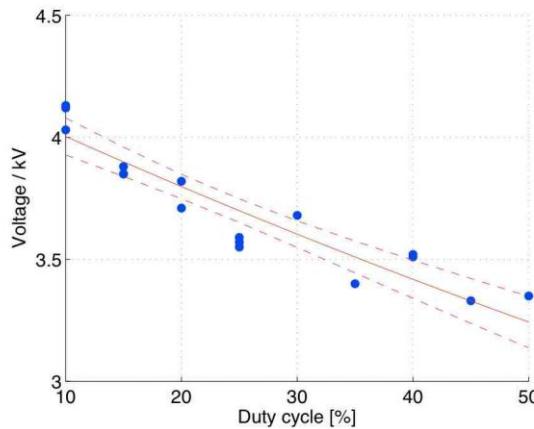


Figure 13 Valeur pic de la tension cathodique pour l'allumage du bulbe

4.3 Tests de l'influence du câble coaxial

4.3.1 Objet

Le câble mis en place était jusque-là le n°6 (cf. Tableau 1). Maintenant nous le remplaçons par d'autres, choisis parmi ceux accordés lors des étapes précédentes [1]. Le temps d'allumage est naturellement tributaire de l'accordage et de la faiblesse des pertes. Le tableau suivant présente nos résultats de mesure :

Tableau 1 Temps d'allumage selon le câble employé

N° du câble	Type du câble	Longueur cm	Temps d'allumage max.	
				s
3	Ecolflex 15	50,3	120	
5	Cellflex 7/8"	35,1	60	
5'	Cellflex 7/8"	34,0	72	
6	Cellflex 1-5/8"	33,8	10	

Les conditions de test sont les suivantes :

- Minimum d'une heure d'attente entre chaque essai.
- La position du sabot de la terminaison est ajustée après un premier balayage des fréquences.
- Pour rester concis dans le rapport, le domaine de spectral rapporté ici va de 500Hz à 5kHz.

4.3.2 Câble n°5

La position initiale du sabot de la terminaison est 3,0mm ; elle correspond à l'optimum d'allumage avec le câble n°6. Il s'est avéré que cette longueur ne permet pas l'allumage avec le câble n°5. Le sabot a été déplacé à la position 3,5mm. Pour cette distance, l'allumage a été obtenu à toutes les fréquences comprises entre 500Hz et 2kHz.

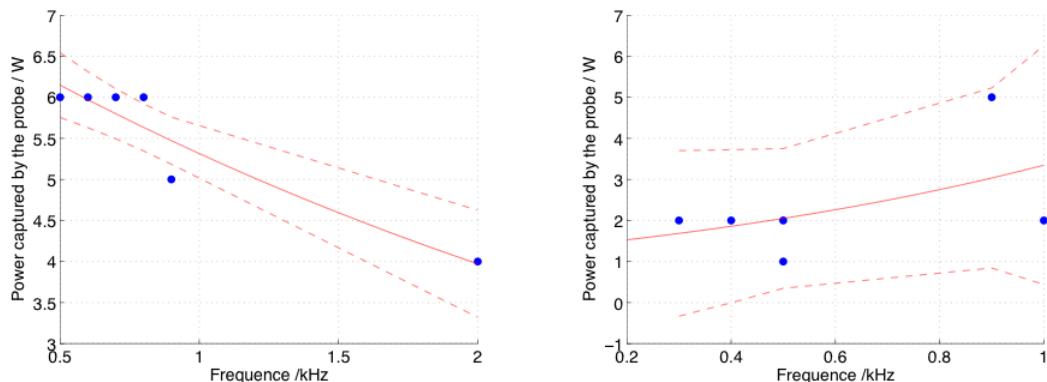


Figure 14 Puissance captée par le plongeur (câble n°5) ; droite : allumage, gauche : pas d'allumage.

Nous remarquons sur la Figure 14 que l'allumage se produit pour une puissance captée entre 6 et 4 watt alors que s'il ne se produit pas, on est à 1 ou 2 watt à une exception près. Il est possible que ce phénomène provienne du fait que le soufre condense dans une forme visqueuse avec de se solidifier complètement. Etant liquide cette phase absorbe les micro-ondes et empêche par conséquence l'amorçage de la décharge électrique. Comme le point de solidification peut descendre jusqu'à 40°C [6], il est tout-à-fait plausible que le temps de refroidissement du soufre ait une influence directe sur le ré-allumage de la lampe. D'après nos observations, en effet, si le soufre condense sur une grande surface du bulbe, le ré-allumage est obtenu plus rapidement que s'il condense en formant une goutte.

Influence du taux d'humidité est étudiée car nous redoutons qu'une atmosphère trop humide absorbe les micro-ondes et empêche l'allumage du bulbe. Si on regarde la puissance des micro-ondes émis et réfléchis dans le guide d'onde, voir Figure 15, on remarque que la puissance est inférieure de 500W si l'allumage ne se produit pas. Par contre des allumages sont observés pour tous les niveaux d'humidité. On retire ce paramètre des facteurs préjudiciable pour la lampe car cette perte de puissance est certainement due à du souffre encore à l'état visqueux.

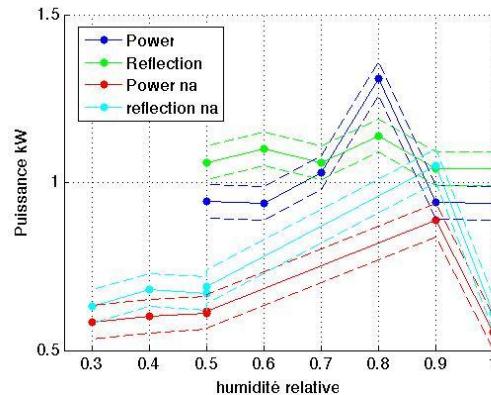


Figure 15 Flux micro-ondes progressif et rétrograde. Courbes bleu et verte : allumage ; courbes rouge et turquoise : pas d'allumage (na).

Le temps d'allumage pour ce câble varie entre 60 et 10 secondes.

4.3.3 Câble n°5'

La meilleure position du sabot de la terminaison pour ce câble est 4,5mm. Dans cette position, la connexion entre la coque entourant le bulbe, l'antenne de la terminaison et le câble coaxial s'est avérée insuffisante. La résolution de ce problème demanderait de reprendre la conception de la terminaison, ce que nous ne pouvions plus faire vu le temps restant avant la fin du projet.

Malgré cela, le bulbe s'est allumé pour toutes les fréquences testées, entre 500Hz et 10kHz. On note à la Figure 16 que pour 10kHz la puissance mesurée est moitié moins grande que précédemment. Elle s'explique par le fait qu'à cette fréquence l'énergie de chaque pulse est moins grande que pour de petites fréquences. En revanche, les pulses sont plus nombreux, augmentant ainsi la probabilité d'amorcer la décharge électrique.

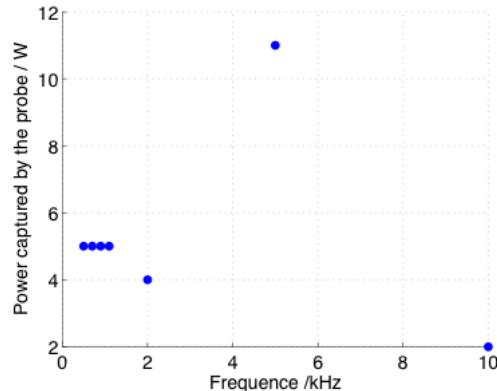


Figure 16 Puissance captée par le plongeur (câble n°5)

Le comportement de la tension cathodique en fonction de la fréquence de répétition est une décroissance quasiment logarithmique (Figure 17). On observe donc que la baisse de fréquence est limitée par la tension d'isolation de l'alimentation et du modulateur, fixée à 5 kV à l'heure actuelle. Le temps d'allumage du bulbe pour ce câble varie entre 72 et 5 seconde.

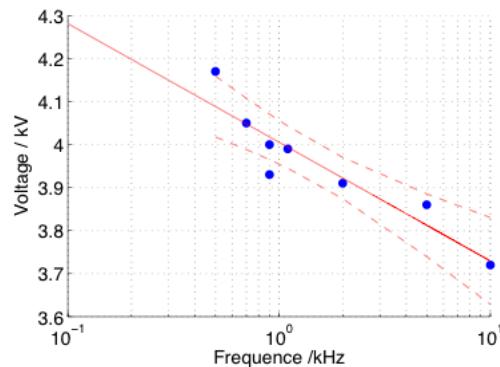


Figure 17 Tension cathodique pour le câble numéro 5'

4.3.4 Câble n°3

Pour ce câble le sabot de la terminaison a été une nouvelle fois déplacé, cette fois à 5.5mm, en butée de course. Contrairement aux cas précédents où la puissance captée par le plongeur variait peu en fonction de la fréquence, ici les valeurs sont plus fluctuantes. Il faut noter que ce câble étant moins gros, la dissipation d'énergie qu'il engendre est plus conséquente. En outre, le sabot étant en buté de course, il est fort probable qu'une dissipation plus importante ait lieu à la connexion entre le bulbe et l'antenne de la terminaison.

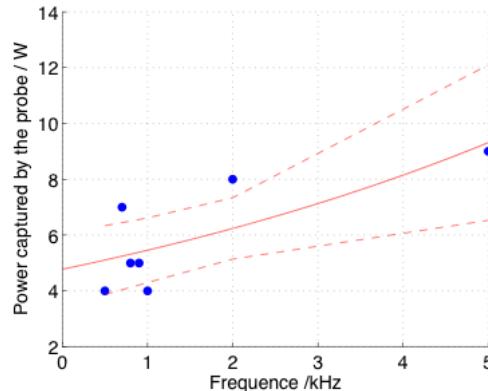


Figure 18 Puissance captée par le plongeur (câble n°3)

La Figure 19 illustre parfaitement ces pertes. On voit clairement que la puissance des micro-ondes émises et des celles réfléchies est nettement plus faible que pour les autres câbles, voir Figure 15.

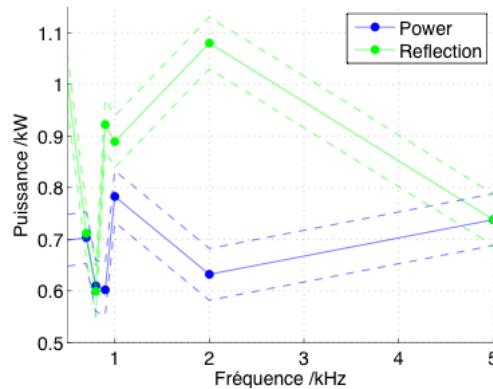


Figure 19 Puissance des micro-ondes dans le guide d'onde

Avec ce câble, le temps d'allumage varie entre 120 et 5 secondes.

En conclusion, nous avons allumé le bulbe avec les câbles à disposition. Nous avons déterminé la longueur d'antenne idéale pour chacun et mis en évidence le temps nécessaire à chacun pour allumer le bulbe se trouve sous la minute.

4.4 Influence des conditions initiales

Dans cette section, nous étudions l'influence du temps d'attente entre essais. Nous avons repris le câble n°6, celui qui a le moins de perte. La position du sabot de la terminaison est à 3mm, valeur optimale déterminée dans le précédent travail. Nous avons fixé la fréquence de répétition à 2 kHz, ce qui est aussi un optimum trouvé précédemment. De plus nous avons mis en place un flux d'azote de

sort à refroidir le bulbe sur le dessus. Cette manœuvre a pour but de forcer la condensation du souffre sur la partie supérieur du bulbe et éviter son accumulation dans la partie inférieure. Nous allons par cette méthode tester notre hypothèse concernant la condensation du souffre : si le soufre condense en formant une goutte, son polymérisation est beaucoup plus longue du fait de l'inertie thermique. Tant qu'une phase visqueuse est encore présente, l'allumage ne peut avoir lieu. Et de surcroît, si l'on procède à un essai avant que le soufre ait totalement polymérisé, ce dont on ne peut malheureusement se rendre compte en pratique, l'injection de microonde a pour effet de relancer la liquéfaction.

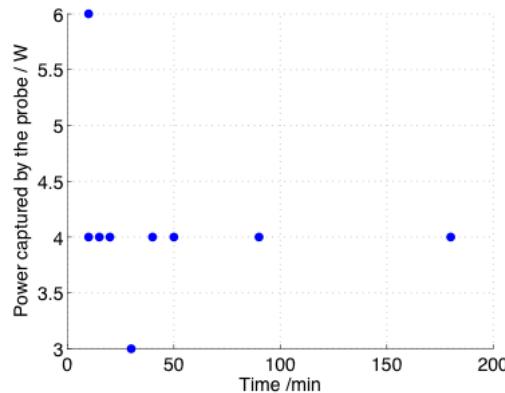


Figure 20 Puissance captée par le plongeur

Selon la Figure 20, la puissance nécessaire pour l'allumage du bulbe est de 4W pour les conditions mentionnées ci-dessus. On constate que la puissance captée par le plongeur est indépendante, dans l'ensemble, du temps d'attente de ré-allumage (temps de repos entre allumages).

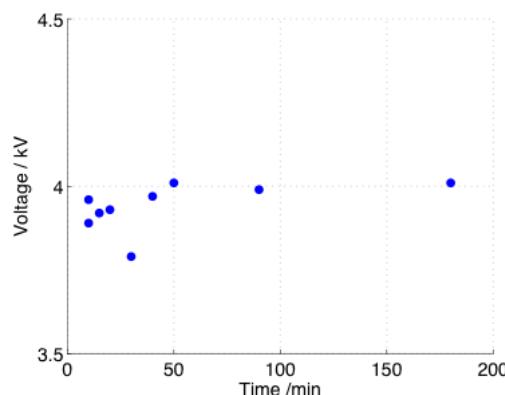


Figure 21 Tension cathodique en fonction du temps de repos entre allumages

La Figure 21 montre, elle aussi, une indépendance entre le temps de repos entre les allumages et la tension cathodique. On peut affirmer suite à cette étude que les principaux paramètres qui jouent sur la tension cathodique sont la fréquence de répétition et le rapport cyclique.

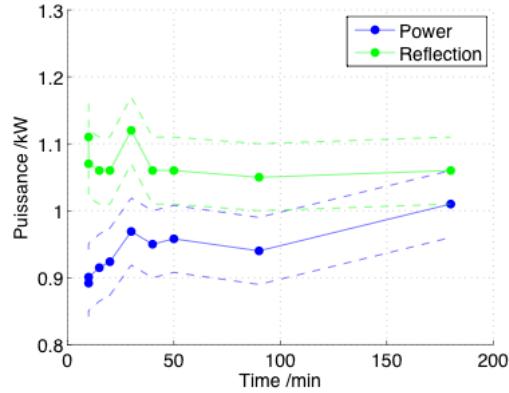


Figure 22 Puissance micro-onde progressive et rétrograde en fonction du temps de repos entre allumages

En observant la puissance micro-onde sur la Figure 22, nous observons une variation de 100W entre la mesure faite après 10 minutes d'attente et celle après 180 minutes. La marge d'erreur de ce détecteur étant d'environ 200W, nous pouvons admettre que la puissance micro-onde varie peu en fonction du temps d'attente entre allumage. On conclut donc à l'indépendance de ce paramètre.

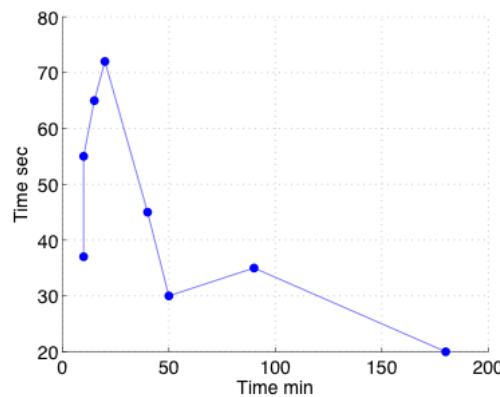


Figure 23 Temps d'allumage en fonction du temps de repos entre allumages

On remarque sur la Figure 23 que pour des temps inférieurs à 15 minutes ou supérieurs à 40 minutes, le bulbe s'allume en moins d'une minute. Le fait que le bulbe s'allume en moins de temps à partir de 40 minutes

de repos s'explique par la présence d'une phase visqueuse dans souffre lors de son refroidissement, phase qui disparaît donc suffisamment au bout de 40 minutes.

Dans le cas inverse, lorsque le bulbe s'allume rapidement avec un temps d'attente inférieur à 15 minutes, on pense que le refroidissement avec un flux forcé d'azote a permis au souffre de se condenser sur une grande portion du bulbe, ce qui évite la formation d'un amas de souffre où une phase visqueuse peut se maintenir longtemps sous une croute. En effet si le souffre se condense en formant une goutte, l'évacuation de la chaleur est alors beaucoup plus lente.

4.5 Influence de la forme de l'antenne de couplage du bulbe

Notre antenne est constituée de deux parties (cf. § 8.1, page 49) :

- a- un corps tubulaire taraudé (Figure 36, page 49)
- b- une tête qui se vise au bout du corps.

Cette disposition permet non seulement de régler la longueur de l'antenne, ce qui n'a pas été nécessaire, mais aussi de tester différente forme de tête. Nous avons fait réaliser deux têtes de même diamètre, mais de forme différente ; l'une est convexe (Figure 37), l'autre concave (Figure 38). Jusqu'à présent, nos essais n'ont pas fait apparaître de différence notable lors de la procédure d'allumage de la lampe.

4.6 Antenne auxiliaire d'allumage

4.6.1 Fil conducteur épais

Pour aider l'allumage du bulbe, une antenne auxiliaire est montée à l'opposé de l'antenne de couplage du bulbe, qui émet l'énergie micro-onde, sur le même axe de symétrie. Cette antenne attire les lignes de champ électromagnétique, les faisant ainsi passer par le centre du bulbe.

Les premières antennes qui ont servi aux essais sont fabriquées avec un fil conducteur de diamètre compris entre 4 et 5 mm, et des longueurs allant de 2mm à 8mm, Figure 24.



Figure 24 Antenne rectiligne de 5 mm de diamètre et de 8 mm de longueur

Les premiers tests ont montré que les antennes d'une longueur inférieure à 6 mm avaient peu d'influence sur le temps d'allumage des bulbes.

Il aussi apparut que les antennes d'une longueur supérieure à 8 mm permettent un allumage rapide , en un temps inférieur à 10 seconde en moyenne. Malheureusement, lors de l'allumage du bulbe une seconde décharge se produit au bout de l'antenne, voir Figure 25.

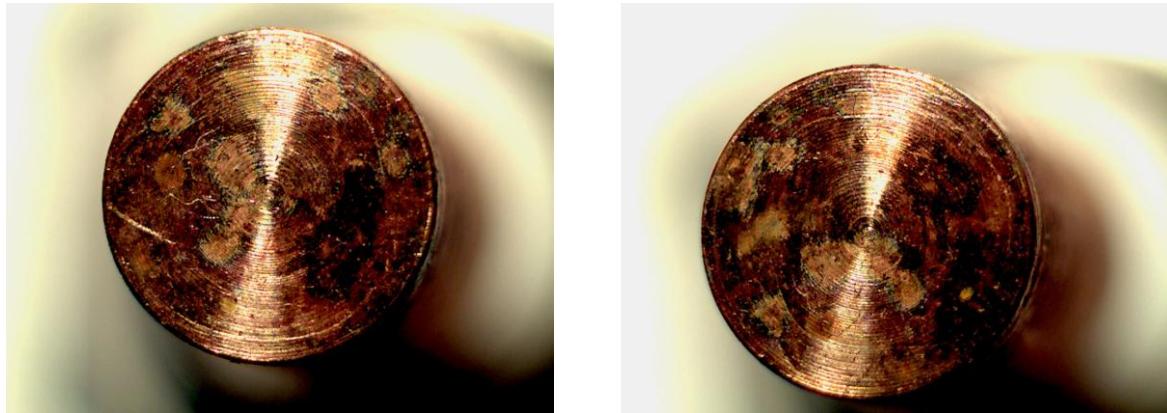


Figure 25 Brûlure d'une antenne de 8 mm de longueur et 4 mm de diamètre

Cette seconde décharge est rédhibitoire car elle peut entraîner la destruction de l'antenne auxiliaire, voire l'endommagement de l'installation.

4.6.2 Fil conducteur fin

Un fil conducteur de 1 mm de diamètre a une inductance linéique nettement plus faible qu'un fil de 4 mm. En abaissant le diamètre de l'antenne auxiliaire on empêche l'absorption d'énergie électromagnétique, ce qui est favorable à l'allumage. Il s'est avéré qu'une antenne rectiligne de 6 mm de longueur permet un allumage du bulbe en moins d'une minute. Le temps moyen d'allumage étant de 29,5 s.

De plus, elles sont suffisamment malléables pour permettre la création de forme facilitant l'attraction du champ électromagnétique. Nous profitons de cette malléabilité pour éviter le risque de décharge, en tordant l'extrémité du fil en une spirale atteignant un centimètre de diamètre de sorte à former l'équivalent d'une tête d'antenne de même diamètre. Les meilleurs résultats sont enregistrés pour une antenne spirale de 14 mm de hauteur et de diamètre de 16 mm, voir Figure 26. On notera que le fil ne forme pas une boucle fermée évitant de ce fait d'éventuel courant de Foucault. Ces courants, s'ils existaient, empêcheraient peut être l'allumage du bulbe, et sinon, feraient monter la température de l'antenne, entraînant une perte d'efficacité de l'installation et peut être la fonte de l'antenne. Du fait que l'antenne ne forme pas une boucle il existe une différence de potentiel entre ses extrémités. Pour éviter un claquage de l'air entre deux points de l'antenne, le diamètre de la boucle doit augmenter en fonction de la longueur du fil, d'où la forme en spirale.

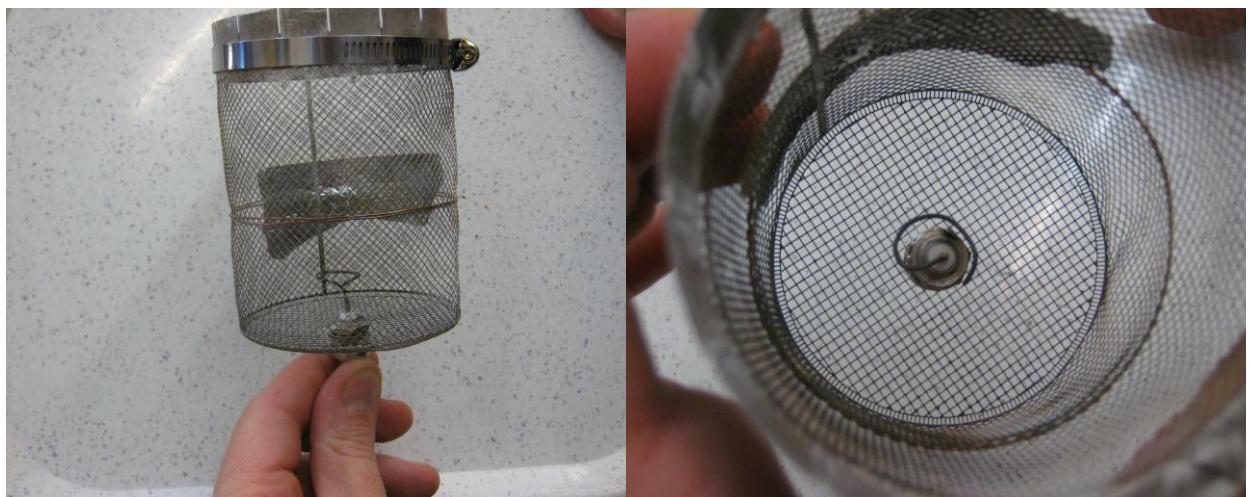


Figure 26 Antenne spirale. Hauteur : 14 mm. Diamètre : 16 mm (diamètre du fil : 1 mm).

L'antenne, illustrée dans la Figure 26, permet un allumage en moins de 30 secondes, lorsque l'antenne émettrice, le bulbe et l'antenne auxiliaire sont alignés et que le bulbe est plaqué contre l'antenne émettrice, voir Figure 27.

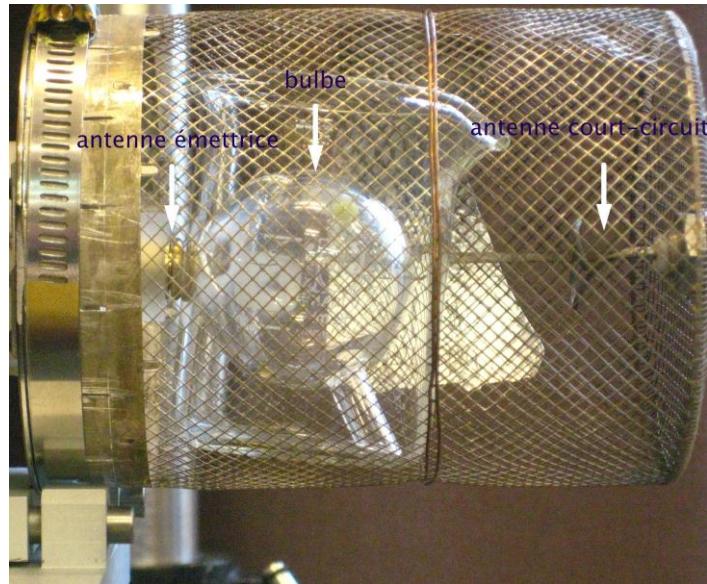


Figure 27 Position de l'antenne émettrice, du bulbe et de l'antenne auxiliaire

4.7 Conclusion

Les essais des différents câbles coaxiaux, Tableau 1, ont montré que la longueur et le diamètre du câble ne sont pas un obstacle pour l'allumage. Toutefois, plus fins ou long est le câble, plus grande est la fraction du flux d'énergie qu'il dissipe. On a pu constater de plus l'importance de l'accordage des câbles pour l'allumage ; la position du sabot de la terminaison a été réajustée pour chaque câble.

Nous avons réalisé une étude paramétrique de l'allumage. Les derniers tests ont montré que la lampe s'allume en moins de 30 secondes, si la fréquence de répétition est à 1 kHz et le rapport cyclique à 10%. Par ailleurs, la cavité entourant le bulbe avait été raccourci, ce qui prouve que ce volume ne fait plus partie du résonateur électromagnétique. Le design de la cavité est donc maintenant libre, ce qui va nous permettre de faire double emploi avec l'optique de la lampe.

L'antenne est constituée d'un corps tubulaire et d'une tête qui se vise au bout. Ceci permet non seulement de régler la longueur de l'antenne, ce qui n'a pas été nécessaire, mais aussi de tester différente forme de tête. Nous avons fait fabriquer deux têtes de même diamètre (10 mm), mais de

forme différente ; l'une est convexe (Figure 37), l'autre concave (Figure 38). Jusqu'à présent, nos essais n'ont pas fait apparaître de différence notable lors de l'allumage.

5 Essais opérationnels

L'allumage du bulbe procède en deux phases. Premièrement il y a claquage du gaz neutre, ce qui initie la décharge par un plasma électronique. En évaporant le soufre contenu dans le bulbe, cette phase enclenche progressivement la seconde, le plasma moléculaire, en entraînant un changement radical de la pression dans le bulbe. Avant allumage l'atmosphère dans le bulbe est constituée d'un gaz rare à basse pression (8-10 mbar). Avec l'évaporation du soufre, le plasma devient moléculaire et la pression monte à plusieurs bars.

Le plasma est dit moléculaire car son degré d'ionisation est beaucoup plus faible que celui d'un plasma électronique. Il est majoritairement composé de molécules de soufre diatomique et d'atome de soufre. Au cœur du plasma, un flux subit la dissociation moléculaire par chauffage microonde. A l'inverse, dans les couches périphériques, ces atomes de soufre se recombinent. Ils forment alors des molécules occupant un niveau électronique excité et dont la relaxation produit les photons qui forment l'émission lumineuse de la lampe.

Pendant la transition entre les deux types de plasma, notre système de régulation devra détecter fréquence du cycle dissociation-recombinaison. Lorsque le plasma moléculaire se met en place, trois situations sont possibles :

- La fréquence d'excitation et celle du plasma moléculaire sont identiques
 - Dans ce cas le transfert d'énergie est optimale le plasma ne se surchauffe pas et l'efficacité lumineuse augmente
- Les deux fréquences sont légèrement décalées
 - Augmentation de la température dans le plasma et l'efficacité est réduite
- Les deux fréquences sont à l'opposé l'une de l'autre
 - L'énergie est envoyée pendant que la recombinaison des molécules, l'énergie ne participe plus à l'efficacité lumineuse mais fait fortement augmenter la température du plasma et entraîne son extinction

5.1 Analyse du photo-signal

Dans sa première version, nous avons volontairement réduit l'algorithme du régulateur à un schéma simpliste, dont la boucle principale procède en quatre étapes. Celle-ci démarre aussi tôt après l'assignation de la fréquence de départ.

1. Acquisition du photo-signal et de sa FFT
2. Recherche de la fréquence du plus haut pic de cette FFT
3. Assignation de cette fréquence comme nouvelle consigne
4. Retour au point 1.

On constate que le plasma se maintient pendant la phase électronique. Toutefois la lampe s'éteint lorsque le plasma moléculaire prend le dessus.

Pour comprendre le problème, nous avons fait un sous échantillonnage à base fréquence du photo-signal de sorte à observer l'évolution de son niveau sur des lapses de temps de plusieurs dizaines de secondes. Ce sous échantillonnage consiste à retenir la dernière mesure de chaque échantillonnage pris par l'oscilloscope. Nous appelons cet enregistrement le photogramme. Avec la même technique, nous avons enregistré simultanément la fréquence du plus haut pic.

Analysons en détails l'exemple de la Figure 28. L'enregistrement débute dès l'amorçage de la décharge électrique. Jusqu'à 16 secondes (voir flèche rouge), le plasma est purement électronique. A partir de cet instant, le flux lumineux se met à croître rapidement, ce qui traduit le commencement de l'évaporation du soufre. Simultanément la fréquence du plus haut pic donne des signes d'instabilité. Ceci provient du fait que l'ionisation du plasma diminue car alors, en effet, le temps de relaxation du plasma diminue. Sa modulation à 17 kHz s'atténue. Au fur et à mesure que le plasma devient moléculaire, le pic le plus haut de la FFT devient de plus en plus faible et la fréquence trouvée par notre régulation devient légèrement instable, fluctuation de moins de 10 Hz, probablement du fait que le rapport signal sur bruit se détériore. Le photo-signal atteint un palier et commence à fluctuer fortement pendant quelques secondes avant que le plasma ne s'éteigne, vers la 30^{ème} seconde (voir flèche verte). Ces sauts d'intensité proviennent d'une agitation intense dans le bulbe, signe de fortes vibrations acoustiques. Leur instabilité indique l'absence de résonnance. Ces vibrations apparaissent

parce que le plasma est devenu suffisamment moléculaire pour que le processus d'avalanche thermique ait lieu. Ce dernier est dû au fait que l'absorption des microondes par le plasma de soufre est une fonction croissante de la température. Alors le plasma ne suit plus les lignes de champ de force électrique mais il se concentre par avalanche thermique, contrairement au plasma électronique. C'est cette propriété qui produit la sustentation acoustique du plasma à la résonance. Pour stabiliser le plasma au centre du bulbe il faut en effet que la modulation excite un mode de résonance de symétrie centrale. Mais le régulateur n'a pas trouvé de condition de ce type. Force est de constaté que loin de toute condition de résonance, le plasma peut s'éteindre subitement ; c'est ce qui se passe à la fin du présent enregistrement.

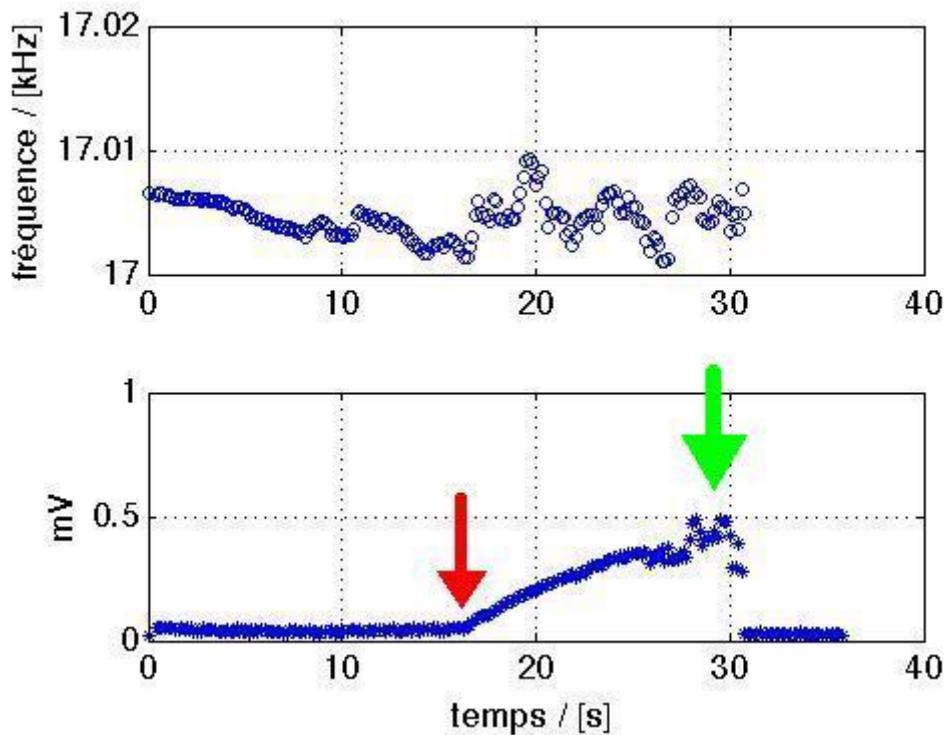


Figure 28 Dernières mesures de chaque échantillonnage. En haut : commande (fréquence du plus haut pic). En bas : photo-signal.

Approfondissons l'analyse en enregistrant chaque FFT. Sur le diagramme 3D de la Figure 29, nous voyons sortir du bruit un pic à la fréquence de départ (17kHz) ainsi que sa première harmonique (34KHz). Après 16 seconde (flèche rouge) le signal diminue fortement, la lumière émise émis par le plasma électronique devient négligeable devant celle du plasma moléculaire. À 30 secondes (flèche

verte), le rapport signal sur bruit se dégrade complètement : aucun pic ne sort du bruit. Le régulateur perd donc toute efficacité.

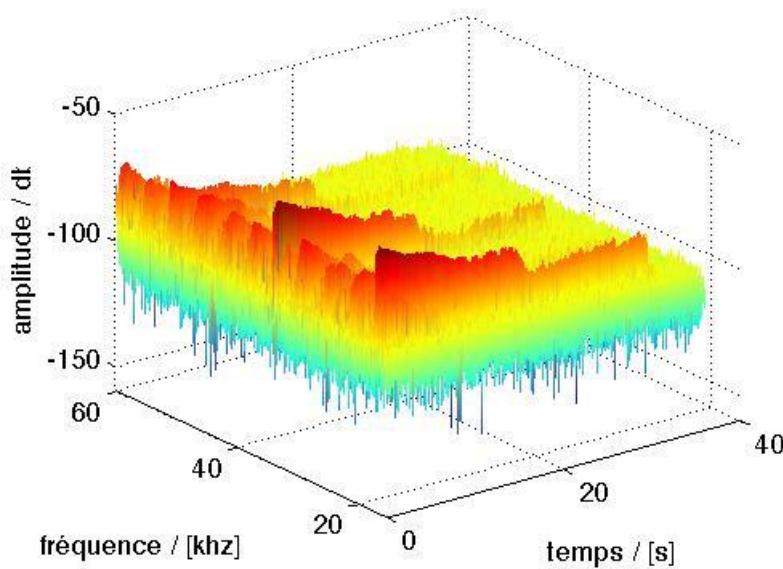


Figure 29 FFT du photo-signal en fonction du temps

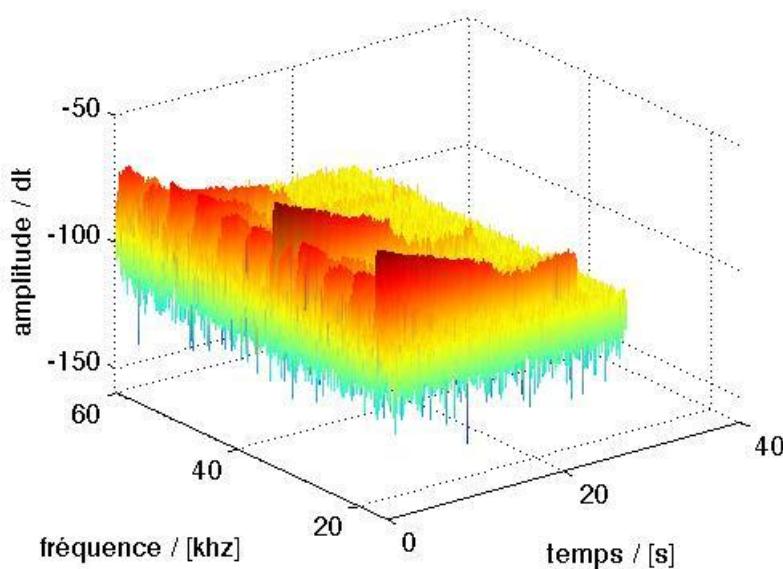


Figure 30 FFT photo-signal, 17kHz

Nous avons constaté que certains pics apparaissant dans la FFT sont dus à des artefacts dus au calcul de la FFT (peak of spur). Nous avons remédié à ce problème en limitant la bande d'analyse spectrale de 15 kHz à 60 kHz.

5.2 Seuil de détection

Nous avons fait le constat, à la section précédente, qu'après le début de l'évaporation du soufre nous entrons dans une phase transitoire pendant laquelle la FFT ne montre plus aucun pic sortant du bruit. Plusieurs autres tests ont montré des résultats semblables pour d'autres fréquences de départ (cf. Figure 30). Mais supposons que le régulateur accroche un mode de résonance produisant un pic visible même pendant la phase transitoire. A ce moment, la température augmente rapidement. La fréquence de résonance aussi puisque c'est une fonction croissante de la température du plasma [7]. Il est donc impératif d'augmenter la fréquence de répétition pour suivre la résonance, cela rentre dans le rôle du régulateur. Ainsi dans le cas où la FFT ne montre aucun pic sortant du bruit, le régulateur doit incrémenter la fréquence de répétition d'une valeur par défaut, qui reste à déterminer. Pour que ce système fonctionne, il est impératif de mettre un seuil d'amplitude à la recherche de pic dans la FFT en dessous duquel un pic est considéré comme insignifiant. Dans le cas contraire, le régulateur irait en effet au hasard jusqu'à ce qu'un pic émerge du bruit.

Nous avons déterminé le seuil de détection en comparant les amplitudes des pics servant à déterminer la consigne avant la disparition du plasma électronique (pic de forte amplitude) et pendant la phase transitoire (aucun pic détecté).

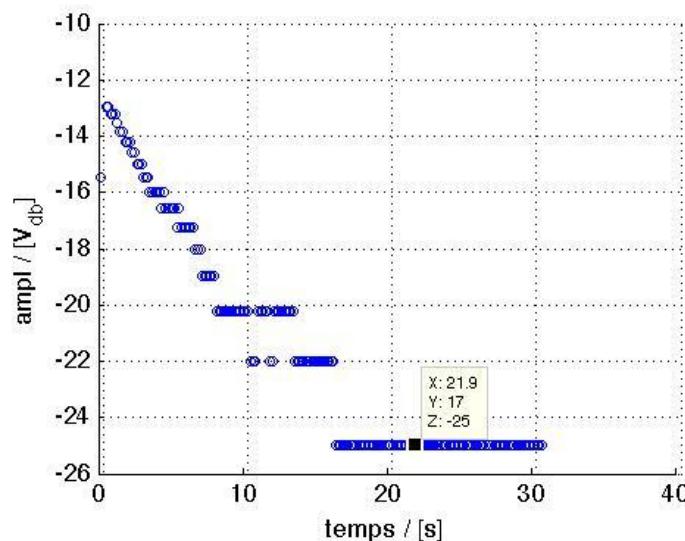


Figure 31 Amplitude du plus haut pic

La Figure 31 montre l'amplitude du plus haut pic, dans le cas correspondant à la Figure 29. Ces valeurs sont issues du bloc de LabView qui recherche le pic le plus haut. Comme il a été observé que la dernière consigne valable s'est produite à la seconde 30, l'amplitude minimale est de $-25 \text{ V}_{\text{db}}$, nous allons, donc, utiliser cette amplitude comme seuil de détection, en tout cas en premier essai.

5.3 Future version de l'algorithme du régulateur

A partir des résultats précédents, nous pouvons échafauder le plan d'une future version de l'algorithme du régulateur :

1. Acquisition du photo-signal et de sa FFT
2. Recherche du plus haut pic de cette FFT : sa fréquence et son amplitude sont relevés
3. L'amplitude de ce pic est comparée au seuil de détection ($-25 \text{ V}_{\text{db}}$)
4. Deux cas sont possibles :
 - a. Si le pic est plus haut que le seuil, alors sa fréquence est assignée comme nouvelle consigne.
 - b. Dans le cas contraire, la régulation passe en boucle ouverte : la consigne est incrémentée d'une valeur prédéterminée, mettons de 100 Hz en premier essai.
5. Retour au point 1.

Au point 4. b., la consigne est incrémentée de 100 Hz. Cette valeur est issue d'une estime, que nous avons fait sur la base d'une mesure du temps d'exécution d'une boucle (point 1. à 5.), qui est d'environ 200 ms, et de l'augmentation de température du plasma pendant ce même laps de temps.

Cette augmentation de la fréquence devrait nous permettre de passer la phase transitoire, pendant laquelle aucun pic significatif n'est détecté, sans subir d'extinction subite et d'atteindre un stade où le photo-signal offrira une véritable signature des vibrations du plasma.

6 Version à bulbe en alumine translucide

6.1 Spectre de transmission

6.1.1 Objectif

L'objectif de ces essais est de déterminer si l'alumine translucide offre une bonne transmission dans le domaine spectral d'émission de la lampe à plasma de soufre, c'est-à-dire de 400 à 800 nm (cf. Figure 32).

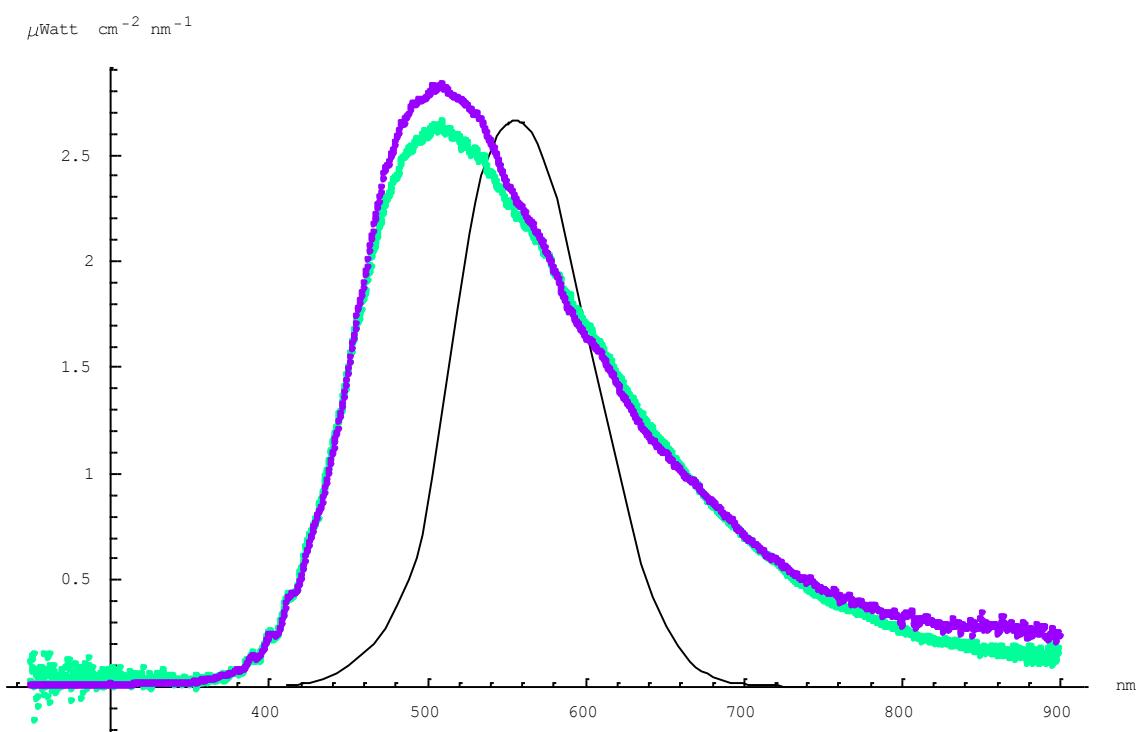


Figure 32 Spectre d'une lampe à plasma de soufre. En vert : mesure faite avec le spectromètre Ocean Optics ; en bleu : mesure faite avec le spectromètre Aventes. Le trait fin indique la courbe de sensibilité de l'œil en vision photopique.

L'alumine translucide est le matériau avec lequel sont fabriquées des ampoules de divers types, celles des lampes au sodium entre autres ; il était donc clair avant de faire ces essais que la transmission de ce matériau est élevée dans le domaine spectral principal d'émission du sodium (de 550 à 650 nm pour les lampes à haute pression [8]).

La lampe à plasma de soufre produit une lumière blanche de spectre continu dont l'essentiel du rayonnement se situe dans le domaine spectral du visible. Dans l'état actuel de la technologie, le plasma de soufre est confiné dans un bulbe en quartz fondu, mais l'alumine translucide pourrait être une alternative avantageuse car elle supporte une température plus élevée.

6.1.2 L'échantillon

L'échantillon nous a été fourni par la SCT, société spécialisée dans les céramiques techniques, entre autres l'alumine translucide, et dans le brasage céramique-métal. C'est un tube de 23 mm de long, de 13 mm de diamètre extérieur et de 0,8 mm d'épaisseur (cf. Figure 33).



Figure 33 L'échantillon d'alumine translucide

6.1.3 Conditions de mesure

Pour la mesure de la transmission, nous utilisons un spectromètre Aventes (modèle AvaSpec-2048-2) muni d'une fibre optique au bout de laquelle nous plaçons un diffuseur blanc. L'éclairement est mesuré à 1,39 m de la lampe. Le local est équipé de rideau d'obscurcissement. Le facteur de transmission déterminé avec le spectromètre est par définition :

$$\tau = \frac{E_{MES} - E_{ZERO}}{E_{REF} - E_{ZERO}} \quad 6.1$$

avec :

E_{ZERO} : Éclairement mesuré dans le noir

E_{REF} : Éclairement mesuré dans le cas de référence (absence de l'échantillon)

E_{MES} : Éclairement mesuré dans le cas de test (présence de l'échantillon devant le diffuseur : le tube est maintenu plaqué contre le diffuseur).

La source est une lampe à plasma de soufre, type Solar-1000, qui nous a été fournie par la société Solaronix (cf. Figure 34).



Figure 34 Source lumineuse employée : lampe à plasma de soufre type Solar-1000

6.1.4 Résultats

Comme l'intensité de la lampe est modulable, nous avons pu faire la mesure à trois niveaux de flux incident (notés : force 3, 8 et 10) :

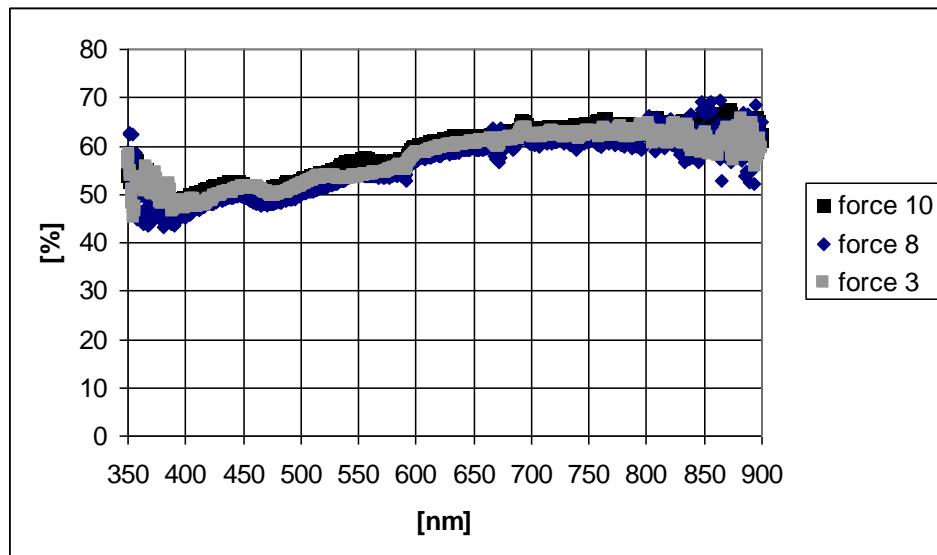


Figure 35 Spectre de transmission

On constate que les trois mesures donnent quasiment le même spectre de transmission, ce qui est conforme à notre attente. Nous avons ainsi une estimation de la précision de mesure. Celle-ci est satisfaisante de 400 à 850 nm. Dans cette plage nous constatons que la densité spectrale de la transmission est pratiquement uniforme, avec une légère baisse vers le bleu.

Remarque :

A partir de nos mesures il serait possible, mais compliqué et peu précis, de remonter par calcul à la transmissivité du matériau. En effet la transmission de la lumière à travers l'échantillon est fortement tributaire de sa position et de sa forme à cause de la forte diffusion de la lumière (d'où le nom d'alumine translucide).

6.1.5 Conclusion

Nos essais montrent que ce matériau est aussi transparent sur l'ensemble du domaine spectral d'émission du plasma de soufre que sur celui du sodium. Sa transparence est diffuse.

Nous confirmons donc que ce matériau devrait convenir aussi pour les ampoules des lampes à plasma de soufre.

6.2 Approvisionnement en bulbes en alumine translucide

La SCT, société des céramiques techniques, maîtrisait jusqu'à récemment l'ingénierie de la fabrication des bulbes en alumine translucide qui sont utilisées dans les lampes au sodium. Au début de l'année 2009, cette société a émis un avis favorable quant à nous proposer une offre pour la fabrication de bulbes en alumine translucide pour notre prototype. Malheureusement la SCT a depuis changé de stratégie industrielle et notre demande d'offre est restée sans réponse (cf. §8.5, page 51). Cette compétence est rare. Nous n'avons pas pour le moment trouvé de source de substitution (contact pris chez Covalent Materials).

7 Conclusion

Nous avons réussi à pulser le magnétron de notre prototype à une fréquence de répétition descendant à 1kHz et un rapport cyclique à 5%. Nous avons vérifié expérimentalement que, dans ces conditions, chaque pulse de micro-ondes porte une grande quantité d'énergie, et que la puissance instantanée passe alors par une valeur pic suffisamment élevée pour amorcer la décharge dans le bulbe, ce qui permet par la suite au soufre de s'évaporer.

Les tests sur les différents câbles coaxiaux, Tableau 1, ont prouvé que la longueur et le diamètre du câble n'est pas un obstacle pour l'allumage. Toutefois, plus fins ou long est le câble, plus grande est la fraction du flux d'énergie qu'il dissipe. On a pu constater de plus l'importance de l'accordage des câbles pour l'allumage ; la position du sabot de la terminaison a été réajustée à chaque changement de câble.

Le prototype a permis d'explorer les différents paramètres afférant à l'allumage de la lampe au soufre à bulbe séparé. Les derniers tests ont montré que la lampe s'allume en moins de 30 secondes, si la fréquence de répétition est à 1 kHz et le rapport cyclique à 10%. Par ailleurs, la cavité entourant le bulbe avait été raccourci, ce qui prouve que ce volume ne fait plus partie du résonateur électromagnétique. Le design de la cavité est donc maintenant libre, ce qui va nous permettre de faire double emploi avec l'optique de la lampe. Un réflecteur de l'entreprise « K 5600 lighting » nous a récemment été fourni. Reste à monter une grille de sorte à fermer son orifice aux microondes. Ceci mettra notre prototype dans sa configuration finale : câble coaxial plus réflecteur avec grille.

Les essais opérationnels ont mis en évidence une difficulté dans l'élaboration de l'algorithme de régulation de la fréquence de répétition. La cause du problème est cernée : dans une phase transitoire d'allumage, la FFT de la photodiode ne montre plus aucun pic émergeant du bruit. La fréquence saute alors au hasard, ce qui a entraîné l'extinction subite du plasma. Le futur algorithme devra permettre de passer à travers cette phase transitoire en adaptant en boucle ouverte la consigne à l'augmentation de la température dans le bulbe. Le plan d'une future version de l'algorithme a été échafaudé. Mais le développement complet du régulateur s'avère sortir largement des moyens alloués dans le présent projet.

Concernant l'alumine translucide, nos essais sur un échantillon tubulaire montrent que ce matériau est aussi transparent sur l'ensemble du domaine spectral d'émission du plasma de soufre que sur celui du sodium. Ce matériau, qui est employé pour les bulbes des lampes au sodium, devrait donc aussi convenir aux bulbes des lampes à plasma de soufre. Cependant, à cause d'un changement de stratégie, le fournisseur que nous envisagions ne donne pas suite à notre demande d'offre. Cette compétence est rare. Nous sommes à la recherche d'une source de substitution.

8 Annexes

8.1 Corps de l'antenne de couplage du bulbe

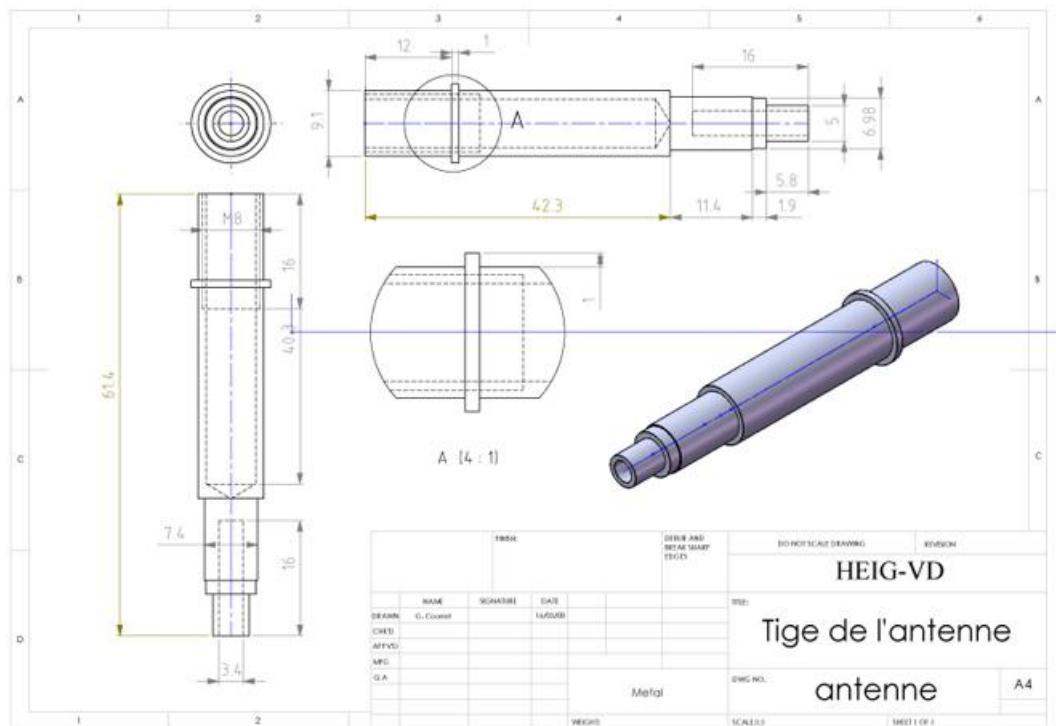


Figure 36 CAO du corps de l'antenne de couplage du bulbe.

Le petit bout s'enfiche dans le conducteur central d'un connecteur mal 7/16". L'autre bout est taraudé pour recevoir la vis de bout d'antenne.

8.2 Vis de bout d'antenne

Afin de supprimer la mise sous vide du bout de l'antenne, la vis de bout d'antenne a été élargie (cf. Figure 37 et Figure 38). Deux versions ont été réalisées, l'une convexe, l'autre concave.

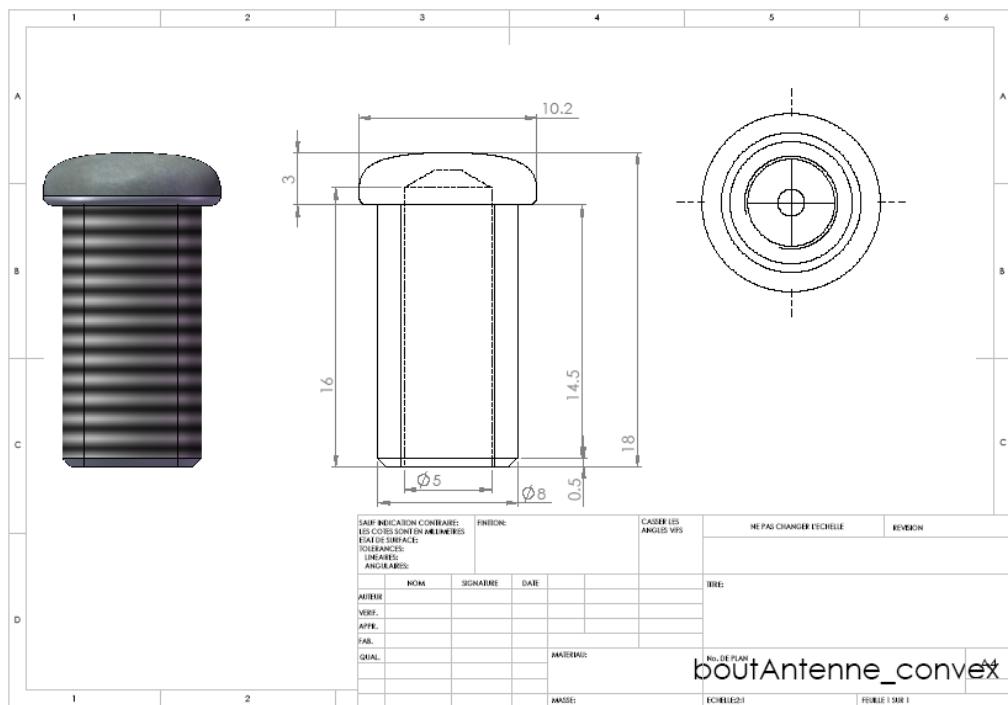


Figure 37 CAO de la vis de bout d'antenne, en version convexe.

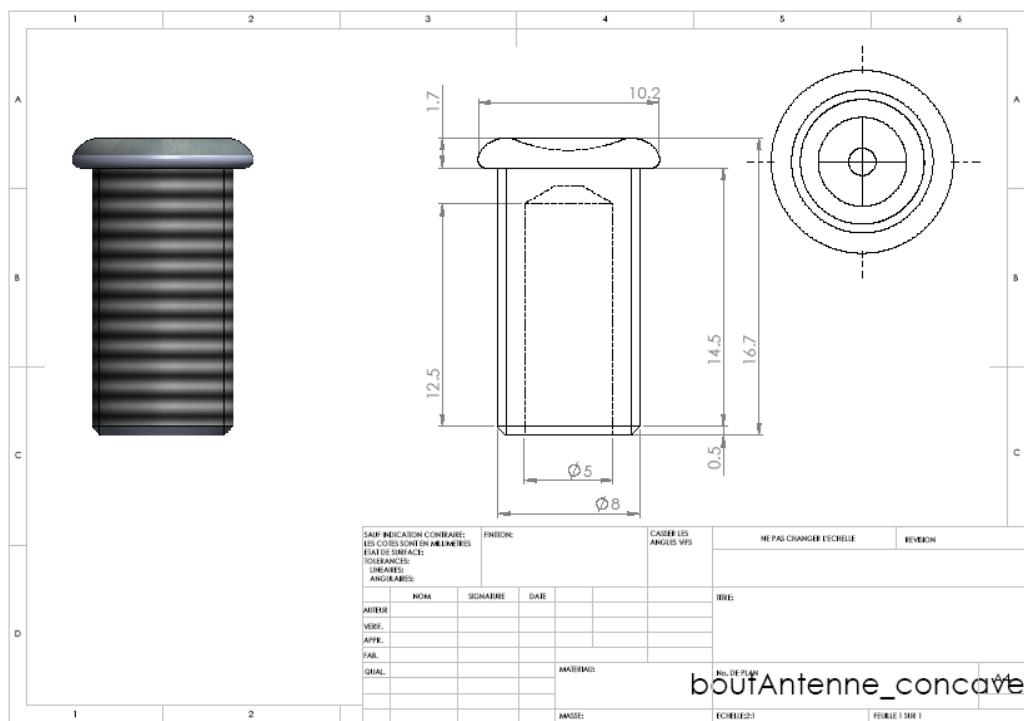


Figure 38 CAO de la vis de bout d'antenne, en version concave.

8.3 Bulbe en quartz fondu

Nous avons légèrement augmenté, de 1 mm, le diamètre du bulbe afin de faciliter l'amorçage de la décharge électrique et dans le but de faciliter la stabilisation du plasma.

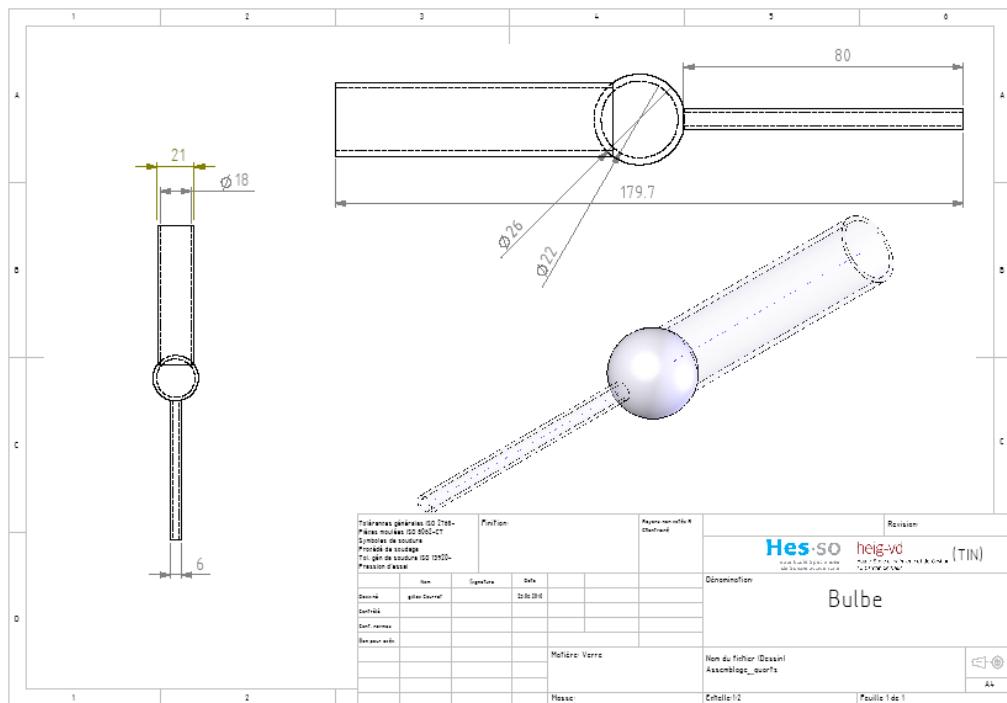


Figure 39 CAO du bulbe en verre de quartz fondu (silice pure)

8.4 Difficultés rencontrées et résolution

8.4.1 Problème de décharge dans l'antenne

Lors des premières versions de lampe au soufre avec couplage par antenne, la décharge qui se produit initialement dans le bulbe peut se déplacer à l'extrémité de l'antenne. Ce cas de figure présente deux problèmes : l'antenne se détériore et de l'énergie est dissipée. Pour résoudre cela deux options ont été suivies :

1. Faire le vide au niveau de l'antenne
2. Augmenter le diamètre de l'antenne

La première solution a été mise en œuvre avec succès [5]. Cependant celle-ci demande une architecture compliquée au niveau de la fermeture du pied du bulbe pour assurer un vide permanent ce qui augmente le coût de la production. C'est pourquoi la seconde solution a aussi été développée.

Tous les essais ont été effectués avec une antenne de 9 et 10 mm de diamètre sans qu'aucune décharge ne se produise. L'utilisation d'antenne de diamètre de 9 mm et plus résout ce problème et nous a permis de mener nos essais plus loin.

8.4.2 Rupture du bulbe

On observe que le couplage par antenne a tendance à concentrer les lignes de champ électrique au niveau du bulbe, ce qui est favorable à l'allumage. En contrepartie, il peut y avoir formation d'un point chaud sur le bulbe du côté de l'antenne de couplage. Ce phénomène a été observé à deux reprises, et a entraîné la destruction de deux bulbes. La température affichée par caméra thermique, placée sur le dessus du bulbe, était de 850 °C. Le verre de nos bulbes est du quartz fondu, il tient jusqu'à 1200 °C. Il semble donc que le point le plus chaud du bulbe n'est plus sur le dessus du bulbe mais du côté de l'antenne de couplage. D'une part les lignes du champ électriques pénètrent dans le bulbe par cette zone ; leur concentration fait augmenter la température du plasma de ce côté. D'autre part le pied du bulbe empêche la chaleur de s'évacuer, faisant ainsi accroître la température de la paroi du bulbe. Nous proposons un nouveau design de bulbe (cf. § 8.5, p. 52) qui devrait résoudre le problème en évitant cette accumulation de chaleur.

8.5 Bulbe en alumine translucide

Nous avons fait la conception d'un bulbe sphérique en alumine translucide en respectant les contraintes de fabrication de la SCT, la Société des Céramiques Techniques (cf. Figure 40). Cette dernière ne nous a cependant pas transmis d'offre.

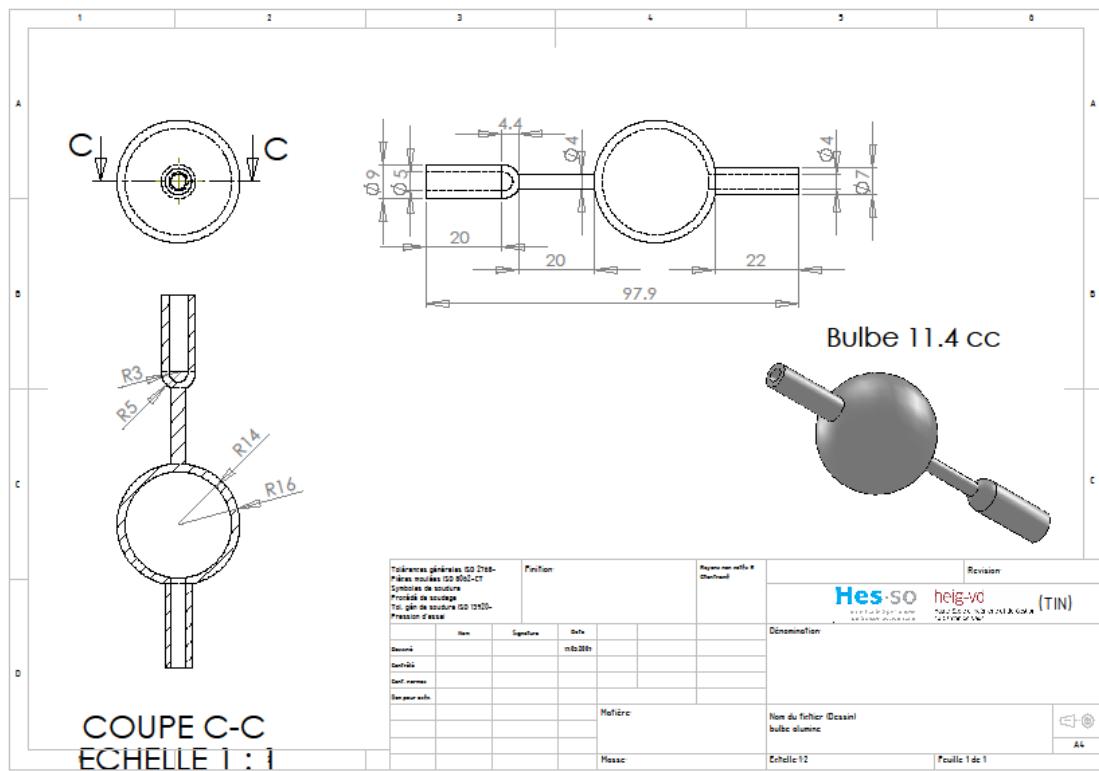


Figure 40 CAO du bulbe en alumine translucide

9 Bibliographie

- [1] G. Courret, L. Calame, F. Berthold, S. M. Dos Santos, M. Croci, A. Meyer, Rapport intermédiaire I.1, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, octobre 2009
- [2] G. Courret, L. Calame, F. Berthold, S. M. Dos Santos, M. Croci, A. Meyer, Rapport intermédiaire II : Développement d'un modulateur à semi-conducteur, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, juin 2010
- [3] DIRECTIVE 2002/95/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 janvier 2003
- [4] G. Courret, L. Calame, M. Croci, A. Meyer, Accordage du couplage du bulbe avec mise sous vide de l'extrémité de l'antenne, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, 2009
- [5] G. Courret, S. D. Marques Santos, L. Calame, M. Croci, A. Meyer, A Cable Mounted Bulb In High Efficient Sulphur Lamps, 16. Schweizerische Status-Seminar 2010 «Energie- und Umweltforschung im Bauwesen» , Zürich
- [6] S. C. Greer, The dielectric constant of liquid sulphur, J. Chem. Phys. 84 (12), 15 June 1986

[7] Gilles Courret, Laurent Calame, Jacques Croisier, Mirko Croci, Sustentation of a thermal plasma by acoustic resonance as a light source of high efficiency, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse, 2008

[8] W. Kaiser, R. P. Marques, A F Correa, Current Pulse Fed High-Pressure Sodium Lamps, IEEE, 2002, pp. 1499-1504