



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

ENVIRONMENTAL FRIENDLY HIGH EFFICIENT LIGHT SOURCE

PLASMA LAMP

Rapport final

Élaboré par

**Gilles Courret et Laurent Calame, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud
Institut de Micro et Nano Techniques**

Av. des sports 14, CH-1400 Yverdon-les-bains,
gilles.courret@heig-vd.ch, www.heig-vd.ch

et

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

Impressum

Date : 13 novembre 2007

Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, programme de recherche « Energie in Gebäuden »

Mühlestrasse 4, CH - 3063 Ittigen

Adresse postale : CH - 3003 Berne

www.bfe.admin.ch

Source d'acquisition de cette publication : www.recherche-energetique.ch

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Table des matières

1	Situation de départ.....	11
2	Historique du projet et but du présent travail.....	13
3	Remplacement du magnétron par un Lightron	15
3.1	Aspects thermiques.....	15
3.2	Alimentation électrique.....	16
4	Le nouveau modulateur	17
4.1	Mise au point.....	17
4.2	Exploration des nouvelles capacités.....	18
5	Explorer l'ajout de la modulation et de la rotation du bulbe.....	25
6	Le montage bulbe-antenne.....	26
7	Optimisation de la quantité de substance active dans le bulbe (tellure et sélénium).....	29
8	Montage du bulbe en terminaison de câble coaxial	36
8.1	Problématique	36
8.2	Méthode	36
9	Collaboration nationale	38
10	Collaboration internationale	39
11	Conclusion	40
12	Annexes	44
12.1	Coordonnées chromatiques (x, y).....	44
12.2	Observations visuelles des plasmas, modulation OFF	44
12.3	Comparaison de l'émission du prototype au sélénium avec la lumière du jour.....	46
12.4	Modulation à haute fréquence du plasma de tellure	47
12.5	Modulation à haute fréquence du plasma de sélénium	48
12.6	Modulation à haute fréquence du plasma de soufre.....	50
12.7	Modèle de régulation du Lightron en charge	50
13	Bibliographie	55

Résumé

Nous visions modifier la lampe au soufre Solar-1000 pour atteindre les caractéristiques suivantes :

- a) Lampe sans mouvement (bulbe statique)
- b) Efficacité lumineuse > 100 lm/W
- c) Puissance nominale < 100 W

Dès la première année (2005) nous avons obtenus les résultats suivants:

- a) Objectif a) atteint en modulant le magnétron dans le domaine 20 à 70 kHz. L'innovation consiste à générer dans le bulbe une onde acoustique stationnaire dont un ventre de pression se situe au centre.
- b) Objectif b) approché. Nous avons obtenu 86 lm/W, par rapport à la consommation du magnétron, ce qui donne 80 lm/W avec une alimentation de bon rendement.
- c) Objectif c) à moitié réalisé. Cette performance a été obtenue à 700 W, c'est-à-dire à la moitié de la puissance de la lampe Solar-1000 ; cela correspond à la puissance de la moins puissante des lampes au soufre de LG Electronics.

En 2006, nos résultats ont confirmé que, dans le cas du soufre, réduire le bulbe permet de diminuer la puissance nominale. Au tiers de la puissance nominale de la Solar-1000, l'efficacité lumineuse avec un bulbe statique de 5,4 cc a atteint 68 lm/W grâce au modulateur. A la même puissance, la solar-1000 ne produit que 60 lm/W. En outre, des preuves expérimentales de la modulation du plasma et de sa sustentation ont été obtenues. Par ailleurs, nous avons vérifié que le rendu de couleur de nos meilleurs prototypes correspond bien aux besoins de l'éclairage d'intérieur.

En 2007, nous avons exploré ce que le nouveau modulateur apporte. Les résultats les plus marquants sont :

- a) Nous avons réussi à allumer le plus petit de nos bulbes (1,2 cc), ce qui ouvre la voie pour descendre la puissance à 100W.
- b) La modulation par impulsions accroît l'efficacité lumineuse par comparaison avec une modulation sinusoïdale.

Abstract

We have aimed to modify the sulphur lamp Solar-1000 in order to reach the following characteristics:

- a) Motion less lamp (static bulb)
- b) Luminous efficiency > 100 lm/W
- c) Wattage < 100 W

By the end of the first year (2005) we had obtained the following results:

- a) Goal a) reached by modulating the magnetron in the range 20 to 70 kHz. This innovation works by generating inside the bulb a stationary acoustic wave that has a pressure anti node in the centre.
- b) Goal b) neared. We have reached 86 lm/W, in ratio to the magnetron input, which corresponds to 80 lm/W if a power supply of good efficiency is used.
- c) Goal c) half way achieved. The best luminous efficient has been obtained at 700 W, that is half of the Solar-1000 wattage and corresponds to the smallest wattage of the sulphur lamps that LG Electronics has put on the market.

In 2006 our results have shown that, in the case sulphur is the active substance, sizing down the bulb allows reducing the wattage. At third of the Solar-1000 wattage, our prototype fitted with a static bulb of 5.4 cc has reached 68 lm/W thanks to the modulator. At same power, the Solar-1000 outputs only 60 lm/W. Moreover, we have obtained evidences that the plasma is put in ultrasonic vibrations and

that, at resonating conditions, this can produce a sustentation effect. Besides, we have checked our best prototypes meet standards of indoor lighting (colour rendering and colour temperature).

In 2007 we have explored the capability of the new modulator. The more important results are:

- a) We have succeeded to light up our smallest bulb of 1.2 cc; this opens the way to low the wattage down to 100 W.
- b) A modulation by impulsions increases the luminous efficiency in comparison to a modulation by continuous sinusoidal wave.

Résumé complet (executive summary)

La lampe au soufre fournit une lumière très agréable avec une grande efficacité; la Solar-1000 a une consommation quatre à cinq fois inférieure à celles des lampes halogènes. A haute pression (~5 bar), le plasma de soufre donne un spectre lumineux continu proche de celui du soleil. C'est la seule lampe à spectre continu avec un maximum d'émission dans le visible, d'où sa haute efficacité et la qualité de l'éclairage qu'elle produit, éclairage qui est à la hauteur de celui des lampes halogènes. Contrairement aux sources actuelles d'efficacité comparable, qui sont d'utilisation générale mais de moins bonne performance visuelle (fluorescentes, halogénures métalliques, ...), la lampe au soufre ne contient ni mercure, ni plomb, ni aucune autre substance toxique. Elle répond donc à la nouvelle réglementation européenne.

Dans le cours des années 90, la société Fusion Lighting a mis le modèle Solar-1000 sur le marché. Dans ce dispositif, le soufre est maintenu à très haute température par induction électromagnétique à partir d'un magnétron conventionnel (2,45 GHz). L'absence d'électrode garantit une durée de vie record pour le bulbe, sans dégradation de la lumière. Notre mesure de l'efficacité lumineuse de cette lampe a donnée 115 lm/W à plein régime (1450 W).

En partenariat avec la société Solaronix, nous visons modifier la lampe Solar-1000 pour atteindre les caractéristiques suivantes :

- a) Bulbe sans mouvement
- b) Efficacité lumineuse supérieure à 100 lm/W.
- c) Puissance nominale inférieure à 100 W.

Nous avons commencé les travaux en janvier 2005. Dès la première année nous avons obtenus les résultats suivants:

- a) Objectif a) atteint en modulant le magnétron dans le domaine 20 à 70 kHz. L'innovation consiste à générer dans le bulbe une onde acoustique stationnaire dont un ventre de pression se situe au centre.
- b) Objectif b) approché. Nous avons obtenu 86 lm/W, par rapport à la consommation du magnétron, ce qui donne 80 lm/W avec une alimentation de bon rendement (¹).
- c) Objectif c) à moitié réalisé. L'efficacité lumineuse de 86 lm/W a été obtenue à une consommation d'énergie correspondant à la moitié celle de la lampe Solar-1000 à plein régime et égale à celle de la moins puissante des lampes au soufre commercialisées par le groupe Sud-Coréen LG Electronics (PLS 700W).

Durant l'année 2006, nous avons été contactés par LG. Par deux fois, des ingénieurs sont venus voir notre prototype fonctionner. Une start-up suisse, nommée Akhtis, a été créée pour commercialiser des lampes au soufre en Europe. L'année 2006 a été principalement consacrée aux tâches suivantes :

- a) Rédaction d'un brevet pour protéger notre invention.
- b) Publication et participation à une conférence spécialisée.
- c) Mesure du rendement du magnétron et du rendement thermodynamique du plasma.
- d) Installation d'un nouveau banc hyperfréquence accordable équipé de fluxmètres (fourni par Solaronix). Essais de bulbes de plus petites tailles, mesures du taux d'onde stationnaire dans le guide micro-onde, début du développement du nouveau système de couplage électromagnétique dit « bulbe-antenne ».
- e) Exploration de l'influence du remplissage du bulbe (variation de la teneur en soufre et premiers essais des substances alternatives : sélénium et tellure).
- f) Conception d'un modulateur de deuxième génération à bande passante plus large.

Nos résultats ont confirmé que, dans le cas du soufre, réduire la taille du bulbe permet de réduire la puissance nominale. Au tiers de la puissance nominale de la Solar-1000, l'efficacité lumineuse avec

¹ Dans tout le rapport, l'efficacité lumineuse est par défaut donnée par rapport à la consommation du magnétron.

un bulbe statique de 5,4 cc a atteint 68 lm/W grâce au modulateur. A la même puissance, la Solar-1000 ne produit que 60 lm/W. En outre, des preuves expérimentales de la modulation du plasma et de sa sustentation ont été obtenues. Par ailleurs, nous avons vérifié que le rendu de couleur de nos meilleurs prototypes est bon et correspond bien aux besoins de l'éclairage d'intérieur.

Pour l'année 2007, les principaux objectifs étaient:

- a) Remplacement du magnétron par un Lightron (fourni par LG). Les conclusions sont:
 - Il n'est pas indispensable d'installer un ventilateur pour le refroidissement du Lightron, ce que nous avons vérifié à postériori lors d'essais prolongés.
 - Le Lightron fonctionne en modulation aussi bien que le magnétron précédent.
- b) Réalisation et test du nouveau modulateur à triode. Exploration des nouvelles capacités.
 - Comme le premier, le nouveau modulateur a été fabriqué par Solaronix. Sa mise au point a été difficile à cause de la présence d'ondulations résiduelles à basse fréquence (100 Hz) et de bruits dans la gamme 0,1 à 250 MHz.
 - Nous avons réussi à allumer le plus petit de nos bulbes (1,2 cc) avec le nouveau modulateur alors que nos essais avec le précédent étaient restés vains. Le maintien du plasma de soufre dans un aussi petit bulbe est toutefois délicat car la température au cœur est faible. L'exploration de cette voie est quasi impossible sans asservissement de la fréquence de modulation avec, en permanence, recherche automatique de la fréquence de résonance. Il nous faut pour cela planter un processeur digital à la commande du modulateur.
 - Il est préférable de moduler le magnétron en signal carré plutôt qu'en sinus ; la vibration du plasma s'en trouve renforcée. Jusqu'à présent, nous n'avons pas pu imprimer au magnétron de véritables impulsions, malgré que le Lightron comporte des selfs de choc plus faibles que celles des magnétrons standards. Deux voies sont à l'étude pour aller plus loin dans ce sens.
- c) Concernant l'ajout de la modulation et de la rotation du bulbe, nous avons modifié le programme du projet car, d'après une publication récente [15], le plasma de soufre ne pourrait être le siège d'ultrasons dans le cas du bulbe tournant, ce qui prétend nos chances d'améliorer les performances en cumulant modulation et rotation du bulbe. Quoi qu'il en soit, nos résultats, qui sont valables pour des bulbes statiques, sont d'une grande robustesse car ils ont été obtenus par des moyens d'investigation de différentes natures. Et pour chacune des preuves de la vibration du plasma que nous avons obtenues — elles sont listées ci-dessous — nous avons proposé une explication issue de la mécanique ou de la physique moléculaire :
 - Le plasma de soufre se centre et pratiquement tout le volume du bulbe devient luminescent (sustentation acoustique [12]).
 - Le rendement thermodynamique du plasma augmente de manière importante (excitation vibrationnelle des molécules diatomiques -> augmentation du flux des molécules qui subissent le cycle dissociation – recombinaison [12]).
 - L'émission optique se décale vers les grandes longueurs d'onde (occupation des états vibrationnels élevés + principe de Frank-Condon [1]).
 - La vibration du plasma en phase avec la modulation, de manière bien-sûr imperceptible à l'œil et à l'oreille car trop rapide (résonance acoustique ultrasonore [4]).
 - Le couplage électromagnétique est renforcé (non linéarité due à ce que la modulation augmente le degré d'ionisation du plasma [4]).
- d) Concernant le système bulbe-antenne (bulbe monté sur une antenne quart d'onde), nos essais aboutissent aux résultats suivants :
 - Ce montage supprime la fonction de cavité électromagnétique résonante de la grille. Cette dernière ne garde que sa fonction de cage de Faraday, ce qui libère son design. On peut ainsi la ramené à une enveloppe conductrice transparente, une grille ou un

film de surface, fermant une optique à réflecteur par exemple. La grille a un diamètre de 7,5 cm dans la version cavité résonante, alors que celui du bulbe fait 2,5 cm (version 5,4 cc [11]). En admettant que le réflecteur passe à 5 mm du bulbe, l'optique est réduite dans un rapport d'échelle de 0,47. Nous divisons ainsi son volume par 8. Notre système de mesure photométrique actuel ne convient plus si la lampe est munie d'une optique car alors l'hypothèse d'isotropie n'est plus acceptable. C'est pourquoi notre laboratoire est en train de s'équiper d'une sphère d'intégration.

- Nous avons pu démarrer des petits bulbes (2,9 cc) à des niveaux de puissance inférieure à 100 W.
- Un problème surgit toutefois lorsque la pression dans le bulbe monte car alors la décharge se déplace à l'extérieur, au bout de l'antenne. Pour aller plus loin, nous avons contracté l'entreprise Jelosil, fabricant de machines de production d'ampoules en quartz. Mais les antennes réalisées par Jelosil n'ont pas données satisfaction. Des essais sont encore en cours.

e) Optimisation du remplissage au tellure (bulbes de 8 cc) :

- Le plasma de tellure occupe tout le volume à disposition sans aide de la modulation. La forme du plasma n'est pas marquée par la gravitation, contrairement au cas du soufre. Cette morphologie du plasma de soufre indique que son absorption électromagnétique à 2,45 GHz est une fonction croissante de la température, au moins dans la majorité de la plage de température où se trouve le plasma. C'est cette caractéristique qui entraîne le risque d'avalanche thermique et par conséquence de rupture du bulbe (formation de bulle de surchauffe). Donc d'après la morphologie de son plasma, nous pouvons dire du tellure qu'il n'offre pas de domaine de température où l'absorption électromagnétique est fortement croissante. Par conséquent, le risque de rupture d'un bulbe rempli au tellure est faible, voire inexistant. En contre partie, l'efficacité lumineuse est nettement moins élevée. Ceci découle du fait que, sans cette rétroaction positive, la température au cœur s'élève moins.
- La modulation à basse fréquence (entre 15 et 80 kHz) décale le spectre vers les grandes longueurs d'onde. La teneur influence nettement le spectre ainsi que le décalage spectral que produit la modulation. Le décalage est plus fort à certaines fréquences, pour lesquelles le plasma prend des formes particulières, signe de résonances acoustiques, en restant parfois stable. Aucun régime de résonance réellement stable n'a pu être établi pour les deux bulbes les plus chargés (6,0 et 2,9 mg/cc).
- La teneur joue un rôle capital pour le rendement du plasma et l'efficacité lumineuse (voir Tableau 1, page 29). La meilleure efficacité a été obtenue à 2,9 mg/cc ; elle n'est que de 19 lm/W (voir Tableau 4, page 42).
- A 0,9 mg/cc, mais pour un bulbe de 17 cc, des performances intéressantes sont au rendez-vous : la modulation a permis de monter le rendement du plasma à 47% et l'efficacité lumineuse à 68 lm/W, à une puissance consommée par le magnétron de 600 W (voir Tableau 1). Mais aucune performance comparable à celle-ci n'a pu être obtenue avec un bulb de 8 cc. Réduire la taille du bulbe entraîne une baisse considérable de la performance avec le tellure, alors que cela n'avait pas été le cas avec le soufre [4]. Il semble donc que le coefficient de transfert thermique du plasma soit plus élevé avec le tellure qu'avec le soufre. En réduisant la taille du bulbe nous augmentons le rapport surface sur volume, ce qui est très pénalisant pour la température au cœur si le transfert thermique est fort. De plus, modulation ON, le plasma de soufre se maintient mieux hors équilibre thermodynamique local, ce qui rend possible des gradients thermiques plus abruptes. Dans ce sens, cette différence de comportement entre le soufre et le tellure tend à confirmer la conjoncture théorique que nous avancions au début du projet, à savoir, que l'on peut augmenter l'efficacité lumineuse du plasma en l'écartant de l'équilibre thermodynamique local [12].
- Modulation OFF, la teneur à 2,9 mg/cc donne un spectre extrêmement bien ajusté à la sensibilité de la vision photopique. Malgré cela, la performance reste modeste (16 lm/W) car le rendement thermodynamique est insuffisant (8%). Ceci provient du fait

que le transfert thermique dans le plasma de tellure est trop fort. Pour contrecarrer cet inconvénient il faudrait augmenter la taille du bulbe. Et de plus, comme le tellure a l'avantage de ne pas engendrer de risque de rupture du bulbe, cette substance devrait être un bon candidat pour une lampe de forte puissance (> 2 kW) à bulbe statique (25 cc ?).

f) Optimisation du remplissage au sélénium (bulbes de 8 cc) :

- Modulation OFF, le plasma de sélénium n'occupe pas le bulbe complètement, contrairement au plasma de tellure. Mais sa forme n'est pas aussi marquée par la gravitation que celle du plasma de soufre. Avec le sélénium, la modulation a permis d'améliorer le couplage électromagnétique : le taux d'onde stationnaire dans le guide micro-onde était systématiquement plus bas en modulation ON que OFF à puissance égale. Globalement, le couplage est moins bon avec le sélénium qu'avec le soufre, mais meilleur qu'avec le tellure. Il semble donc que le sélénium répond de manière plus linéaire que le soufre, mais moins que le tellure. Avec le sélénium, en conséquence, le risque d'avalanche thermique est moindre qu'avec le soufre mais supérieur qu'avec le tellure. Et on constate en effet que, sans modulation, le bulbe a une meilleure tenue en température qu'avec le soufre.
- La modulation à basse fréquence (entre 20 et 80 kHz) décale le spectre vers les grandes longueurs d'onde. Le décalage est nettement moindre aux faibles teneurs. Pour la teneur forte (3 mg/cc), la modulation a un effet très fort sur la forme et la couleur du plasma à certaines fréquences, ce qui suggère de fortes résonances acoustiques. Mais aucun régime véritablement stable n'a pu être établi, même en modulation OFF d'ailleurs.
- La teneur influence le rendement du plasma et l'efficacité lumineuse. Contrairement aux bulbes 8 cc à faible remplissage (1,1 et 0,6 mg/cc), celui qui était le plus rempli (3,0 mg/cc) a vu sa performance sensiblement améliorée par la modulation (+16% de rendement thermodynamique et +27% pour l'efficacité lumineuse, voir Tableau 2, page 32).
- A la teneur de 1,1 mg/cc, nous n'avons pas trouvé de réglage de la modulation permettant d'augmenter sensiblement l'efficacité lumineuse. Malgré cela, c'est cette teneur qui donne la meilleure performance de la série des bulbes de 8 cc, à savoir 46 lm/W (voir Figure 20 et Tableau 2).
- A 1,8 mg/cc, mais pour un bulbe plus gros (17 cc), des performances intéressantes sont au rendez-vous [21] : 52 lm/W avec modulation pour une puissance consommée par le magnétron de 800 W. La meilleure performance avec un bulb de 8 cc n'est pas très inférieure (46 lm/W). Réduire le bulbe semble donc nettement moins limiter les performances qu'avec le tellure. Donc probablement, le transfert thermique dans le plasma est plus faible pour le sélénium que pour le tellure.

- g) Teneurs préconisées : de l'ensemble des essais effectués, on peut préconiser pour des bulbes de 8 cc une teneur maximale à ne pas dépasser (voir Tableau 3, page 34). Au Tableau 4 (page 42) nous indiquons, pour chaque substance, la teneur qui a donné la meilleure performance. Il apparaît que le soufre est la substance qui convient le mieux à notre objectif : la meilleure efficacité lumineuse à la plus basse puissance.
- h) Bulbe asphérique : la forme de ce bulbe a été étudiée pour que l'onde acoustique arrive contre le bulbe simultanément sur toute la paroi. Elle tient compte donc de l'anisotropie acoustique du plasma, qui découle de la dérive E^B . Cette mise en forme augmente la tenue thermomécanique du bulbe. L'efficacité lumineuse atteint 62 lm/W en modulation par signal carré, pour une consommation du Lightron à 580 W (voir Tableau 4). Dans cette situation, la température de couleur est élevée (15'700 K), mais le rendu de couleur très bon (Indice CIE de rendu de couleur = 87).
- i) Montage du bulbe au bout d'un câble coaxial : maintenant que la rotation du bulbe est supprimée, il est envisageable de monter le bulle en terminaison de câble coaxial. Dans la nouvelle configuration, la cavité résonante cylindrique est remplacée par ce câble; sa longueur est ajustée à un nombre entier de demi-longueur d'onde (quelques centimètres) pour

satisfaire la condition de résonance. Avec ce montage on ouvre quantité de possibilités d'intégration en séparant le bulbe du corps de la lampe (projecteurs, lustres, appliques ou plafonniers encastrables par exemples). Ce montage est prêt de l'alimentation électrique jusqu'au câble coaxial (organes pour la plupart fournis par Solaronix). Mais pour ce qui est du bulbe, la conception du système de montage du bulbe à la terminaison du câble coaxial nécessite encore une étude de choix de matériaux et un approfondissement des aspects électromagnétiques et thermiques. Une terminaison prototype est en cours de réalisation. Elle consiste en un tube de quartz, fermé du côté soudé au bulbe. Ce tube doit être métallisé à l'intérieur comme à l'extérieur. Le premier dépôt métallique est réalisable par voie vapeur (CVD), mais une mise aux points du procédé s'avère nécessaire.

- j) Comme prévu, les résultats de ce projet ont été divulgués au travers de l'Agence International de l'Energie ECBCS Annexe 45 (Energy Efficient Electric Lighting for Buildings). Nous avons fait des présentations orales à deux meetings et échangé des informations utiles. Enfin, nous avons parachevé notre participation en fournissant un document de synthèse (sulphur lamp, AIE status). La lampe au soufre apparaît dans les éléments de la sous-tâche **B3 « Trends in existing and future lighting technologies »**, parmi d'autres technologies dont notamment les LED blanches. Comparativement à ces dernières, le bulbe de la lampe au soufre offre une source de plus haute densité, ~4000 lm/cc contre ~40 lm/cc, ce qui convient mieux aux optiques des luminaires (rendement supérieur). La lampe au soufre se présente donc comme un candidat d'avenir pour les luminaires de forte puissance (spots, lustres et plafonniers pour halls ou surfaces commerciales, ...).

Pour finir, nous résumons dans le Tableau 5 (page 43) les caractéristiques des meilleurs prototypes réalisés dans ce projet.

1 Situation de départ

La lampe au soufre fournit une lumière très agréable avec une grande efficacité; la Solar-1000 a une consommation quatre à cinq fois inférieure à celles des lampes halogènes [2]. A haute pression (~ 5 bar), le plasma de soufre donne un spectre lumineux continu proche de celui du soleil. C'est la seule lampe à spectre continu avec un maximum d'émission dans le visible (voir Figure 1), d'où sa haute efficacité et la qualité de l'éclairage qu'elle produit, éclairage qui est à la hauteur de celui des lampes halogènes. Contrairement aux sources actuelles d'efficacité comparable, qui sont d'utilisation générale mais de moins bonne performance visuelle (fluorescentes, halogénures métalliques, ...), la lampe au soufre ne contient ni mercure, ni plomb, ni aucune autre substance toxique. Elle répond donc à la nouvelle réglementation européenne (Directive 2002/95/CE) [3].

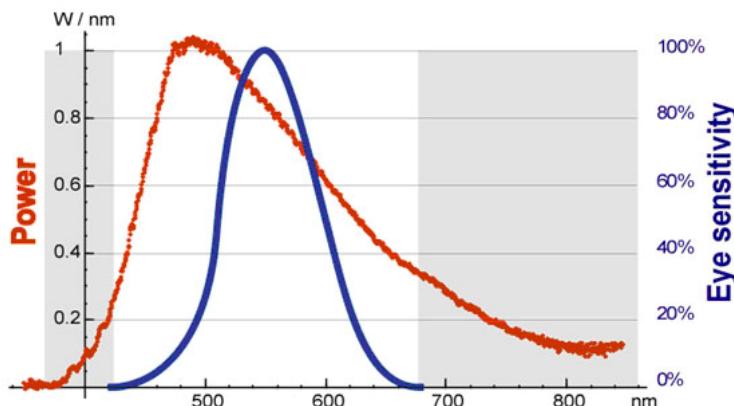


Figure 1 Spectre de la lampe Solar-1000 comparé à la sensibilité visuelle de l'homme (en vision photopique)

Cette technologie a été inventée aux USA par Ury et al, il y a une vingtaine d'année (brevet WO 92/08240 déposé en 1990). Dans le cours des années 90, la société Fusion Lighting a mis la lampe Solar-1000 sur le marché. Dans ce dispositif, le soufre est maintenu à très haute température par induction électromagnétique à partir d'un magnétron conventionnel (2,45 GHz). L'absence d'électrode garantit une durée de vie record pour le bulbe, sans dégradation de la lumière. Notre mesure de l'efficacité lumineuse de cette lampe a donné $115 \pm 5 \text{ lm/W}$ à plein régime (1450 W); 15% de puissance en moins n'entraîne qu'une baisse légère de son efficacité [2].

La commercialisation à large échelle tentée par Fusion Lighting a toutefois échoué. Ceci a été dû, selon toute vraisemblance, à un manque de maturité technologique. Premièrement, seules des modèles de puissances élevées étaient disponibles, deuxièmement, la fiabilité des lampes n'était pas aussi bonne qu'annoncée, et tertio, le fait que le bulbe doit être maintenu en rotation a certainement rendu nombre d'acheteurs potentiels dubitatifs quant à la durabilité opérationnelle de la lampe.

Au début des années 2000, la lampe au soufre prend un nouvel essor industriel. Plusieurs groupes Asiatiques ont investi en masse dans cette technologie (Chine et Corée du sud). L'un d'eux, LG Electronics, a repris de A à Z la conception de la Solar-1000, sans en changer les principes fonctionnels (induction par micro-ondes, bulbe tournant). Lors d'un déplacement en Corée, nous avons vu une ligne de production permettant de produire quelques milliers d'unités par mois de cette lampe rebaissée PLS (Plasma Lighting System). Les modèles commercialisés ont une puissance de 900 ou 700 W, ce qui correspond à un secteur de marché déjà nettement plus large que celui de la Solar-1000 (voir Figure 2). Cette réduction de la puissance est toutefois accompagnée d'une baisse de l'efficacité lumineuse (80 lm/W à 700 W). Bien que la technologie soit restée identique, et donc complexe (bulbe maintenu en rotation), la durée de vie annoncée est de 20'000 heures.



Figure 2 PLS en plafonnier (puissance nominale : 700 W, efficacité lumineuse : 80 lm/W)

2 Historique du projet et but du présent travail

Les objectifs de ce projet étaient de faire progresser la technologie de la lampe en partant de la Solar-1000. En partenariat avec l'OFEN et la société Solaronix, nous voulions supprimer la rotation du bulbe, réduire sa puissance et si possible augmenter l'efficacité lumineuse. Nous visions produire un prototype ayant les caractéristiques suivantes (contrats OFEN Nr. 151247 et 151248) :

- a) Bulbe sans mouvement
- b) Efficacité lumineuse supérieure à 100 lm/W.
- c) Puissance nominale inférieure à 100 W.

Nous avons commencé les travaux en janvier 2005. Fin 2005, l'avancement était le suivant (voir [4, 5] pour plus de détails):

- a) Bulbe sans mouvement: objectif atteint. Le problème que pose l'arrêt du bulbe est sa tenue en température. Le quartz commence à perdre sa résistance mécanique vers 1120 °C, ce qui limite la puissance admissible dans le bulbe et par voie de conséquence l'efficacité lumineuse atteignable (environ 40 lm/W dans le cas de la Solar-1000 bulbe à l'arrêt). Notre innovation résout ce problème sans utiliser de ventilateur ni tout autre mouvement mécanique. Son principe consiste à générer une onde acoustique ultrasonore dans le bulbe qui, par résonance, permet de sustenter le plasma, ce qui empêche la fusion du bulbe, en plus de fournir d'autres effets favorables à l'efficacité lumineuse comme nous le verrons plus loin. Les essais ont montré l'efficacité de ce principe [6].
- b) Efficacité lumineuse > 100 lm/W. Ce but a été approché. Nous avons obtenu 86 lm/W (²). En prenant une alimentation de rendement standard (~90%), cela équivaut à la performance des PLS et celle de la Solar-1000 à même puissance, alors que ces dernières ont un bulbe tournant (⁵).
- c) Puissance nominale inférieure à 100 W. Ce but a été à moitié réalisé. L'efficacité lumineuse de 86 lm/W a été obtenue à une consommation du magnétron de 650 W. En prenant une alimentation de rendement standard, cela nous met à la moitié de la puissance de la lampe Solar-1000 et au même niveau que la moins puissante des PLS. Nous pensons que la clé pour réduire encore la puissance sans dégrader significativement l'efficacité est de réduire le volume du bulbe. LG Electronics poursuit des recherches dans ce sens aussi.

Durant l'année 2006, nous avons été contactés par le groupe Sud-Coréen LG Electronics. Par deux fois, des ingénieurs coréens sont venus voir notre prototype fonctionner. Une start-up suisse, nommée Akhtis, a été créée pour commercialiser des lampes au soufre en Europe (voir www.akhtis.com). Lors d'un voyage en Corée, nous leur avons fait des offres de mandats visant à incorporer le modulateur dans les PLS ; celles-ci ont finalement été déclinées. L'année 2006 a été dédiée aux tâches suivantes (voir [6] pour plus de détails):

- a) Rédaction d'un brevet. Notre invention est maintenant protégée par un brevet européen (n°07405189.7-2208) au nom de Solaronix. Un contrat engage ce partenaire d'une redevance en cas d'exploitation commerciale.
- b) Publication et participation à la conférence 14 Schweizerisches Status-Seminar [7].
- c) Evaluation de l'efficacité du magnétron, mesure du rendement thermodynamique du plasma.

² Dans tout le rapport, l'efficacité lumineuse est par défaut donnée par rapport à la consommation du magnétron.

⁵ Notre alimentation n'a pas un aussi bon rendement pour des raisons de versatilité dues à l'investigation expérimentale.

- d) Installation d'un nouveau banc hyperfréquence accordable équipé de fluxmètres. Avec ce dernier, nous avons pu essayer des bulbes de plus petites tailles, mesurer le taux d'onde stationnaire dans le guide micro-onde, avec et sans modulation, et initier le développement du nouveau système de couplage électromagnétique dit « bulbe-antenne ».
- e) Etendre nos connaissances sur l'influence du remplissage du bulbe (variation de la teneur en soufre et premiers essais des substances alternatives : sélénium et tellure).
- f) Faire la conception d'un modulateur de deuxième génération à bande passante plus large.

Nos résultats ont confirmé que, dans le cas du soufre, réduire la taille du bulbe permet de réduire la puissance nominale. Au tiers de la puissance nominale de la Solar-1000, l'efficacité lumineuse avec un bulbe statique de 5,4 cc a atteint 68 lm/W grâce au modulateur. A la même puissance, la solar-1000 ne produit que 60 lm/W et un bulbe statique de taille standard produit encore un peu moins. En outre, des preuves expérimentales de la modulation du plasma et de sa sustentation ont été obtenues. Par ailleurs, nous avons vérifié que le rendu de couleur de nos prototypes est bon et correspond bien aux besoins de l'éclairage d'intérieur.

Pour l'année 2007, les principaux objectifs étaient (voir [8]):

- a) Remplacement du magnétron par un Lightron.
- b) Réalisation et test du nouveau modulateur
- c) Explorer l'ajout de la modulation et de la rotation du bulbe
- d) Montage du bulbe sur une antenne quart d'onde (« bulbe antenne »)
- e) Optimisation du remplissage
- f) Montage du bulbe au bout d'un câble coaxial.

3 Remplacement du magnétron par un Lightron

Le magnétron, qui était d'un modèle standard (Panasonic 2M244-M1), est remplacé par un Lightron. Il s'agit du magnétron qu'LG Electronics a développé pour équiper les lampes PLS. Ses selfs de choc sont inférieures d'une décennie à celles des magnétrons standards, qui équipent par exemple les fours micro-ondes de cuisine. Sa dynamique étant donc supérieure, sa modulation devrait être plus aisée. Le montage du Lightron sur notre banc a nécessité quelques aménagements mécaniques.

3.1 Aspects thermiques

Le Lightron est prévu pour fonctionner avec un refroidissement forcé. Il est équipé d'un radiateur conçu pour la ventilation forcée. L'ayant sorti de son carénage, il n'était pas aisément de reproduire une ventilation aussi forte.

Les essais que nous avons conduits montrent qu'il est possible de le faire fonctionner sans ventilation forcée. Afin de faire travailler au mieux les ailettes du radiateur, le banc est placé en position verticale (cf. Figure 3).



Figure 3 Vue de la paillasse d'expérimentation. A gauche : nouvelle caméra infrarouge. Au centre : guide d'onde accordable couplée à la cavité grillagée contenant le bulbe. En haut à droite : tube photométrique. En bas à droite : amplificateur RF 100 W.

Une sonde de température a été collée entre deux ailettes et une calibration avec des résistances électriques a été effectuée [9]. Vu la masse du radiateur, il n'est pas surprenant de constater une inertie thermique relativement importante (constante de temps ~ 10 minutes). Conformément à toute attente, la puissance dégagée par le radiateur est une fonction croissante de l'écart de température entre le radiateur et le local, dont la dérivée est elle-même croissante. Mais les mesures montrent que cette nonlinéarité est en fait assez faible et nous pouvons résumer la performance du radiateur en lui attachant un coefficient constant de transfert thermique de 2,9 W/degré (cf. Figure 4).

Par le calcul nous avons estimé que la conductance thermique entre le magnétron et le radiateur est 11 W/degré. Pour nos expériences, nous envisageons de faire fonctionner le Lightron jusqu'à peu près 600W. Avec un rendement escompté de 70% (performance standard), le dégagement de chaleur sera de 180W. En supposant que la température du local soit de 27°C, nous obtenons une température de 90°C à la surface du radiateur et de 107°C au contact avec le magnétron. La

température au cœur du Lightron sera certainement un peu plus élevée, mais nous pensons qu'il devrait pouvoir la supporter.

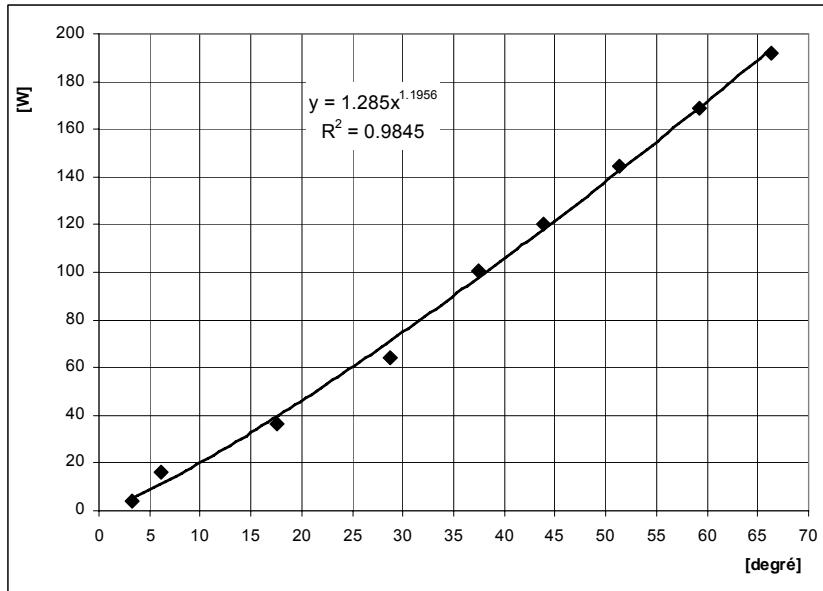


Figure 4 Flux de chaleur en fonction de l'écart de température entre sa surface et le local

En conclusion :

- a) Il n'est pas indispensable d'installer un ventilateur pour le refroidissement du Lightron, ce que nous avons vérifié à postériori lors d'essais prolongés.
- b) Par cette calibration nous pouvons déduire de la température du radiateur la puissance électrique perdue par le Lightron ; bien que cette mesure ne soit pas très précise, elle nous permet de contrôler nos mesures de la puissance électrique consommée par le magnétron et de son émission micro-onde en établissant le bilan des flux d'énergie.

3.2 Alimentation électrique

Le bon fonctionnement du Lightron a été testé avec un bulbe de performance connue [10]. Le Lightron est compatible avec la modulation. A ce stade, le modulateur n'était pas encore modifié (version à fonctionnant avec un transformateur HF). Pour ce qui est de la partie photométrique et spectrométrie, le montage de mesure n'a pas changé par rapport à la description donnée dans le deuxième rapport intermédiaire (voir [4] §3). La comparaison avec les performances obtenues avec le magnétron standard ne montre pas de différence significative (< 4% en ce qui concerne l'efficacité lumineuse en modulation).

En outre, nous avons constaté que la tension d'alimentation du Lightron se situe autour de 3 kV, ce qui est sensiblement plus bas que celle des magnétrons standards (~ 3,7 kV). Cette différence permet de diminuer le coût et le volume de l'alimentation (moins d'isolation).

4 Le nouveau modulateur

4.1 Mise au point

Comme le premier, le nouveau modulateur a été fabriqué par Solaronix. Le premier fonctionnait avec un transformateur HF (voir [4] §3) ; il modulait donc la tension cathodique du magnétron, ce qui est peu stable car le magnétron est très redresseur (une petite variation de tension donne une grande variation de courant). Basé sur une triode de moyenne puissance (Thales T800-1), le nouveau modulateur pilote le courant anodique. La triode présente les avantages supplémentaires suivants :

- a) bande passante beaucoup plus large (DC à 50 MHz)
 - b) réactance très faible.

Comme un magnétron doit être mis à la masse par l'anode, il est nécessaire de placer la triode à la haute tension, ce qui rend délicate la réalisation du circuit (isolation > 5 kV). De plus une triode n'est pas conçue pour commander un magnétron car le potentiel de grille doit être plus bas que celui de la cathode, afin de contrôler le flux d'électrons qui traverse jusqu'à l'anode. Pour polariser la grille, il faut donc ajouter à la haute tension du générateur de puissance une tension continue supplémentaire. La commande est obtenue en superposant à cette tension une onde à travers un condensateur haute tension. Quelques ajustages de la composante continue de la tension cathode - grille se sont avérés nécessaires ; le circuit opérationnel de base est présenté à la Figure 5 :

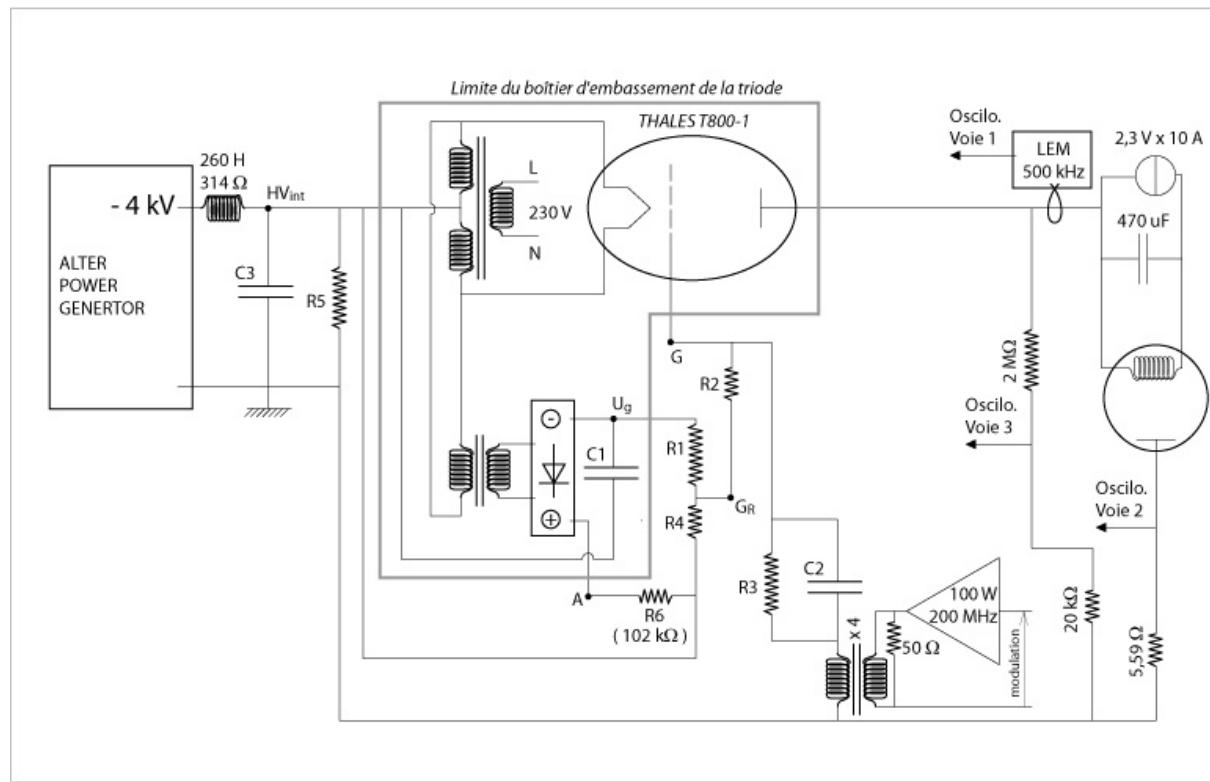


Figure 5 Alimentation électrique avec modulateur à triode et branchement de l'oscilloscope

Ce circuit a été conçu à des fins purement expérimentales. Contrairement au premier modulateur, celui-ci offre la polyvalence désirée : n'importe quelle forme de signal peut être appliquée en entrée. Un générateur de signal nous fournit cette onde (marquée « modulation » sur la Figure 5). La bande passante est toutefois limitée par le flux rétrograde maximum que peut supporter l'amplificateur RF. Pour éviter de l'endommager, nous avons dû surveiller ce flux. Et d'autre part, pour obtenir une amplitude de modulation suffisante, nous avons du placer un petit transformateur RF en parallèle de la charge 50 Ohm. L'adaptation d'impédance ne fut assez bonne qu'entre 15 kHz et quelques MHz.

Il est hors de question de rendre ce circuit compétitif sur le plan économique ou sur le plan énergétique. Une fois la forme d'onde arrêtée, le circuit pourra être repensé de A à Z pour intégrer les aspects liés aux coûts de fabrication comme ceux liés à l'efficacité énergétique.

La phase test a été menée en deux étapes sur un bulbe connu, comme suit :

- Amplificateur audio (50 Hz - 40 kHz): test ok, mais ondulation résiduelle à 100 Hz.
- Amplificateur RF (10 kHz – 200 MHz): test ok, mais ondulation résiduelle à 100 Hz et bruit dans la gamme 0,1 à 250 MHz.

Ces deux défauts, ondulations basse fréquence et parasitage haute fréquence, avaient déjà été constatés avec le précédent modulateur. L'ondulation résiduelle basse fréquence (100 Hz) provient naturellement du redressement du secteur ; nous avons cherché à la supprimer mais sans y parvenir totalement. Comme son amplitude augmente avec la puissance entrant dans le magnétron, il semble que sa principale source soit l'alimentation du chauffage de la cathode du magnétron vu que celle-ci n'est pas branchée en montage symétrique à trois points. La meilleure configuration a été obtenue en utilisant une alimentation de courant continue de laboratoire branchée sur un transformateur d'isolation HT. Mais comme cela n'a pas fait disparaître toute ondulation à 100 Hz, nous pensons qu'il existe au moins une autre source.

Concernant le bruit observé dans la gamme 0,1 à 250 MHz, ces perturbations dégradent le rapport signal sur bruit du courant anodique mesuré avec la petite résistance que l'on a placée sur le retour à la terre du magnétron (voie 2 sur la Figure 5). Nous avons identifié les principales sources de ce parasitage, le couplage se faisant par la terre :

- Les alimentations à découpage présentes dans l'environnement. Typiquement, on observe des impulsions très brèves qui se répètent à environ 0,5 MHz, chaque impulsion étant en fait une oscillation amortie de quelques MHz. La principale source est le générateur de puissance (Alter Power Generator, cf. Figure 5). Bien qu'ayant éliminé la majeure partie de ces parasites à l'aide de filtres, nous ne sommes pas arrivés à les supprimer entièrement. L'amplitude résiduelle est de 3 mA.
- L'amplificateur RF induit du bruit à plus haute fréquence, entre 40 et 250 MHz, mais avec une porteuse à 100 kHz. L'amplitude de ce bruit est de 8 mA lorsque le générateur de puissance (Alter Power Generator) ne débite pas, mais elle augmente lorsque l'on monte la puissance.

Afin de disposer d'un signal plus propre, nous avons doublé la mesure du courant anodique avec un capteur inductif LEM dont la fréquence de coupure se situe à 500 kHz (voie 1 sur la Figure 5). En contrepartie, le spectre du courant issu de cette mesure n'est significatif qu'en dessous de 500 kHz.

4.2 Exploration des nouvelles capacités

Trois nouveaux types d'essai ont pu être pratiqués grâce au nouveau modulateur :

- Allumage de très petits bulbes

Avec le premier modulateur, nous n'avions pas réussi à allumer le plus petit de nos bulbes (1,2 cc, voir Figure 6, à gauche). Il nous semblait que ce modulateur absorbe de l'énergie lorsque la charge du magnétron est extrêmement élevée, ce qui est le cas lorsque la décharge n'est pas encore allumée. Ceci nous empêchait d'utiliser la modulation pour faciliter l'allumage. Avec le nouveau modulateur, nous avons réussi à allumer ce bulbe de 1,2 cc (voir Figure 6, à gauche) :



Figure 6 Bulbe de 1,2 cc. A gauche : pas de décharge ; à droite : plasma d'argon.

La décharge est survenue après quelques secondes à une puissance de 600 W (consommation du magnétron), une modulation sinusoïdale à 70 kHz donnant une amplitude de 600 mA sur le courant anodique. Au fur et à mesure que le bulbe chauffe, le plasma d'argon décline au profit du plasma de soufre. Il ne faudrait théoriquement pas plus de 100 W pour maintenir le plasma de soufre dans un si petit bulbe puisque la densité de puissance dans les cas qui ont données de bonnes performances était inférieure à 100 W/cc [11]. Notre objectif de baisser la puissance nominale de la lampe en dessous de 100 W semble donc pratiquement en ligne de mire.

Cependant il s'avère extrêmement difficile de maintenir le plasma de soufre dans un bulbe aussi petit, probablement du fait que, comme le rapport surface sur volume augmente, la température au cœur du plasma faiblit. Ceci n'est toutefois vrai que lorsque la diffusion thermique est établie, c'est-à-dire quand le plasma est en équilibre thermodynamique local. Comme la modulation permet de sortir de cette condition, nous pensons qu'une forte modulation bien réglée pourrait permettre de maintenir le plasma. La difficulté réside dans le fait qu'il y a extinction subite si la fréquence de modulation ne suit pas la condition de résonance acoustique, car celle-ci dépend de la température (la vitesse du son croît avec la température, voir doc [12] §11.3). En conséquence, l'exploration de cette voie est quasi impossible sans asservissement de la fréquence de modulation avec, en permanence, recherche automatique de la fréquence de résonance.

b) Commande de modulation en signal carré (impulsions)

Par la modulation du magnétron, on induit une onde stationnaire acoustique dans le bulbe afin de sustenter le plasma (ventre de pression au centre et nœud contre la paroi). Nous avons observé cet effet visuellement à maintes reprises, de manière plus nette sur les bulbes remplis au soufre (voir par exemple [4] §8.2). Pour satisfaire la condition de résonance, la fréquence de modulation est adaptée à la taille du bulbe et aussi à la température du plasma puisque ce deuxième paramètre conditionne la vitesse du son ou, plus rigoureusement, la vitesse acoustique ionique [13]. L'effet résultant escompté, la sustentation acoustique, est l'élévation périodique de la température au cœur du plasma. La mesure montre que le rendement thermodynamique du plasma est largement accru par la modulation — elle a dépassé 60% [12] — et que cela correspond à des situations où l'on a pu observer de fortes vibrations du flux lumineux à la fréquence de modulation ou des harmoniques (voir [4] §8.6). Si on arrive à maintenir la vibration à la fondamentale, on pourrait faire en sorte que l'onde perde la majeure partie de son énergie avant d'atteindre la paroi, ce qui permettrait d'accroître encore la densité de puissance injectée sans faire fondre le bulbe. Déjà avec le premier modulateur, nous avons pu monter à des densités de puissance importantes (91 W/cc dans un bulbe de 5,4 cc, voir [4] §6). Mais nous étions restreints à la modulation sinusoïdale. Or la vibration du plasma devrait être plus sélective (mode fondamental uniquement) si l'énergie n'est délivrée que par de brèves impulsions en relation de phase avec la montée de la pression au centre du bulbe. Jusqu'à présent, nous avons testé trois types de signaux en entrée du modulateur (cf. Figure 5, entrée « modulateur »):

- Signal carré avec un rapport cyclique de 20% (partie positive). L'exemple donné Figure 7 montre que le signal est déformé et que la déformation évolue avec la puissance consommée par le magnétron, signe qu'elle provient, en partie au moins, d'une rétroaction du plasma.
- Signal sinusoïdal.
- Somme de deux sinus (exemple donné en Figure 12, page 23).

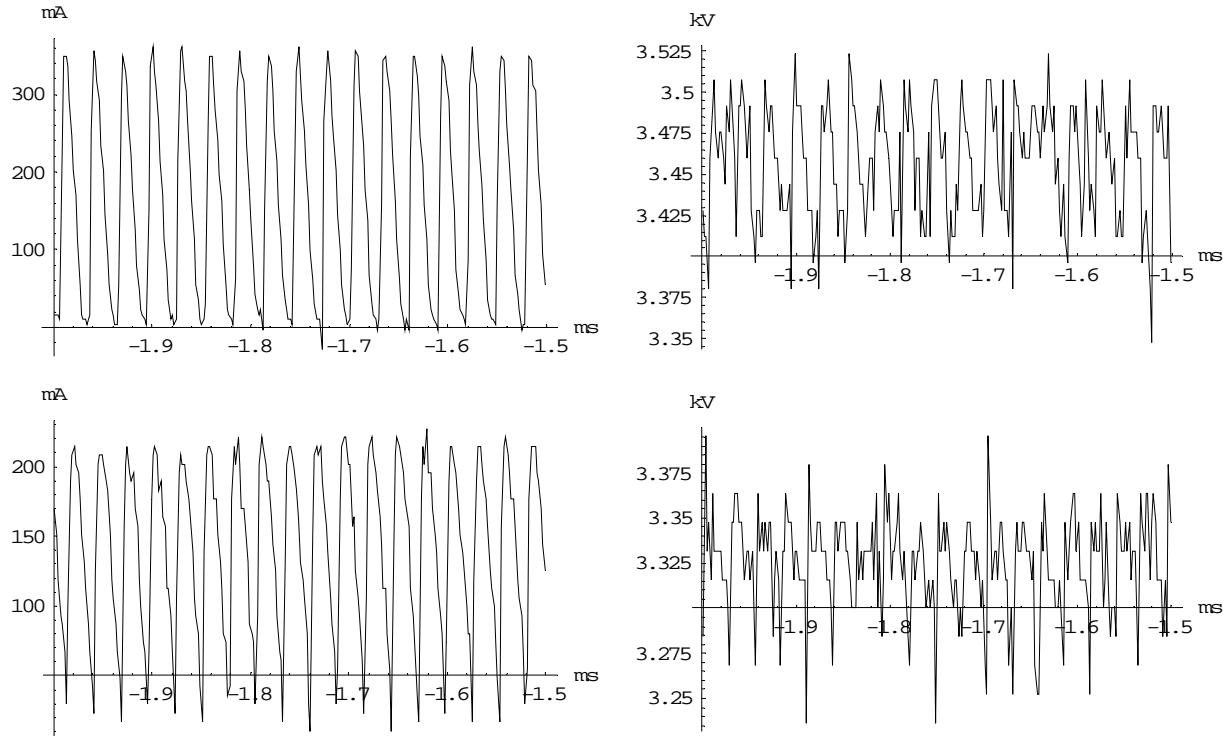


Figure 7 Bulbe asphérique de 8,3 cc remplis au soufre à 1,3 mg/cc. Courant anodique mesuré avec le LEM (à gauche), tension cathodique (à droite). Modulation en signal carré à 34,7 kHz ; En haut : produit moyen= 578 W ; En bas : produit moyen= 504 W.

Les deux premiers types de signaux de modulation (carré et sinus) ont été comparés sur un bulbe asphérique de 8,3 cc rempli au soufre à 1,3 mg/cc [14]. La forme de ce bulbe asphérique a été conçue en espérant que l'onde acoustique frappe le bulbe en même temps sur toute la paroi. Elle tient compte donc de l'anisotropie acoustique du plasma, qui découle de la dérive E^B [13]. Mais ce but n'est apparemment pas encore bien atteint (voir Figure 8).

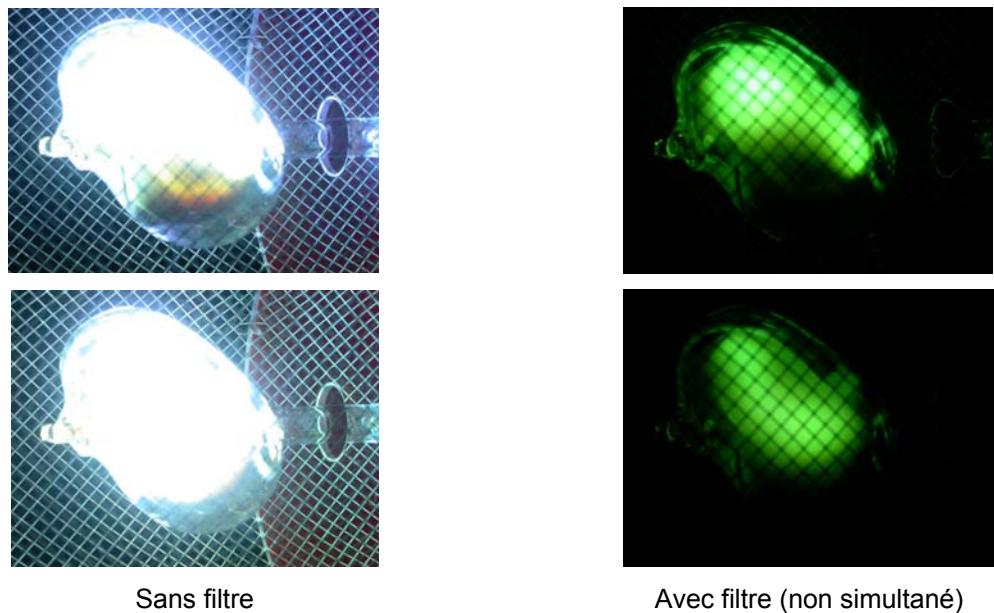


Figure 8 Bulbe asphérique de 8,3 cc (soufre à 1,3 mg/cc). En haut : modulation OFF, consommation du magnétron : 425W ; Tmax sur le bulbe ~880°C. En bas : modulation ON, en carré à 34,3 kHz, consommation du magnétron : 445W ; Tmax sur le bulbe ~910°C

Avec ce bulbe, la meilleure performance a été de 62 lm/W (spectre vert supérieur de la Figure 10). Elle a été obtenue à 578 W (puissance consommée par le magnétron, voir Figure 9), modulation en marche (cas ON) en signal carré à 34,7 kHz. Dans cette situation, le rayonnement est blanc ($x=0,24$; $y=0,28$, voir Annexe) et la température de couleur est de 15'700 K. L'indice CIE de rendu des couleurs est de 87. L'émission non thermique est de 178W, soit 31% de toute la puissance consommée par le magnétron. Puisque le rendement du magnétron est d'environ 71%, on admet que le rendement thermodynamique du plasma est de 43%.

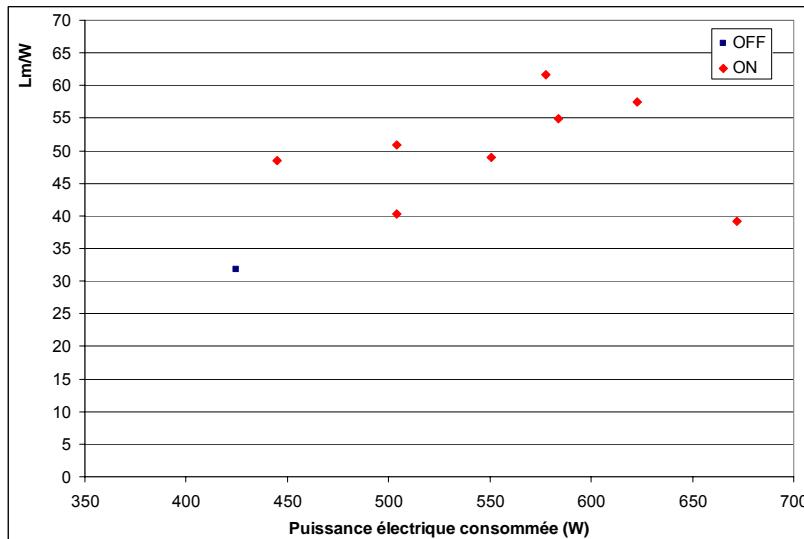


Figure 9 Efficacité lumineuse par rapport à la puissance consommée par le magnétron. Bulbe asphérique de 8,3 cc remplis au soufre à 1,3 mg/cc.

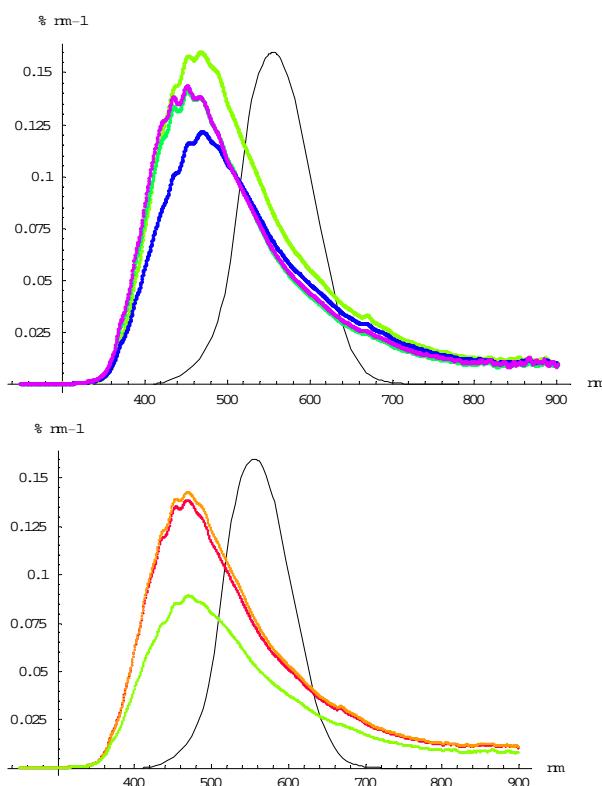


Figure 10 La puissance consommée se situe entre 445 et 623 W. En haut : modulation en signaux carrés ; en bas : modulation en sinus.

La Figure 11 permet de comparer les effets des deux types de signaux dans les mêmes conditions opératoires. Le meilleur spectre est celui obtenu en signal carré.

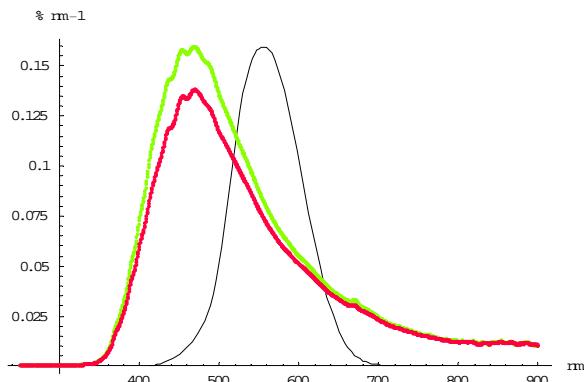


Figure 11 Comparaison entre excitation sinusoïdale et carrée à 580 W ; en vert : carré (34,7 kHz) ; en rouge : sinusoïdale (34,3 kHz)

En conclusion :

Il est préférable de moduler le magnétron en signal carré plutôt qu'en sinus ; les effets de la modulation s'en trouvent renforcés. Jusqu'à présent, nous n'avons pas pu vraiment explorer l'effet d'une modulation par impulsions (réduction supplémentaire du rapport cyclique) car le signal s'en trouve trop déformé, malgré que le Lightron comporte des selfs de choc plus faibles que celles des magnétrons standards. Pour aller plus loin dans ce sens, deux voies exploratoires sont possibles :

- Adopter un magnétron conçu pour produire des trains d'ondes, ce qui est pratiqué dans le domaine des radars par exemple. Ces appareils sont toutefois plus onéreux que les magnétrons de four de cuisine.
 - Ajouter une régulation en boucle fermée à notre alimentation pour augmenter la bande passante de la modulation. Nous avons entamée cette voie en déterminant un premier modèle dynamique du système placé en aval du modulateur (cf. §12.7, page 50). La détermination de la fonction de transfert est cependant délicate car le système est non linéaire et dépendant de nombreux paramètres (énergie stockée dans le bulbe, masse volumique et degré d'ionisation du plasma, puissance injectée, taux d'onde stationnaire dans le guide micro-onde, configuration du modulateur, ...).
- c) Signal de commande de modulation en somme de deux sinus. Dans cette approche, notre critère d'optimisation est fondé sur les deux effets suivants obtenus en modulant le magnétron :
- La sustentation acoustique du plasma par résonance acoustique (ventre de pression au centre du bulbe et nœud au bord). Pour obtenir ce phénomène, la fréquence de modulation est adaptée à la taille du bulbe et à la température du plasma. L'effet visé est d'élever la température au cœur du plasma et par voie de conséquence d'augmenter son rendement thermodynamique.
 - La recherche d'une fréquence où l'absorption acoustique est maximale. A cette condition, un volume élémentaire de plasma se trouve dans un état d'énergie qui oscille en opposition de phase avec l'énergie qu'il aurait s'il était à l'équilibre thermodynamique local, c'est-à-dire si la fréquence de la modulation était beaucoup plus basse. L'excitation vibrationnelle des molécules diatomiques est alors optimale. D'après notre prévision théorique (voir [12] §3), ceci accroît le flux de molécules subissant le cycle dissociation et recombinaison, et par conséquent, ceci augmente le rendement thermodynamique.

On note que les deux effets sont antinomiques puisque l'absorption acoustique réduit le facteur de qualité de résonance acoustique. C'est pourquoi nous injectons deux ondes sinusoïdales de fréquences différentes (un exemple est donné Figure 12) :

- Pour régler la première, qui est destinée à engendrer l'onde stationnaire dans bulbe, nous observons le plasma avec un filtre afin de déterminer s'il est plus brillant au centre. Cette fréquence se situe entre 20 et 80 kHz.

- La seconde est réglée en scrutant le domaine spectral offert par le nouveau modulateur, jusqu'à plusieurs MHz. Nous cherchons une fréquence qui donne la meilleure performance.

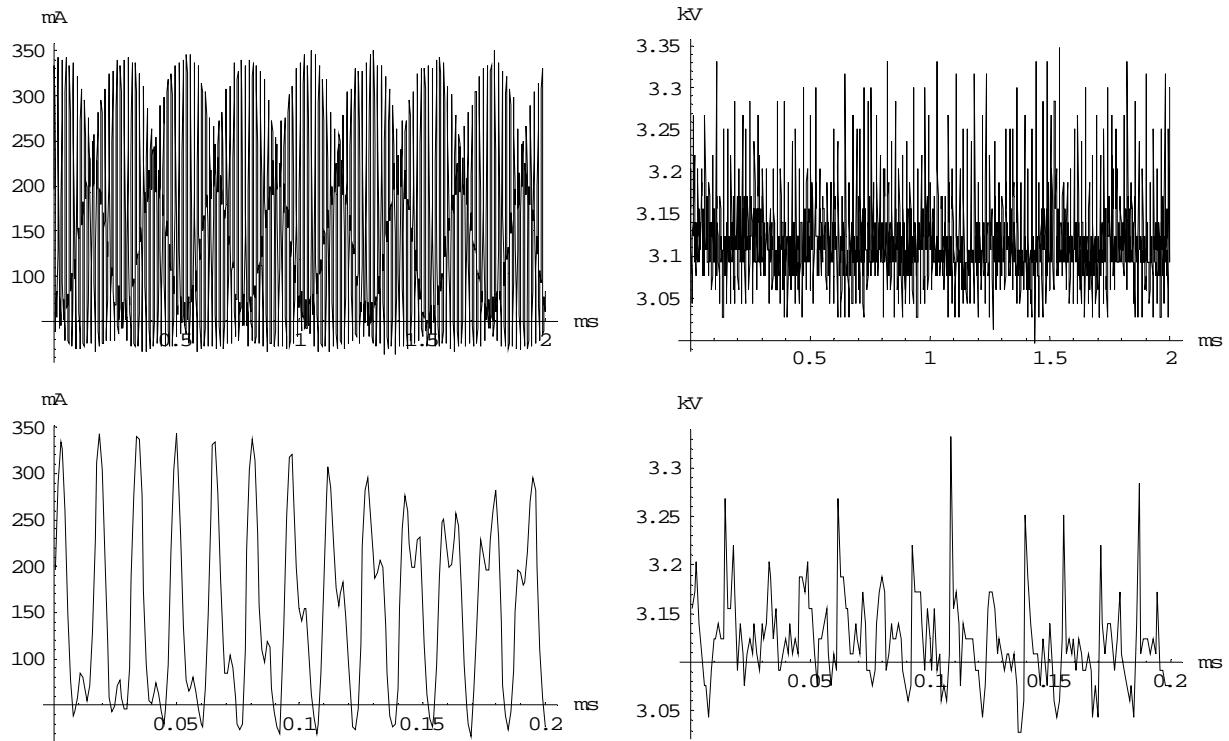


Figure 12 Bulbe de 8,1 cc, sélénium à 1,1 mg/cc. Courant anodique mesuré avec le LEM (à gauche), tension cathodique (à droite). Modulation à 63 kHz et 130 kHz, produit moyen= 447 W, Tmax sur le bulbe ~877°C

Pour la série des bulbes de 8 cc remplis au tellure, le nouveau modulateur nous a permis de scruter le domaine acoustique jusqu'à 2,8 MHz. Nous n'avons malheureusement pas trouvé de 2ème fréquence de modulation où la lampe aurait une efficacité supérieure (cf. §12.4, page 47).

Pour la série des bulbes de 8 cc remplis au sélénium, le nouveau modulateur nous a permis de scruter le domaine acoustique jusqu'à 8 MHz (cf. §12.5, page 48). Nous n'avons pas non plus rencontré de pic de rendement thermodynamique, ou d'efficacité lumineuse, ce que nous espérions trouver à une fréquence où l'absorption acoustique passerait par un maximum. Donc là encore le critère d'optimisation basé sur la recherche d'une telle fréquence s'avère infructueux.

Pour ce qui est du soufre, nous avons testé à haute fréquence qu'un seul bulbe de 8 cc. Il est rempli à 1,3 mg/cc. La meilleure performance obtenue s'avère modeste (40 lm/W, voir Figure 13) du fait que nous n'avons pas trouvé de réglage de la modulation donnant un décalage spectral suffisant pour bien ramener l'émission dans le visible : la lumière est restée trop bleutée. Pour la deuxième fréquence de modulation, nous avons pu scruter jusqu'à 1,6 MHz ; mais aucune augmentation significative de l'efficacité n'a été rencontrée. De plus, on constate que le bulbe asphérique donne une performance 50% supérieure (60 lm/W en modulation sinusoïdale, spectre rouge Figure 11), alors que son volume et sa teneur sont identique. Cela conforte nos espoirs : la mise en forme du bulbe a permis d'augmenter sensiblement le facteur de qualité de la résonance acoustique.

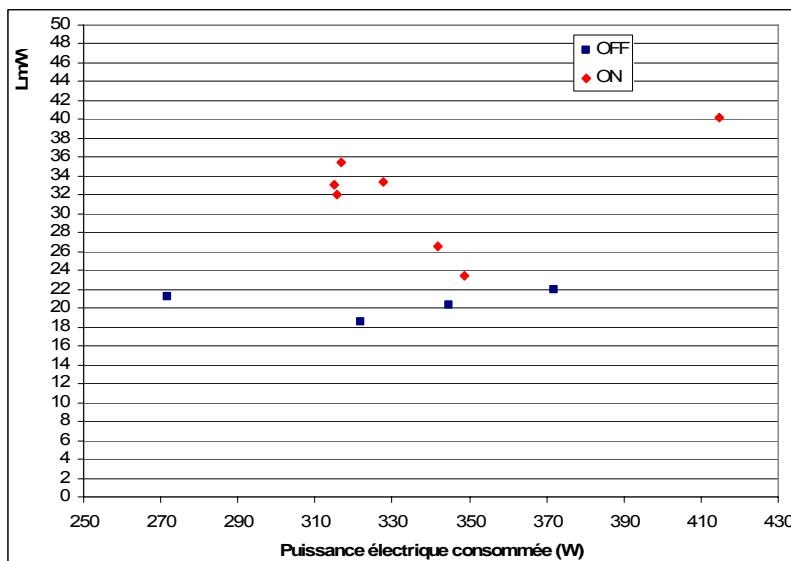


Figure 13 Efficacité lumineuse par rapport à la puissance consommée par le Lightron. Bulbe sphérique de 8 cc rempli au soufre 1,3 mg/cc.

En conclusion :

- Le critère d'optimisation de la fréquence de modulation bâtit sur la recherche d'un maximum d'absorption acoustique m'a donné aucun résultat probant quelque soit la substance active, tellure, sélénium ou soufre. Peut-être cela s'expliquerait en supposant que la fréquence recherchée est proche de la 1^{ère} fréquence de modulation, celle qui fait résonner le bulbe, et qu'alors les battements obtenus perturberaient le plasma et brideraient ses performances.
- L'émission se décale légèrement vers les longueurs d'onde plus courtes lorsque l'on réduit la taille du bulbe.
- La mise en forme du bulbe dans le sens d'une adaptation à l'anisotropie acoustique du plasma permet d'augmenter nettement sa performance lumineuse.

5 Explorer l'adition de la modulation et de la rotation du bulbe

Nous avons construit un système permettant de faire tourner le bulbe sur notre banc équipé du modulateur. Il est toutefois difficile de construire un système de fixation tournant qui assure une juxtaposition très précise de l'axe de la tige sur l'axe de rotation du moteur. L'expérience montre que le plasma est très sensible au mal rond : il se déstabilise. Jusqu'à présent, cela a été rédhibitoire pour nos mesures. Nous comptions ajuster l'alignement en rectifiant la tige du bulbe au chalumeau tout en faisant tourner le bulbe.

Une recherche bibliographique récente nous a conduits toutefois à reconsidérer notre programme d'essai. Johnston et al. ont déterminé, par la mesure et le calcul, le temps d'extinction du plasma de soufre dans un bulbe maintenu en rotation, pour des conditions qui correspondent à celles de la lampe Solar-1000 [15]. Ils obtiennent un temps d'extinction quelque peu dépendant de la fréquence du rayonnement; sur l'ensemble du spectre, cela varie entre 11 et 26 ms. Or, pour que le plasma puisse vibrer dans la gamme 20 - 70 kHz, il faut que son temps de relaxation soit inférieur à 0,09 ms. Comment alors expliquer nos mesures ? La seule différence importante entre leurs conditions de mesure et les nôtres est que nos bulbes sont statiques alors que le leur est tournant. Au début du projet, nous avons montré que la rotation du bulbe entraîne un mouvement de convection [16] ; Or ce brassage devrait accélérer le refroidissement du plasma, et non pas le ralentir comme le suggère la comparaison de nos résultats avec ceux de Johnston et al. Cela ne remet pas en question nos résultats car ils ont été obtenus par des moyens d'investigation différents par nature. Et pour chacune des preuves de la vibration du plasma que nous avons obtenues — elles sont listées ci-dessous — nous avons proposé une explication issue de la mécanique ou de la physique moléculaire :

- Le plasma de soufre se centre et pratiquement tout le volume du bulbe devient luminescent (sustentation acoustique [12]).
- Le rendement thermodynamique du plasma augmente de manière importante (excitation vibrationnelle des molécules diatomiques -> augmentation du flux des molécules qui subissent le cycle dissociation – recombinaison [12]).
- L'émission optique se décale vers les grandes longueurs d'onde (occupation des états vibrationnels élevés + principe de Frank-Condon [17]).
- La vibration du plasma en phase avec la modulation, de manière bien-sûr imperceptible à l'œil et à l'oreille car trop rapide (résonance acoustique ultrasonore [4]).
- Le couplage électromagnétique est renforcé (non linéarité due à ce que la modulation augmente le degré d'ionisation du plasma [4]).

Pourtant la publication de Johnstone et al. indique que, dans le cas du bulbe tournant, le plasma de soufre ne peut être le siège d'ultrasons. L'explication pourrait résider dans le fait notre plasma est faiblement ionisé. Hormis le gaz rare, il est en fait essentiellement constitué de molécules diatomiques et de radicaux monoatomiques [17]. Le temps de relaxation moléculaire est une fonction décroissante de la température, car pour que l'état vibratoire d'une molécule polyatomique s'aligne sur celles de son voisinage, il faut en fait qu'elle subisse un certain nombre de chocs avec ses voisines. Le délai nécessaire pour atteindre ce nombre de chocs diminue donc avec la température. Comme nos mesures procèdent par perturbation, la température varie peu, mais ce n'est évidemment pas le cas dans les mesures de Johnstone et al., qui procède par extinction. Ceci expliquerait pourquoi ils obtiennent un temps de relaxation plus important. Mais dans le doute, leurs résultats prétériront quelque peu nos chances d'améliorer les performances en cumulant modulation et rotation du bulbe. En conséquence, nous décidons de passer ces essais en seconde priorité.

6 Le montage bulbe-antenne

Le système antenne est monté sur le guide onde, dans un ventre du champ électrique. L'antenne est constituée d'un tube en alliage cuivreux de 4 mm de diamètre, traversant le guide d'onde et mis en contact avec la face arrière (mise à la masse). Elle émerge d'une longueur proche de $\lambda_g/4$ (voir Figure 14, à gauche). Afin d'éviter le rayonnement, nous avons gardé la grille de la lampe originale qui sert maintenant uniquement de cage de Faraday (voir Figure 14, à droite).

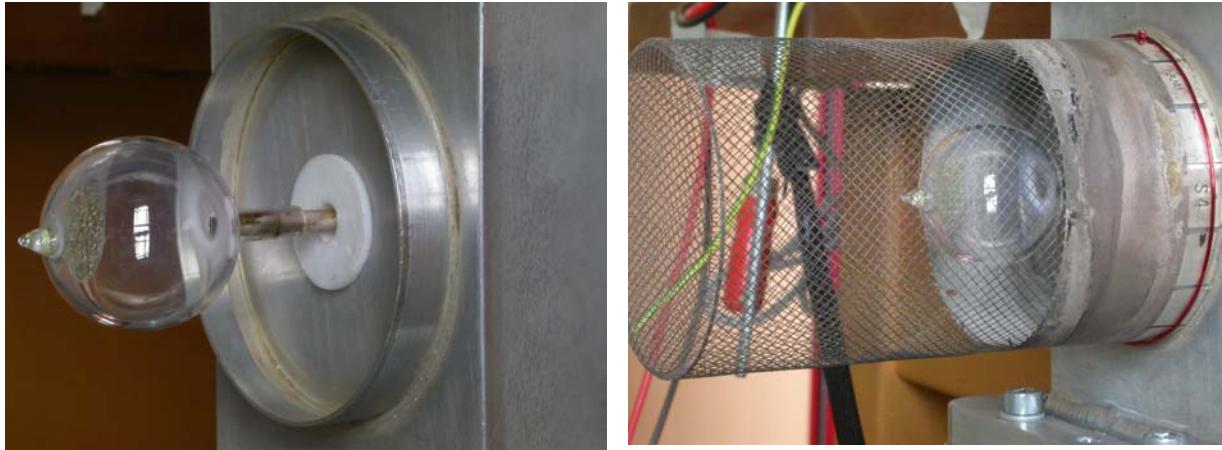


Figure 14 Montage du « bulbe antenne »

Afin de montrer que la grille ne sert plus de cavité résonante, nous y avons introduit des éléments métalliques, des vises par exemple, pour perturber le champ électromagnétique intérieur. La cavité cylindrique a été dimensionnée pour résonner à 2,45 GHz dans son mode dominant (TE_{111}) [18] ; ainsi nous sommes sûrs qu'avec ces éléments métalliques, la cavité ne possède plus la géométrie permettant de la faire résonner. Et malgré cela, nous avons pu initier la décharge (voir la Figure 15). Cette dernière ne garde que sa fonction de cage de Faraday, ce qui libère son design. On peut ainsi la ramené à une enveloppe conductrice transparente, une grille ou un dépôt céramique fermant une optique à réflecteur par exemple. La grille est un cylindre de 7,5 cm de diamètre, dans la version cavité résonante, alors qu'un bulbe compact peut faire 2,5 cm de diamètre (version 5,4 cc [11]). En admettant que le réflecteur passe à 5 mm du bulbe, l'optique est réduite dans un rapport d'échelle de 0,47. Nous divisons ainsi son volume par huit. Notre système de mesure photométrique actuel ne convient plus si la lampe est munie d'une optique car alors l'hypothèse d'isotropie de la source n'est plus acceptable (voir [4] §3). C'est pourquoi notre laboratoire (LAPTE / HEIG-VD) est en train de s'équiper d'une sphère d'intégration de 2 mètres de diamètre.



Figure 15 La décharge a été initiée malgré les éléments perturbateurs [19]

Le champ électrique de claquage est obtenu par l'effet de pointe de l'antenne (concentration de lignes de champ électrique à son extrémité). D'autre part, on observe sur la Figure 15 de droite que le

plasma semble jaillir de la zone de contact entre le bulbe et le bout de l'antenne ; c'est bien le signe que, comme attendu, le transfert d'énergie du guide d'onde au bulbe est effectué par l'antenne, par couplage capacitif.

Autre avantage de ce montage : nous avons pu démarrer des petits bulbes à des niveaux de puissance inférieure à 100 W (voir Figure 16).



Figure 16 Allumage à moins de 100 W des bulbe-antennes de 2,9 cc remplis à 2,3 mg au tellure (à gauche) et au sélénium (à droite). Ces bulbes ont été sablés.

Un problème surgit toutefois lorsque la pression dans le bulbe monte car alors la décharge se déplace à l'extérieur, au bout de l'antenne, exactement entre l'extrémité de l'antenne et le tube de quartz. Pour aller plus loin nous avons essayé de noyer l'antenne dans le quartz. A cette fin, nous avons contacté l'entreprise spécialisée Jelosil. Cette entreprise a une grande renommée internationale dans la conception et la fabrication des machines pour la production des ampoules en quartz. Classiquement, ces ampoules comportent des électrodes. Le passage des conducteurs électriques à travers le quartz ne doit pas créer de fuite. Selon nos instructions, Jelosil a réalisé les couplages des 4 bulbes antennes présentés à la Figure 17.



Figure 17 Les quatre prototypes dont les antennes ont été soudées par Jelosil SA (NE).

Le bulbe-antenne le plus à gauche comporte une antenne en molybdène de faible diamètre (0,5 mm). Le procédé de soudage employé est standard (écrasement du quartz à environ 1600°C); il ne laisse pratiquement aucune inclusion entre le conducteur et le quartz. Mais nos essais d'allumage restaient infructueux avec ce prototype. Nous avons vu par calcul que l'antenne était trop mince pour 2,45 GHz. Or, la technique de l'écrasement à chaud du quartz sur le fil, ne peut donner satisfaction avec un fil plus gros. C'est pourquoi pour les trois autres prototypes, la technique du coulage sous vide a été

employée à la place. Cela permet d'obtenir une mise en forme du tube de quartz afin qu'il épouse celle de l'antenne. Le retrait de l'antenne (du tungstène) au refroidissement a toutefois créé un jeu de quelques dixièmes de millimètre.

Des essais sont actuellement en cours pour combler cette espace avec un diélectrique ou un conducteur. La première technique testée consiste à presser à chaud quelques milligrammes de plastique thermoformable. Trois matériaux ont été testés : PTFE (Téflon), PE-HD et le PS. Les deux premiers ont la meilleure rigidité diélectrique (80 kV/mm). Le PTFE est réputé bon diélectrique à 2,45 GHz (perte faible). Mais il s'avère difficile de le presser à chaud car d'une part il fond à plus de 300°C, mais surtout, il ne mouille absolument pas le quartz. En chauffant dans un four, nous avons constaté qu'il forme un bouchon au fond du tube de quartz, au lieu de faire un film. Pour le PE-HD et le PS (point de fusion ~120 °C), la mise en forme a lieu sans problème. Il suffit de chauffer l'antenne au chalumeau puis de l'enfoncer dans le tube en quartz dans lequel on a préalablement placé le plastique coupé en petits morceaux. Celui-ci fond au contact de l'antenne et, lorsque l'on presse, remonte dans l'espace entre l'antenne et le tube. Une fois refroidit, le montage est solide. Mais les essais de fonctionnement montrent que la décharge se reporte toujours au bout de l'antenne, lorsque la pression monte dans le bulbe à cause de l'évaporation de la substance active. Ceci signifie que le champ électrique au bout de l'antenne dépasse alors la rigidité de ces diélectriques, c'est-à-dire 80 kV/mm. Quant à combler l'espace avec un conducteur, nous sommes aussi confronter à des problèmes de mouillage. Il semble donc nécessaire de faire une première métallisation de l'intérieur du tube par voie chimique, car en phase vapeur par exemple (CVD).

7 Optimisation de la quantité de substance active dans le bulbe (tellure et sélénium)

Pendant l'année 2006, nous avons déterminé que, si le soufre est la substance active, la teneur optimale se situe entre 1,3 et 1,4 mg/cc pour des bulbes d'environ 12 cc [6]. Pendant l'année 2007, nous avons fait des campagnes d'essai d'optimisation de la teneur pour le sélénium ainsi que pour le tellure, mais cette fois avec des bulbes de 8 cc, le but étant de réduire la puissance nominale de la lampe. Le sélénium et le tellure sont les deux éléments qui suivent le soufre dans la colonne du tableau périodique des éléments de Mendeleiev. Il n'est donc pas surprenant que leurs vapeurs soient aussi luminescentes à haute température [4]. Le processus de luminescence est certainement identique à celui du soufre : c'est la relaxation photonique de molécules diatomiques ; celles-ci se trouvent dans un état électronique excité lorsqu'elles se recombinent. Donc comme pour le soufre, le rendement thermodynamique du plasma augmente avec le débit du cycle dissociation-recombinaison [20].

Contrairement au soufre et au tellure, le sélénium est classé toxique. C'est donc par curiosité que nous testons cet élément. L'énergie de dissociation d'une diamolécule homogène diminue avec le numéro atomique (S2: 88 kcal./mol, Se2: 59 kcal./mol, Te2: 44 kcal./mol), d'où l'intérêt d'essayer ces autres substances (plasma moins chaud et donc moins agressif pour le bulbe). En contre partie l'énergie d'évaporation est plus importante, surtout pour le tellure [voir 4, §11.2]. Nous comparons l'efficacité lumineuse entre les deux situations « ON » et « OFF » (avec et sans modulation) sans changer la puissance consommée, dans la mesure du possible.

- a) Optimisation de la teneur pour le tellure.

Tableau 1 Performances (valeurs typiques) en situations ON et OFF (avec et sans modulation)

Teneur en tellure	$mg \cdot cm^{-3}$		6,0	2,9	0,9	0,8	0,5
	$mol_2 \cdot m^{-3}$ ⁶		23,5	11,6	3,7	3,3	2,0
	$10^{-6} mol_2$ ⁶		188	93	63	25	16
Diamètre ext.	mm		28	28,5	35	28	28
Volume int.	cm^3		8	8	17	8	8,1
Epaisseur	mm		1,7	1,7	1,5	1,7	1,7
Miroir présent ?			oui	Oui	Oui	oui	Oui
Modulation	F1	kHz	20	49,9	47	19	40
		dBm	-11,7	-1		-2	-2
	F2	kHz	600	2270		320	130
		$mVpp$	5	1300		2000	1000
Régime stable ?		OFF	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
		ON	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Puissance consommée ramenée au	$W \cdot cm^{-3}$	OFF	97	98	36	106	52
		ON	92	91	36	67	60

⁶ En supposant qu'il n'y ait pas de dissociation

volume du bulbe							
Puissance absorbée par molécule diatomique	$0,7 \cdot 10^6 W \cdot mol_2^{-1} (6)$	OFF	4,1	8,5	9,8	33,9	26,5
		ON	3,9	7,8	9,8	21,4	30,4
Efficacité lumineuse	$lm \cdot W^{-1}$	OFF	14	16	24	15	0,5
		ON	14	19	68	14	3,6
Longueur d'onde du maximum	nm	OFF	540	560	520	530	480
		ON	550	620	575	540	520
Décalage spectral	nm		10	60	55	10	40
Rendement thermodynamique du plasma	$\%$	OFF	7	8	15	7	0,3
		ON	7	11	47	7	2,3
Température du bulbe	$^{\circ}C$	OFF	919	943	820	1082	887
		ON	900	890	810	1090	880
Température de couleur	K	OFF	4'600	4'100	Pas de mesure	4'700	10'700
		ON	4'400	3'000	Pas de mesure	4'400	6'600
Coordonnées chroma. (x, y) voir Annexe	$\times 100$	OFF	(37 ;44)	(39 ;45)	(35 ;42)	(37 ;44)	(26 ;32)
	$\times 100$	ON	(38 ;45)	(47 ;47)	(42 ;46)	(38 ;45)	(30 ;39)
Indice CIE de rendu de couleur		OFF	77	77	80	77	81
		ON	77	76	75	76	78
Résistance thermomécanique		OFF	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.	léger creux à 1100°C	r.a.s.
		ON	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.

Avec les deux bulbes les plus remplis (6,0 et 2,9 mg/cc), il faut monter très haut en température pour évaporer tout le tellure. Pour le remplissage à 6,0 mg/cc, nous pensions que l'évaporation était complète une fois le bulbe à 850°C. Mais puisque cette température n'était pas suffisante dans le cas du remplissage à 2,9 mg/cc (la température a atteint 955°C à la puissance consommée par le magnétron de 863W), c'est que du tellure était resté condensé à notre insu, probablement dans le téton de remplissage du bulbe. Il en va tout autrement avec le bulbe peu rempli (0,5 mg/cc) : l'évaporation complète est obtenue lorsque la température du bulbe atteint 900°C.

Par ailleurs pour l'ensemble des bulbes essayés, le plasma occupe tout le volume à disposition en modulation OFF (voir Figure 24, page 44). La forme du plasma n'est pas marquée par la gravitation, contrairement au cas du soufre (voir Figure 27, page 45). C'est le signe que, pour le soufre, l'absorption électromagnétique à 2,45 GHz est une fonction croissante de la température, au moins dans la majorité de la plage de température où se trouve le plasma. C'est cette caractéristique qui entraîne le risque d'avalanche thermique et par conséquence la rupture du bulbe (formation de bulle de surchauffe). Donc d'après la morphologie de son plasma, nous pouvons dire du tellure qu'il n'offre pas de domaine de température où l'absorption électromagnétique est fortement croissante. Ceci corrobore les mesures du taux d'onde stationnaire dans le guide micro-onde : contrairement au cas du soufre, la modulation ne change pratiquement pas le couplage électromagnétique dans le cas du tellure. Ceci signifie que le tellure répond de manière quasi linéaire, donc que son absorption

électromagnétique varie peu avec la température. Sans rétroaction positive, il ne peut y avoir d'avalanche thermique. Par conséquent, le risque de rupture d'un bulbe rempli au tellure est faible, voire inexistant. Dans nos essais, aucun n'a subit de déformation, mise à part un léger affaissement pour le bulbe à 0,8 mg/cc. La sustentation du plasma de tellure s'avère donc non indispensable. En contre partie, l'efficacité lumineuse est nettement moins élevée. Ceci est certainement lié au fait que sans rétroaction positive, le plasma ne concentre pas autant la chaleur dégagée par absorption électromagnétique. Ainsi la température au cœur du plasma ne monte pas autant qu'avec le soufre, et en conséquence, le débit du cycle dissociation-recombinaison est moins important et donc le flux optique reste plus modeste.

La modulation à basse fréquence (entre 15 et 80 kHz) décale le spectre vers les grandes longueurs d'onde. La teneur influence nettement le spectre ainsi que le décalage spectral qu'induit la modulation. Ce dernier a été important à 2,9 et 0,9 mg/cc, mais faible à 0,5 mg/cc (voir Tableau 1). Le décalage est plus fort à certaines fréquences, pour lesquelles le plasma prend des formes particulières, signe de résonances acoustiques, en restant parfois stable pendant environ une seconde. Ceci a été plus flagrant pour la teneur de 6,0 mg/cc. A la Figure 18 de droite, par exemple, on observe que le plasma est plus chaud au centre ; c'est ce que nous cherchons. Mais parfois, comme par exemple à la Figure 18 de gauche, le mode excité est une onde de surface. Aucun régime de résonance réellement stable n'a pu être établi pour les deux bulbes les plus chargés (6,0 et 2,9 mg/cc). En fait, plus la teneur est élevée, plus il est difficile de stabiliser le plasma en résonance acoustique, ce qui est logique puisque l'inertie de la vibration augmente avec la densité du milieu.



Figure 18 Plasma de tellure, bulbe 8 cc, teneur 6 mg/cc. ~770W, 850°C. A gauche : 40 kHz. A droite : ~15 kHz. Photos prises avec filtre.

La teneur joue un rôle capital pour le rendement du plasma et l'efficacité lumineuse. Avec le bulbe le plus rempli (6,0 mg/cc), la modulation n'a pas apporté d'amélioration sensible du rendement thermodynamique du plasma. Il en est allé de même pour le bulbe le moins rempli (0,5 et 0,8 mg/cc, voir Tableau 1). Pour le bulbe à 0,8 mg/cc, l'enclenchement de la modulation a pour effet d'augmenter la luminosité pendant 30 à 60 secondes, puis le flux lumineux retombe à un niveau 7 à 8 fois inférieur. Ce comportement n'a été observé avec aucun autre bulbe.

En outre, on remarque que le spectre à la teneur 2,9 mg/cc et sans modulation est extrêmement bien ajusté à la sensibilité de la vision photopique (voir Figure 19). Mais la performance reste modeste (16 lm/W) car le rendement thermodynamique est insuffisant (8%). Ceci provient du fait que le transfert thermique dans le plasma de tellure est trop fort. Lorsque l'on enclenche la modulation, en réglant la fréquence, on trouve à 50 kHz une légère amélioration du rendement thermodynamique, il passe à 11%. Cependant le décalage du spectre vers les grandes longueurs d'onde limite le gain d'efficacité lumineuse (19 lm/W, voir Tableau 1). Il faut donc réduire la teneur.

A 0,9 mg/cc, mais pour un bulbe plus gros (17 cc), des performances intéressantes sont au rendez-vous : la modulation à 47 kHz a permis de monter le rendement du plasma à 47%. La meilleure efficacité lumineuse a été de 68 lm/W avec modulation (voir Tableau 1). La puissance consommée par le magnétron était de 600 W. Mais aucune performance comparable à celle-ci n'a pu être obtenue avec un bulle de 8 cc. Réduire la taille du bulbe entraîne une baisse considérable de la performance avec le tellure, alors que cela n'avait pas été le cas avec le soufre [4]. Il semble donc que le coefficient de transfert thermique de ce plasma soit plus élevé que celui du soufre.

Finalement on note que, pour contrecarrer le fait que le transfert thermique dans le plasma de tellure est trop fort, il faudrait augmenter la taille du bulbe. Et, nous l'avons vu plus haut, le tellure a

l'avantage de ne pas engendrer de risque de rupture du bulbe. En conséquence, cette substance devrait être un bon candidat pour une lampe de forte puissance ($> 2 \text{ kW}$) à bulbe statique (25 cc ?).

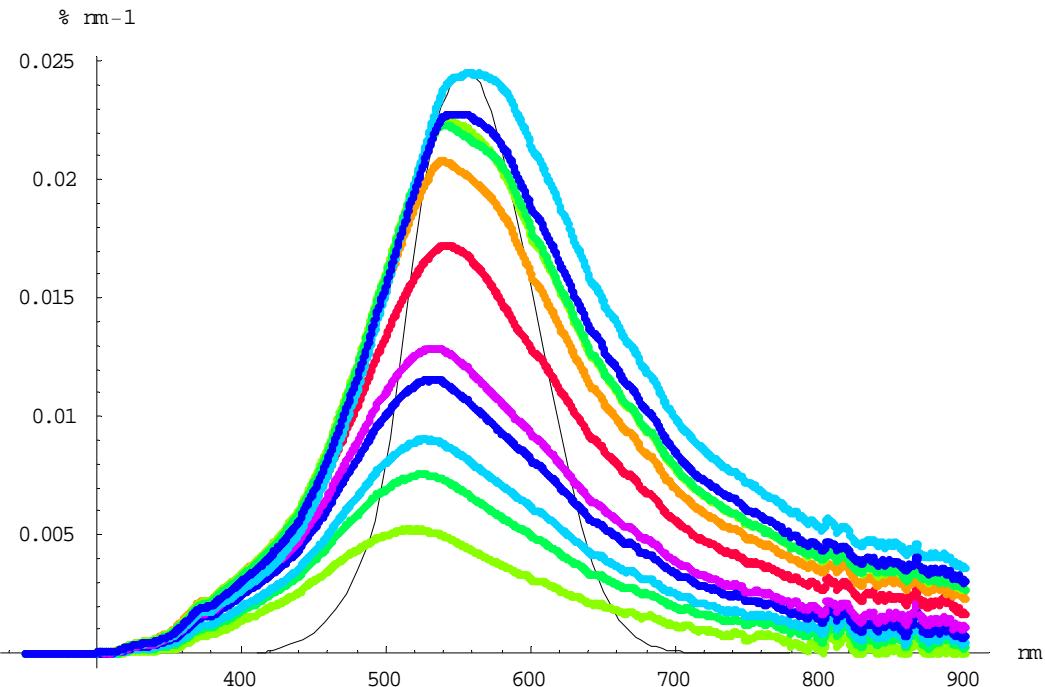


Figure 19 Rapport de la densité spectrale du rayonnement sur la puissance consommée par le magnétron (chauffage de cathode comprise). La puissance consommée va de 380W à 863W. Le trait fin indique la courbe de sensibilité de l'œil en vision photopique. Bulbe 8 cc ; 2,9 mg/cc

b) Optimisation de la teneur pour le sélénium.

Tableau 2 Performances (valeurs typiques) en situations ON et OFF (avec et sans modulation)

Teneur en sélénum	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$		3,0	1,8	1,1	0,6
	$\text{mol}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ ⁷		19,0	11,1	7,0	3,8
	10^{-6} mol_2 ⁷		152	189	56	31
Diamètre ext.	mm		28	35	28	28
Volume int.	cm^3		8,0	17	8,1	8,1
Epaisseur	mm		1,7	1,5	1,8	1,8
Miroir présent ?			Oui	Oui	Oui	Oui
Modulation	F1	kHz	67,1 et 68	59	67,3	70
		dBm	1 et -1		-10	-2
	F2	kHz	205 et 2191	0	8045	2240
		mVpp	1000 et 1300		900	1000

⁷ En supposant qu'il n'y ait pas de dissociation

Régime stable ?		OFF	Non	Quasi	Non	Non
		ON	Non	Non	Non	Non
Puissance consommée ramenée au volume du bulbe	$W \cdot cm^{-3}$	OFF	64	24	83	64
		ON	75	48	74	66
Puissance absorbée par molécule diatomique	$0,7 \cdot 10^6$ $W \cdot mol_2^{-1} (7)$	OFF	3,4	2,2	11,9	16,8
		ON	3,9	4,3	10,6	17,4
Efficacité lumineuse	$lm \cdot W^{-1}$	OFF	36	11	45	30
		ON	42	52	46	29
Longueur d'onde du maximum	nm	OFF	540	450	516	492
		ON	610	560	525	495
Décalage spectral	nm		70	110	9	3
Rendement thermodynamique du plasma	$\%$	OFF	22	8	21	16
		ON	28	30	23	16
Température du bulbe	$^{\circ}C$	OFF	910	680	1051	919
		ON	903	700	963	888
Température de couleur	K	OFF	4'400	22'000	6'100	8'700
		ON	3'300	4'000	6'000	7'800
Coordonnées chroma. (x, y), voir Annexe	$\times 100$	OFF	(38,44)	(23,26)	(31,41)	(27,35)
	$\times 100$	ON	(45,47)	(39,45)	(32,42)	(28,38)
Indice CIE de rendu de couleur		OFF	81	82	75	76
		ON	79	81	74	74
Résistance thermomécanique		OFF	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.
		ON	1 légère boursouflure Point à 1038°C	r.a.s.	r.a.s.	r.a.s.

Nous avons testé trois bulbes de 8 cc remplis au sélénium avec des teneurs allant de 0,6 à 3,0 mg/cc. L'évaporation complète de cette substance n'a jamais posé problème [21].

Modulation OFF, le plasma de sélénium n'occupe pas le bulbe complètement, contrairement au plasma de tellure (voir Figure 25, page 45). Mais sa forme n'est pas aussi marquée par la gravitation que celle du plasma de soufre (voir Figure 27, page 45). Avec le sélénium, la modulation a permis d'améliorer le couplage électromagnétique : le taux d'onde stationnaire (TOS) était systématiquement plus bas en modulation ON que OFF, à puissance égale. Cette constatation est plus nette à faible teneur (0,6 mg/cc) : moins il y a de matière, plus le TOS est élevé ; mais nous avons pu par la modulation le maintenir en-dessous de 3 jusqu'à 500 W. Car en effet le couplage a une tendance à se dégrader avec la puissance absorbée dans le cas du sélénium et du tellure alors que cette tendance n'avait pas été observée avec le soufre. Par ailleurs, on constate que le couplage est moins bon avec le sélénium qu'avec le soufre [22], mais meilleur qu'avec le tellure [23]. L'ensemble de ces phénomènes semblent montrer que le sélénium répond de manière plus linéaire que le soufre, mais

moins que le tellure : son absorption électromagnétique varie peu avec la température. Donc avec le sélénium, le risque d'avalanche thermique est moindre qu'avec le soufre mais supérieur qu'avec le tellure. Et en effet, le bulbe a une meilleure tenue en température qu'avec le soufre. Cependant à la teneur la plus élevée que nous ayons testée (3 mg/cc), lors d'un essai en modulation, le plasma a commencé à déformer le bulbe (point à 1038°C). C'est avec le soufre que la concentration de l'énergie est la plus forte (voir §12.2, page 44). Ceci résulte du fait que l'absorption électromagnétique du soufre augmente plus fortement avec la température. Mais pour que la proximité de la paroi de quartz ne limite alors pas le chauffage du plasma, il faut garder le coefficient de transfert thermique assez bas, autrement dit il faut rester à une teneur faible (pour le soufre avec modulation : 1,4 mg/cc [8]). Ainsi on peut préconiser une teneur maximale à ne pas dépasser au vu de la résistance thermomécanique du bulbe (1120 °C) :

Tableau 3 teneur maximale préconisée pour un bulbe de 8cc

	Tellure	Sélénium	Soufre
teneur maximale mg / cc	6	3	1,4 avec modulation < 1,2 sans modulation

La modulation à basse fréquence (entre 20 et 80 kHz) décale le spectre vers les grandes longueurs d'onde. Le décalage est nettement moindre aux faibles teneurs. Pour la teneur forte (3 mg/cc), la modulation a un effet très fort sur la forme et la couleur du plasma à certaines fréquences. Ces observations laissent penser que des résonances acoustiques ont lieu dans ces conditions. Mais aucun régime réellement stable n'a pu être établi, même en modulation OFF.

La teneur influence le rendement thermodynamique du plasma et l'efficacité lumineuse. Contrairement aux bulbes 8 cc à faible remplissage (1,1 et 0,6 mg/cc), celui qui était le plus rempli (3,0 mg/cc) a vu sa performance sensiblement améliorée par la modulation (+16% de rendement thermodynamique et +27% d'efficacité lumineuse).

A la teneur de 1,1 mg/cc, nous n'avons pas trouvé de réglage de la modulation permettant d'augmenter sensiblement l'efficacité lumineuse. Malgré cela, c'est cette teneur qui donne la meilleure performance de la série des bulbes de 8 cc, à savoir 46 lm/W (voir Figure 20 et Tableau 2).

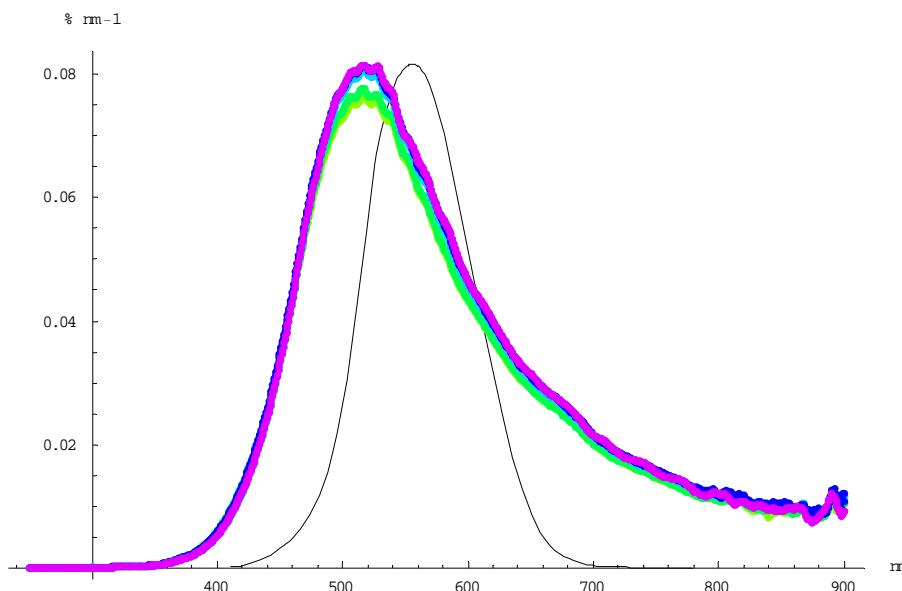


Figure 20 Bulbe de 8,1 cc rempli au sélénium à 1,1 mg/cc. La consommation du magnétron est de 583W et 598W, 1^{ère} fréquence à 67 kHz. 46 lm/W.

A 1,8 mg/cc, mais pour un bulbe plus gros (17 cc), une autre performance intéressante a été au rendez-vous [21] : la modulation à 59 kHz a permis de monter le rendement du plasma de 8 à 30 %. La meilleure efficacité lumineuse a atteint 52 lm/W en modulation. La puissance consommée par le magnétron était de 800 W (cf. Tableau 2). Comme la meilleure performance avec un bulb de 8 cc

n'est pas de beaucoup inférieure (46 lm/W), nous en déduisons que réduire le bulbe limite nettement moins les performances qu'avec le tellure. C'est qu'en particulier à 1,1 mg/cc, le transfert thermique dans le plasma est plus faible.

Du point de vu de la température de couleur, qui est au alentour de 6'000 K pour le bulbe à 1,1 mg/cc, l'éclairage obtenu est très agréable. La ressemblance à la lumière du jour par beau temps s'explique d'une part par la continuité du spectre et d'autre part par le fait que son maximum d'émission est pratiquement juxtaposé à de celui de la lumière du jour (voir §12.3, page 46). La première caractéristique apporte une réduction du risque de métamérisme. De surcroît, la lampe produit moins d'ultraviolets que n'en apporte la lumière du jour (filtrage inutile). Mais la présence d'infrarouge dans le rayonnement de la lampe au sélénium constitue un inconvénient sensible pour l'éclairage d'intérieur (surcharge de la climatisation). De plus, le sélénium étant classé toxique, nous ne préconisons pas l'emploi de cette substance.

c) Modulation haute fréquence.

Le nouveau modulateur nous a permis de scruter de 15 kHz jusqu'à 3 MHz. Deux ondes sinusoïdales sont superposées : une de basse fréquence qui est réglée pour entrer en résonance dans le bulbe afin d'engendrer la sustentation acoustique, et une onde de haute fréquence qui devrait être réglée sur une fréquence d'amortissement maximum du son afin d'exciter le mode vibratoire des molécules diatomiques (pour faciliter leurs dissociations) [4]. Nous avons scruté le large domaine spectral offert par le nouveau modulateur, mais jusqu'à présent, cette deuxième onde n'a pas eu l'impact bénéfique escompté, pour aucun des bulbes testés ici (voir §4.2, point c).

8 Montage du bulbe en terminaison de câble coaxial

8.1 Problématique

Les lampes au soufre qui ont été commercialisées jusqu'à présent, comme la Solar-1000 de Fusion Lighting ou les PLS de LG Electronics, souffrent toutes d'un problème d'encombrement. Bien que la densité de la source lumineuse est très élevée (~4000 lm/cc), l'optique prend beaucoup de place. La Figure 21 montre la version actuelle : le bulbe (3) est placé dans une cavité grillagée cylindrique (2) qui est couplée à un guide d'onde électromagnétique (15) alimenté par un magnétron (13). Pour initier la décharge dans le bulbe, la cavité doit être résonante. Comme le réflecteur métallique (1) ne peut pénétrer dans la cavité grillagée (2), il est prolongé par un miroir diélectrique (4). Ce composant pose problème. Premièrement il est fort cher et, deuxièmement, il ne peut être mis en forme à coût raisonnable. De ce fait, l'optique doit être surdimensionnée. Pour réduire sa taille, il faudrait réduire la section de la cavité grillagée. Or ses dimensions sont imposées par la fréquence des micro-ondes. On ne peut donc réduire la cavité sans changer la source micro-onde (13). Or la source actuellement utilisée est un magnétron de four de cuisine (2,45 GHz). Le prix de cette source est de loin imbattable (env. 10\$ pièce en grande quantité). Reste donc à modifier le mode de résonance exploité.

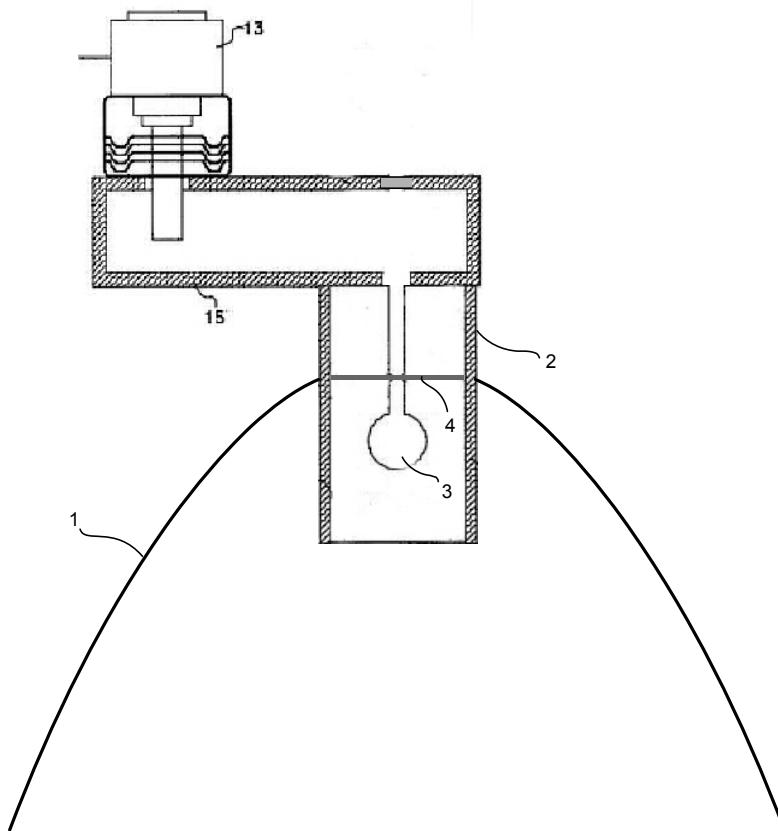


Figure 21 Couplage électromagnétique actuel.

Le bulbe est statique grâce à notre invention qui permet de confiner le plasma par sustentation acoustique (Brevet européen n°07405189.7-2208)

8.2 Méthode

Maintenant que la rotation du bulbe est supprimée, il est envisageable de monter le bulbe en terminaison de câble coaxial (cf. Figure 22). Dans la nouvelle configuration, la cavité résonante cylindrique sera remplacée par un câble (2, Figure 22) ; sa longueur est ajustée à un nombre entier de demi-longueur d'onde (quelques centimètres) pour satisfaire la condition de résonance, afin d'initier la

décharge dans le bulbe à l'allumage. Pour maintenir la fonction de cage de faraday que remplissait la grille (2, Figure 21), le bulbe est recouvert d'une couche mince transparente et conductrice (technologie maîtrisée par Solaronix). Avec ce montage, on ouvrira quantité de possibilités d'intégration en séparant le bulbe du corps de la lampe (projecteurs, lustres, appliques ou plafonniers encastrables par exemples).

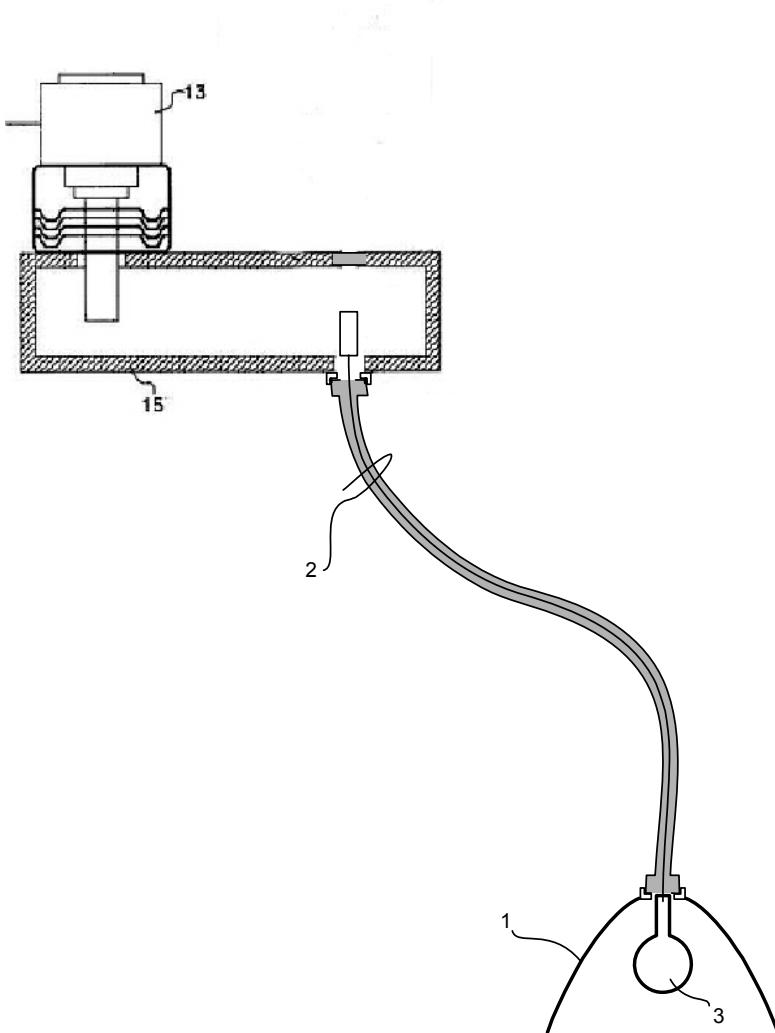


Figure 22 Nouveau couplage électromagnétique.

Le plasma ne fait pas fondre le bulbe grâce à la sustentation acoustique (Brevet européen n°07405189.7-2208)

Ce montage est prêt de l'alimentation électrique jusqu'au câble coaxial (organes pour la plupart fournis par Solaronix). Concernant le bulbe, toutefois, la conception du système de montage au bout du câble nécessite un choix de matériaux très étudié et un approfondissement des aspects électromagnétiques et thermiques (nous l'avons constaté avec le bulbe-antenne, voir § 6, page 26). L'antenne est en cours de réalisation. Elle consiste en un tube de quartz fermé du côté où il est soudé au bulbe ; ce tube doit être métallisé à l'intérieur comme à l'extérieur. Le dépôt d'une couche d'or sur le quartz est réalisable par voie vapeur (CVD) ; cependant, l'application de la CVD à ce type d'objet n'étant pas commun, des essais de mise aux points du processus doivent être mis en œuvre.

9 Collaboration nationale

Sans la participation de l'entreprise Solaronix, ce projet n'aurait pu être mené si loin.

Voici en quelques chiffres l'investissement de Solaronix dans ce projet, en matériel et en travail, année par année:

2005 :

Labour: 3 man-months	40'000.-
MW test bench	15'000.-
Innovative System	5'000.-
Bulbs filling incl. mat.	5'000.-
Magnetron & thermometry	3'000.-
<hr/>	
Total:	68'000.-

2006 :

Labour: 2 man-months	26'000.-
MW hardware	2'000.-
Bulbs filling incl. mat.	6'000.-
Patent fees	10'000.-
<hr/>	
Total:	44'000

2007 :

Labour: 2 man-months	26'000.-
MW hardware (new modulator)	12'000.-
Bulbs filling incl. mat.	13'000.-
Spectrometer	12'000.-
Patent fees	7'000.-
<hr/>	
Total:	70'000.-

Le total sur les trois années fait donc : 182'000.-

10 Collaboration internationale

Comme prévu (contrats OFEN Nr. 151247 et 151248), les résultats de ce projet ont été divulgués au travers de l'Agence International de l'Energie ECBCS Annexe 45 (Energy Efficient Electric Lighting for Buildings). Une première fois lors du meeting d'avril 2005, qui se tint à San Francisco (USA), puis une deuxième fois lors de celui d'octobre 2007, qui eu lieu à Lyon (France). A chacun de ces meetings, nous avons fais une présentation orale de nos résultats les plus avancés, fais des échanges d'informations et pris des contacts utiles. Enfin, nous avons parachevé notre participation en fournissant un document de synthèse (sulphur lamp, AIE status).

La lampe au soufre apparaît dans les éléments de la sous-tâche **B3 « Trends in existing and future lighting technologies »**, parmi d'autres technologies dont notamment les LED blanches. Comparativement à ces dernières, le bulbe de la lampe au soufre offre une source de plus haute densité : ~4000 lm/cc contre ~40 lm/cc, ce qui convient mieux aux optiques des luminaires (rendement supérieur). La lampe au soufre se présente donc comme un candidat d'avenir pour les luminaires de forte puissance (spots, lustres et plafonniers pour hall, ...).

Durant l'année 2006, nous avons été contactés par LG. Par deux fois, des ingénieurs sont venus voir notre prototype fonctionner. Une start-up suisse, nommée Akhtis, a été créée pour commercialiser des lampes au soufre en Europe.

11 Conclusion

En partenariat avec la société Solaronix, nous visions modifier la lampe Solar-1000 pour atteindre les caractéristiques suivantes :

- a) Bulbe sans mouvement
- b) Efficacité lumineuse > 100 lm/W.
- c) Puissance nominale < 100 W.

Nous avons commencé les travaux en janvier 2005. Dès la première année nous avons obtenus les résultats suivants:

- a) Objectif a) atteint en modulant le magnétron dans le domaine 20 à 70 kHz. L'innovation consiste à générer dans le bulbe une onde acoustique stationnaire dont un ventre se situe au centre.
- b) Objectif b) approché. Nous avons obtenu 86 lm/W, par rapport à la consommation du magnétron, ce qui donne 80 lm/W avec une alimentation de bon rendement.
- c) Objectif c) à moitié réalisé. L'efficacité lumineuse de 86 lm/W a été obtenue à la moitié de la puissance nominale de la lampe Solar-1000, ce qui correspond à celle de la moins puissante des lampes commercialisées par LG Electronics (PLS).

En 2006, nos résultats ont confirmé que, dans le cas du soufre, réduire la taille du bulbe permet de réduire la puissance nominale. Au tiers de la puissance nominale de la Solar-1000, l'efficacité lumineuse avec un bulbe statique de 5,4 cc a atteint 68 lm/W grâce au modulateur. A la même puissance, la Solar-1000 ne produit que 60 lm/W. En outre, des preuves expérimentales de la modulation du plasma et de sa sustentation ont été obtenues. Par ailleurs, nous avons vérifié que le rendu de couleur avec nos meilleurs prototypes est bon et correspond bien aux besoins de l'éclairage d'intérieur.

Pour l'année 2007, les principaux résultats sont :

- a) Allumage des très petits bulbes : nous avons réussi à allumer le plus petit de nos bulbes (1,2 cc) avec le nouveau modulateur alors que nos essais avec le précédent étaient restés vains. Le maintien du plasma de soufre dans un aussi petit bulbe est toutefois délicat car la température au cœur est faible. L'exploration de cette voie est quasi impossible sans asservissement de la fréquence de modulation avec, en permanence, recherche automatique de la fréquence de résonance. Il nous faut pour cela planter un processeur digital pour commander le modulateur.
- b) Il est préférable de moduler le magnétron en signal carré plutôt qu'en sinus ; la vibration du plasma s'en trouve renforcées. Jusqu'à présent, nous n'avons pas pu vraiment imprimer au magnétron de véritables impulsions, malgré que le Lightron comporte des selfs de choc plus faibles que celles des magnétrons standards. Deux voies sont envisageables pour aller plus loin dans ce sens.
- c) Nous avons prouvé expérimentalement que le montage bulbe-antenne supprime la fonction de cavité de résonante de la grille. Cette dernière ne garde que sa fonction de cage de Faraday, ce qui libère son design. On peut ainsi la ramené à une enveloppe conductrice transparentes, une grille ou un dépôt céramique fermant une optique à réflecteur par exemple. La grille a un diamètre de 7,5 cm dans la version cavité résonante, alors que celui du bulbe fait 2,5 cm (version 5,4 cc [11]). En admettant que le réflecteur passe à 5 mm du bulbe, l'optique est réduite dans un rapport d'échelle de 0,47. Nous divisons ainsi son volume par 8. Notre système de mesure photométrique actuel ne convient plus si la lampe est munie d'une optique. C'est pourquoi nous sommes en train d'installer une sphère d'Ulbricht à notre laboratoire.
- d) Nous avons pu démarrer des petits bulbes (2,9 cc) à des niveaux de puissance inférieure à 100 W.
- e) Un problème surgit toutefois lorsque la pression dans le bulbe monte car alors la décharge se déplace à l'extérieur, au bout de l'antenne. Pour aller plus loin, nous avons contracté

l'entreprise Jelosil, spécialisée dans les machines de production des ampoules en quartz. Mais les antennes soudées par Jelosil n'ont pas donné satisfaction. Des essais sont en cours pour résoudre ce problème.

f) Optimisation du remplissage au tellure (bulbes de 8cc) :

- Le risque de rupture d'un bulbe rempli au tellure est faible, voire inexistant. En contre partie, l'efficacité lumineuse est nettement moins élevée. Ceci découle du fait que, sans cette rétroaction positive, la température au cœur du plasma ne s'élève pas autant qu'avec le soufre.
- La modulation à basse fréquence (entre 15 et 80 kHz) décale le spectre vers les grandes longueurs d'onde. La teneur joue un rôle capital pour le rendement du plasma et l'efficacité lumineuse (voir Tableau 1, page 29). La meilleure efficacité a été obtenue à 2,9 mg/cc ; elle n'est que de 19 lm/W.
- A 0,9 mg/cc, mais pour un bulbe de 17 cc, des performances intéressantes sont au rendez-vous : la modulation a permis de monter l'efficacité lumineuse à 68 lm/W en augmentant le rendement du plasma à 47%, pour une puissance consommée par le magnétron de 600W (voir Tableau 1, page 29). Mais aucune performance comparable à celle-ci n'a pu être obtenue avec un bulb de 8 cc. Réduire la taille du bulbe entraîne une baisse considérable de la performance avec le tellure, alors que cela n'avait pas été le cas avec le soufre. Il semble donc que le coefficient de transfert thermique du plasma soit plus élevé avec le tellure qu'avec le soufre. De plus, modulation ON, le plasma de soufre se maintient mieux hors équilibre thermodynamique local, ce qui rend possible des gradients thermiques plus abruptes. Dans ce sens, cette différence de comportement entre le soufre et le tellure tend à confirmer la conjecture théorique que nous avancions au début du projet, à savoir, que l'on peut augmenter l'efficacité lumineuse du plasma en l'écartant de l'équilibre thermodynamique local [12].
- Modulation OFF, la teneur à 2,9 mg/cc donne un spectre extrêmement bien ajusté à la sensibilité de la vision photopique (voir Figure 19, page 32). Mais la performance reste modeste (16 lm/W) car le rendement du plasma est insuffisant (8%). Ceci provient du fait que le transfert thermique dans le plasma de tellure est trop fort. Pour contrecarrer cette inconvénient il faudrait agrandir le bulbe. Et, nous l'avons vu plus haut, le tellure a l'avantage de ne pas engendrer de risque de rupture du bulbe. En conséquence, cette substance devrait être un bon candidat pour une lampe de forte puissance (~2 kW) à bulbe statique (25 cc ?).

a) Optimisation du remplissage au sélénium (bulbes de 8 cc) :

- Modulation OFF, le plasma de sélénium n'occupe pas le bulbe complètement, contrairement au plasma de tellure. Mais sa forme n'est pas aussi marquée par la gravitation que celle du plasma de soufre. Avec le sélénium, la modulation a permis d'améliorer le couplage électromagnétique : le taux d'onde stationnaire dans le guide micro-onde était systématiquement plus bas en modulation ON que OFF à puissance égale. Globalement, le couplage est moins bon avec le sélénium qu'avec le soufre, mais meilleur qu'avec le Tellure. Il semble donc que le sélénium répond de manière plus linéaire que le soufre, mais moins que le tellure. Donc avec le sélénium, le risque d'avalanche thermique est moindre qu'avec le soufre mais supérieur qu'avec le tellure. Et en effet, sans modulation, le bulbe a une meilleure tenue en température qu'avec le soufre.
- La modulation à basse fréquence (entre 20 et 80 kHz) décale le spectre vers les grandes longueurs d'onde.
- La teneur influence le rendement du plasma et l'efficacité lumineuse. Contrairement aux bulbes 8 cc à faible remplissage (1,1 et 0,6 mg/cc), celui qui était le plus rempli (3,0 mg/cc) a vu sa performance sensiblement amélioré par la modulation (+16% de rendement thermodynamique et +27% pour l'efficacité lumineuse, voir Tableau 2, page 32).
- A la teneur de 1,1 mg/cc, nous n'avons pas trouvé de réglage de la modulation permettant d'augmenter sensiblement l'efficacité lumineuse. Malgré cela, c'est cette

teneur qui donne la meilleure performance de la série des bulbes de 8 cc, à savoir 46 lm/W (voir Figure 20 et Tableau 2, page 32).

- A 1,8 mg/cc, mais pour un bulbe plus gros (17 cc), des performances intéressantes sont au rendez-vous en modulation : 52 lm/W avec modulation, pour une puissance consommée par le magnétron de 800 W (voir Tableau 2). La meilleure performance avec un bulb de 8 cc n'est pas beaucoup plus basse (46 lm/W). Réduire le bulbe semble donc nettement moins limiter les performances qu'avec le tellure.
- b) Teneurs préconisées : de l'ensemble des essais effectués, on peut préconiser pour des bulbes de 8cc une teneur maximale à ne pas dépasser (fluage du quartz à partir de 1120 °C), voir Tableau 3 (page 34). Le Tableau 4, ci-dessous, rassemble les données sur les teneurs de nos meilleurs prototypes en bulbe 8cc :

Tableau 4 Meilleures teneurs en bulbes 8cc ; la performance est toujours en modulation ON.

		Tellure	Sélénium	Soufre ⁽⁸⁾
Teneur optimale	mg / cc	2,9	1,1	1,3
Efficacité lumineuse	lm / W	19	46	62
Puissance consommée par le Lightron	W	730	600	580

C'est sans ambiguïté, le soufre est la substance qui convient le mieux à notre objectif : la meilleure efficacité lumineuse à la plus basse puissance.

- c) Bulbe asphérique : la forme de ce bulbe asphérique a été étudiée pour que l'onde acoustique arrive contre le bulbe en même temps sur toute la paroi. Elle tient compte donc de l'anisotropie acoustique du plasma, qui découle de la dérive E^B. Cette mise en forme du bulbe augmente sa tenue thermomécanique. En modulation par signal carré, l'efficacité lumineuse a atteint 62 lm/W (voir Tableau 4).
- d) Montage du bulbe au bout d'un câble coaxial : Ce montage est prêt de l'alimentation électrique jusqu'au câble coaxial. Mais pour ce qui est du bulbe, la conception du système de montage du bulbe au bout du câble nécessite encore une étude de choix de matériaux et un approfondissement des aspects électromagnétiques et thermiques. La réalisation d'une antenne prototype a été initiée. Elle consiste en un tube de quartz, fermé du côté où il est soudé au bulbe. Ce tube doit être métallisé à l'intérieur comme à l'extérieur. Le dépôt d'une couche métallique est réalisable par voie vapeur (CVD), mais une mise aux points du procédé s'avère nécessaire.
- e) En matière de collaborations internationales, les résultats de ce projet ont été divulgués au travers de l'Agence International de l'Energie ECBCS Annexe 45 (Energy Efficient Electric Lighting for Buildings). Certaines informations sensibles n'ont été communiquées après qu'un brevet ait été déposé. La lampe au soufre figure dans les éléments de la sous-tâche **B3 « Trends in existing and future lighting technologies »** parmi d'autres technologies dont notamment les LED blanches. Comparativement à ces dernières, le bulbe de la lampe au soufre offre une source de meilleure densité (~4000 lm/cc) contre (~100 lm/cc), ce qui convient mieux aux optiques des luminaires (rendement supérieur). La lampe au soufre se présente donc comme un bon candidat d'avenir pour les luminaires de forte puissance (spots, lustres et plafonniers pour halls ou surfaces commerciales, ...). Par ailleurs, nous avons été contactés par LG Electronics, et une start-up suisse, nommée Akhtis, a été créée pour commercialiser des lampes au soufre en Europe.

⁸ Bulbe asphérique

Pour finir nous résumons dans le Tableau 5 les caractéristiques des meilleurs prototypes réalisés dans ce projet :

Tableau 5 Les meilleures prototypes (bulbes statiques en modulation ON)

Teneur	<i>mg / cc</i>	S 1,5	S 1,2	S 1,3	S 1,5	Te 0,9
Bulbe (volume intérieur)	<i>cc</i>	11,5	10,8	8,3 (⁹)	5,4	17
Puissance consommée par le magnétron	<i>W</i>	646	660	580	490	600
Efficacité lumineuse (¹⁰)	<i>lm / W</i>	86	70	62	68	68
Température de couleur	<i>K</i>	7'500	11'000	15'700	8'200	
Indice CIE de rendu de couleur		81	85	87	88	75

⁹ Bulbe asphérique

¹⁰ Par rapport à la consommation du magnétron. L'efficacité lumineuse de la lampe est obtenue en multipliant la valeur donnée dans le Tableau 5 par le rendement de l'alimentation du magnétron (généralement entre 90 et 95%)

12 Annexes

12.1 Coordonnées chromatiques (x, y)

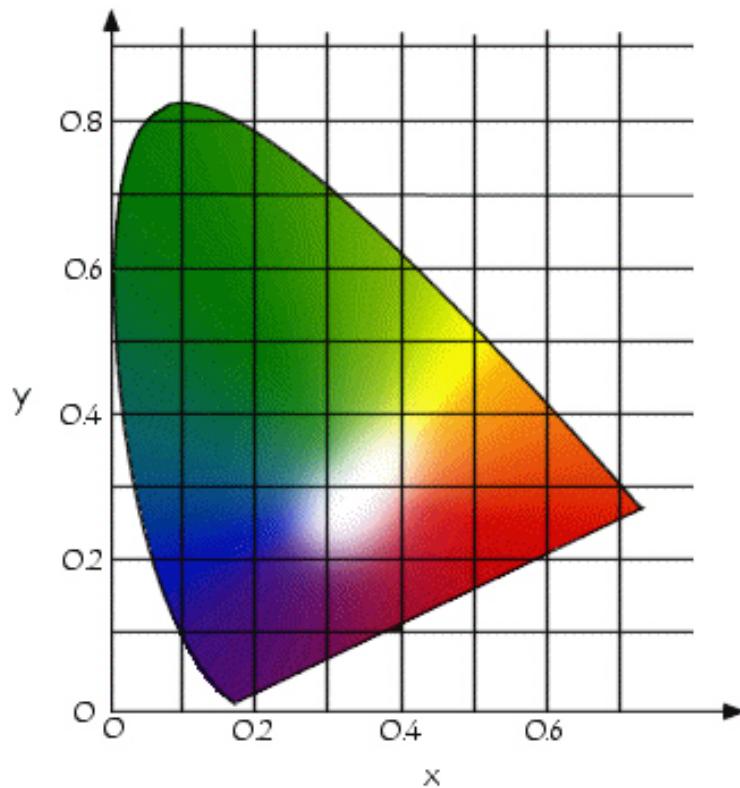


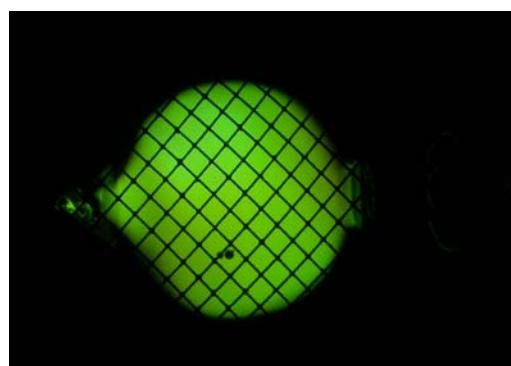
Figure 23 Diagramme chromatique (Commission Internationale de l'Eclairage, 1931)

12.2 Observations visuelles des plasmas, modulation OFF

Le bulbe est statique et la modulation n'est pas enclenchée (cas OFF).



Sans filtre

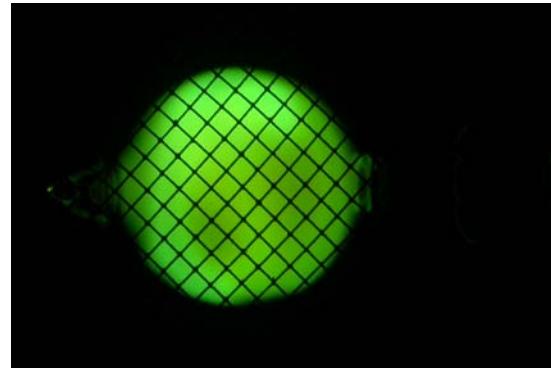


Avec filtre

Figure 24 Plasma de tellure, consommation du Lightron : 572 W ; bulbe 8,0cc rempli à 0,8mg/cc ; température max sur le bulbe ~1080°C. Efficacité lumineuse : 10 lm/W.



Sans filtre



Avec filtre

Figure 25 Plasma de sélénium, consommation du Lightron : 722W ; bulbe 8,1cc rempli à 1,1mg/cc ; température max sur le bulbe ~1050°C. Efficacité lumineuse : 44 lm/W.



Sans filtre

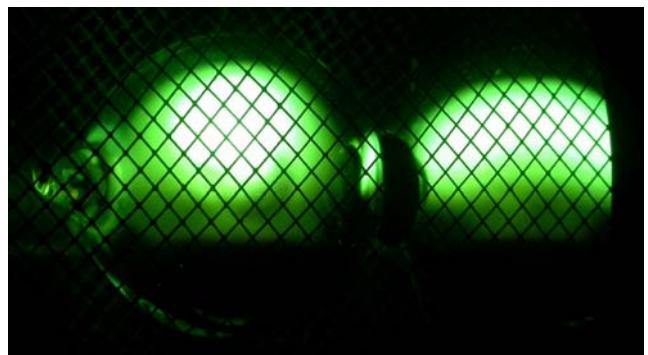


Avec filtre

Figure 26 Plasma de soufre (le bulbe n'est pas bien centré dans la cavité), consommation du magnétron : 350W ; bulbe 8,2cc rempli à 1,3mg/cc ; température max sur le bulbe ~935°C. Efficacité lumineuse : 20 lm/W.



Sans filtre



Avec filtre

Figure 27 Plasma de soufre, consommation du magnétron : 480W ; bulbe 10,8cc rempli à 1,2mg/cc ; température max sur le bulbe ~800°C. Efficacité lumineuse : 30 lm/W.

Les bulbes contiennent un ou des gaz neutres à faible pression pour initier la décharge électrique (argon, xénon,...). Au fur et à mesure que la température du bulbe s'élève, la substance active s'évapore et son plasma fait son apparition, puis devient dominant, plus lumineux que celui du gaz neutre. Quelque soit la substance, son plasma est maintenu par la dissipation de l'énergie

électromagnétique (conversion en chaleur). Preuve en est que, comme cela réduit drastiquement le champ électromagnétique dans le bulbe, le plasma de gaz neutre s'éteint et il n'est plus possible de rallumer la lampe sans attendre que la substance active se recondense.

Dans le cas du soufre, le plasma se décentre nettement, pour se loger dans la partie supérieure du bulbe, contrairement au cas du tellure qui lui occupe tout le bulbe. Le sélénium a un comportement intermédiaire ; on le voit à travers le filtre (cf. Figure 25), sa température est supérieure dans la partie haute du bulbe. Nous interprétons la différence de comportement comme étant due à une différence dans la variation de l'absorption électromagnétique en fonction de la température. Dans le cas du soufre, celle-ci croît fortement avec la température. C'est donc là où le plasma est le plus chaud qu'il absorbe le mieux l'énergie électromagnétique, au dépend des zones moins chaudes, ce qui engendre une focalisation du plasma. Les gradients de température étant très forts, la convection naturelle est marquée ; c'est bien ce que nous observons (voir Figure 27). Le cas du tellure est à l'opposé : l'absorption est moins dépendante de la température, les gradients thermiques sont donc plus doux, ce qui fait que la convection naturelle devient faible devant la diffusion, et par conséquent le plasma occupe tout le bulbe (voir Figure 24).

Dans le cas du soufre, la convection naturelle rapproche le cœur du plasma (partie la plus chaude) et du bulbe, et cela peut lui être fatale. Dans l'état des choses de la Figure 27, l'efficacité lumineuse est à 30 lm/W et la température sur le bulbe à 800°C. Il semble donc qu'il y ait une marge confortable avant le ramollissement du quartz (1120 °C) ; augmentons la puissance à 580 W, l'efficacité lumineuse monte à 34 lm/W et la température à 850°C. Mais, comme nous avons pu l'expérimenter à plusieurs reprise, augmenter encore la puissance risquerait de faire ouvrir brutalement le bulbe sous l'effet de la pression. C'est le risque d'avalanche thermique. En effet, l'absorption électromagnétique étant une fonction fortement croissante de la température, la rétroaction est positive.

12.3 Comparaison de l'émission du prototype au sélénium avec la lumière du jour

La lumière du jour est par essence très variable. Par ciel serein, le maximum de la densité spectrale de son émission se trouve généralement aux alentours de 490 nm. On utilise pour la présente comparaison l'éclairement global par ciel serein sur une surface horizontale lorsque le soleil est 30° au-dessus de l'horizon :

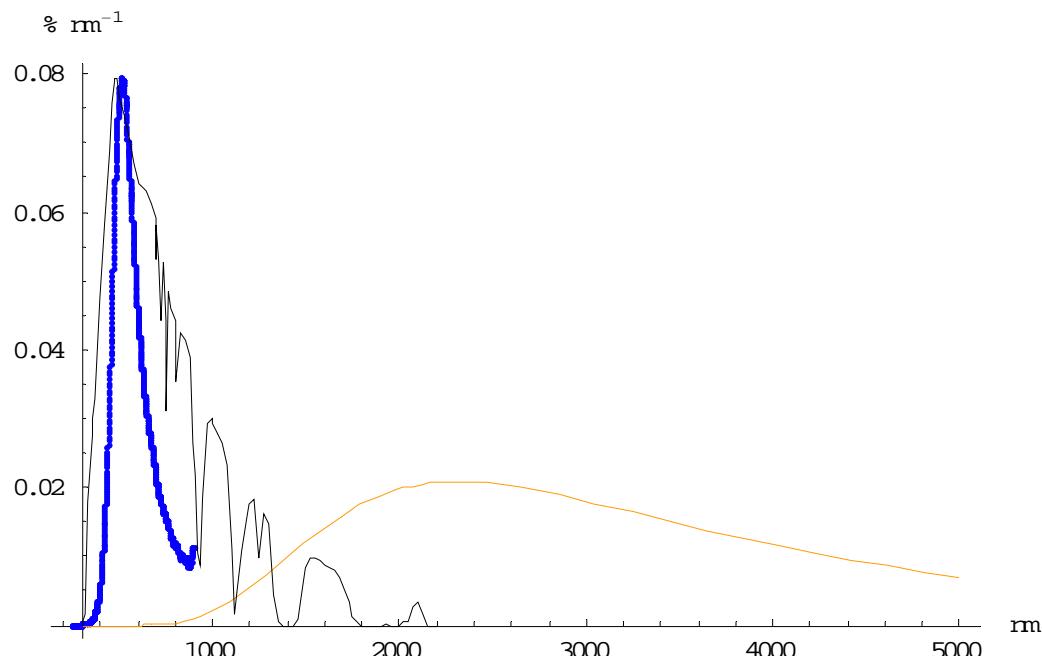


Figure 28 Comparaison du spectre de la lumière du jour (en noir, trait fin) avec celui de la lampe (rayonnement optique en bleu + rayonnement thermique en orange, reconstitué à partir la mesure de la température du bulbe par caméra infrarouge). Bulbe de 8cc, rempli à 1,1 mg/cc. Puissance consommée par le magnétron : 600 W. Efficacité lumineuse par rapport au magnétron : 46 lm/W.

La ressemblance de la lumière de la lampe à la lumière du jour par beau temps s'explique d'une part par la continuité du spectre et d'autre part par le fait que son maximum d'émission est pratiquement juxtaposé à de celui de la lumière du jour. La première caractéristique apporte une réduction du risque de métamérisme. De surcroît, la lampe produit moins d'ultraviolets que n'en apporte la lumière du jour. Pour ce qui est des ultraviolets solaires, ces radiations mutagènes sont au niveau du sol encore suffisamment puissantes pour agresser l'épiderme humain (surtout UVB) ; la majeure partie de ce rayonnement est filtré par le verre. L'absence d'ultraviolet dans le spectre de la lampe rend le filtrage inutile. Pour ce qui est des infrarouges, ces radiations sont un puissant vecteur de transfert thermique; leur présence dans le rayonnement de la lampe au sélénium constitue donc également un inconvénient en l'éclairage d'intérieur (surcharge de la climatisation). Comme pour les lampes halogènes, il est possible de réduire le rayonnement infrarouge envoyé sur les objets éclairés en utilisant une optique à miroir dichroïde.

12.4 Modulation à haute fréquence du plasma de tellure

Efficacité lumineuse en fonction de la deuxième fréquence de modulation ; bulbe 8,0 cc [23].

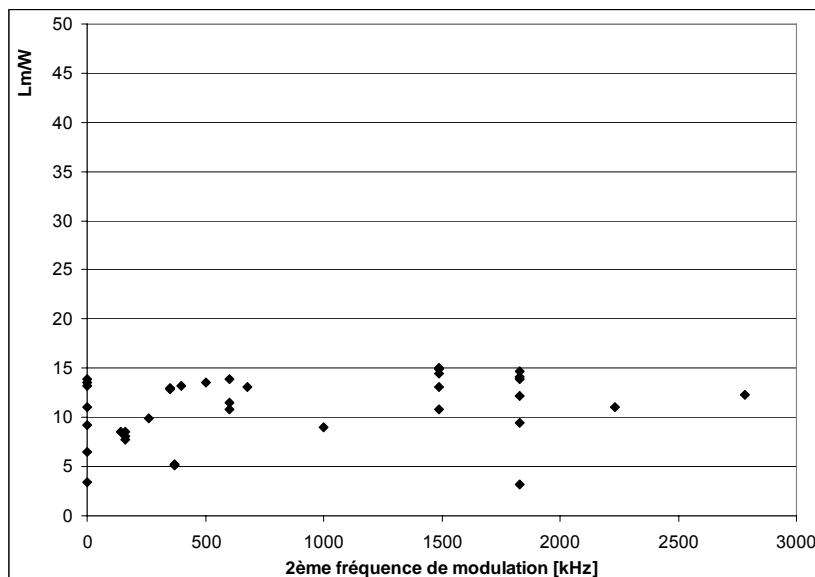


Figure 29 Teneur à 6,0 mg/cc (tellure)

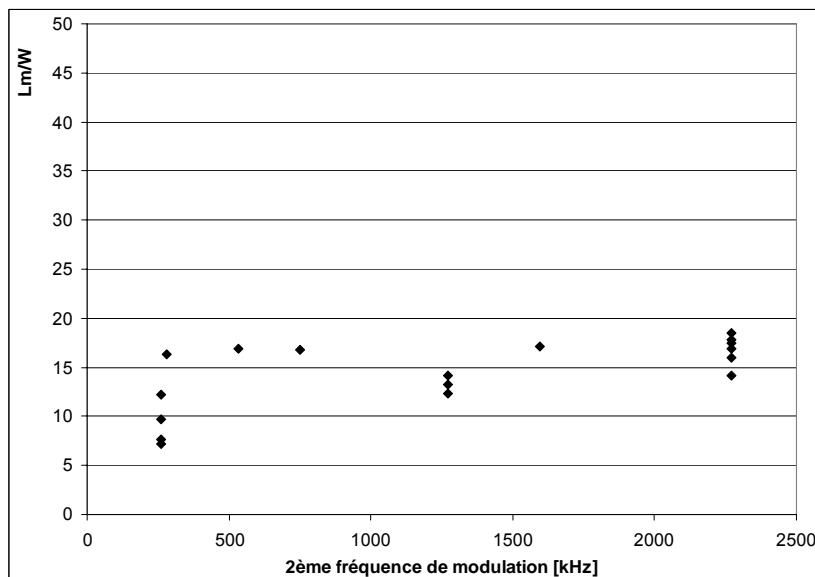


Figure 30 Teneur à 2,9 mg/cc (tellure)

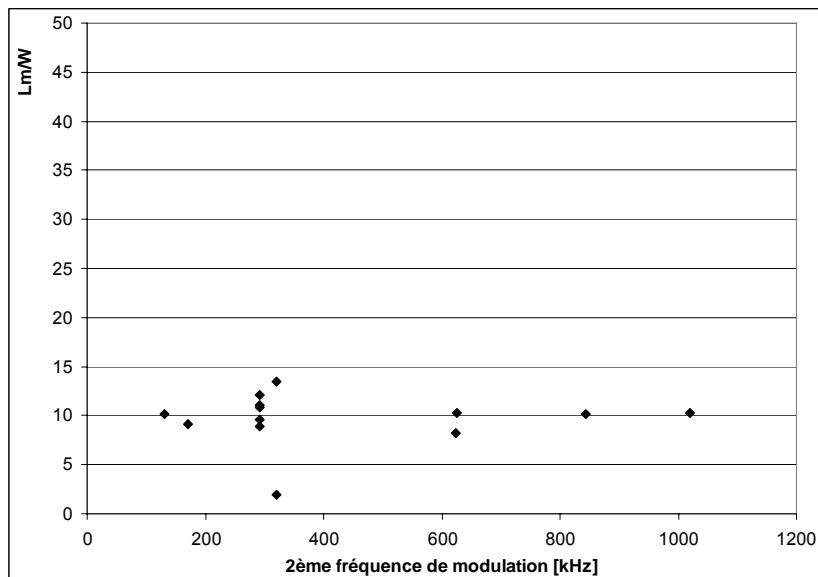


Figure 31 Teneur à 0,8 mg/cc (tellure)

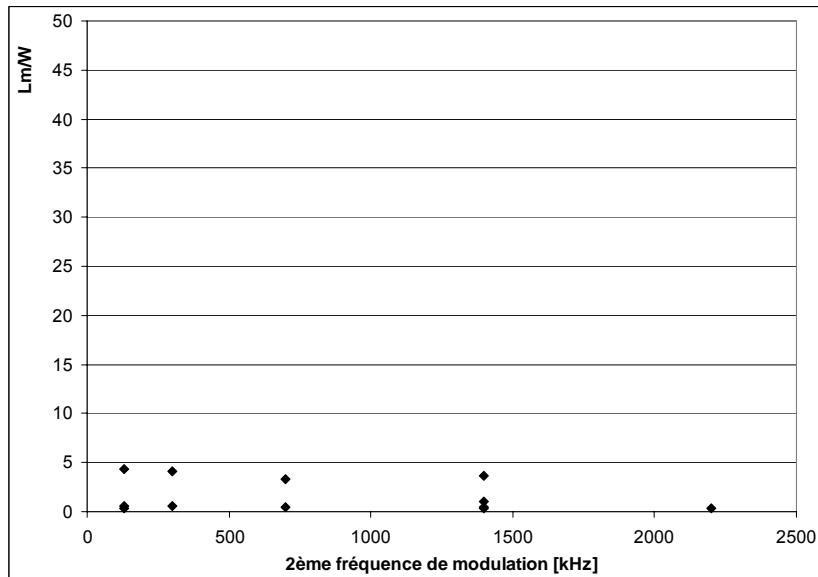


Figure 32 Teneur à 0,5 mg/cc (tellure)

12.5 Modulation à haute fréquence du plasma de sélénium

Efficacité lumineuse en fonction de la deuxième fréquence de modulation ; bulbe 8,0 cc [21].

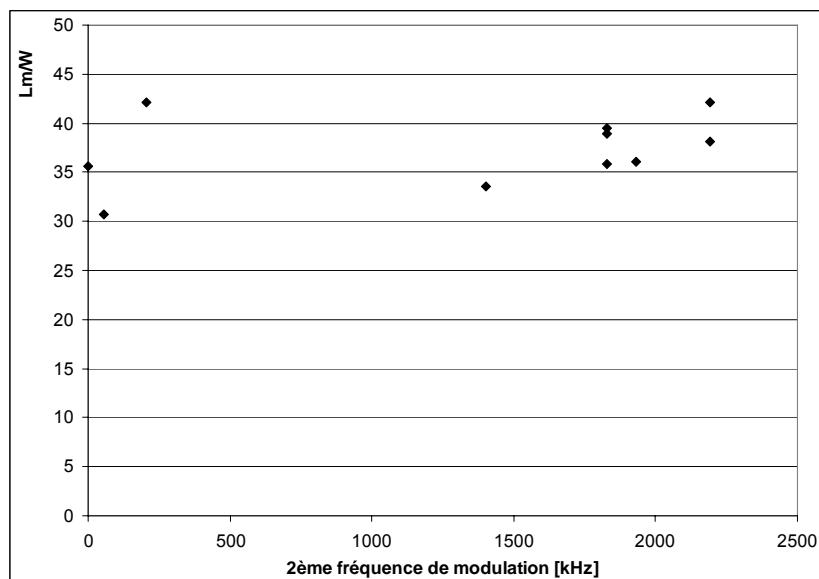


Figure 33 Teneur à 3 mg/cc (sélénium)

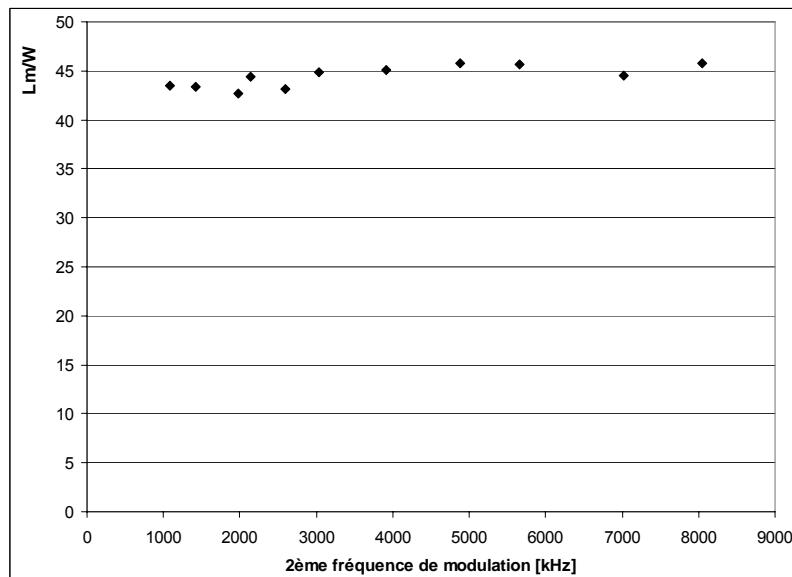


Figure 34 Teneur à 1,1 mg/cc (sélénium). La 1^{ère} fréquence reste à 68 KHz et la puissance consommée reste entre 592 et 622 W.

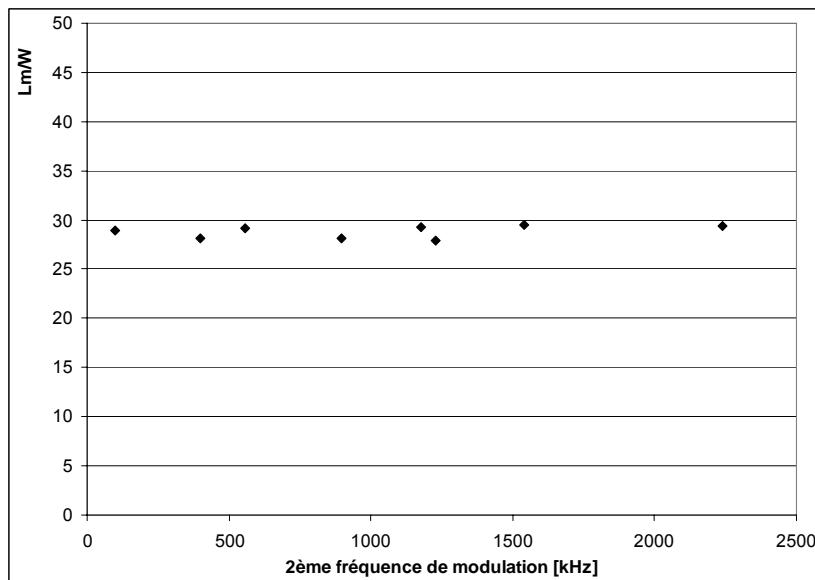


Figure 35 Teneur à 0,6 mg/cc (sélénum)

12.6 Modulation à haute fréquence du plasma de soufre

Efficacité lumineuse en fonction de la deuxième fréquence de modulation ; bulbe 8,0 cc [24].

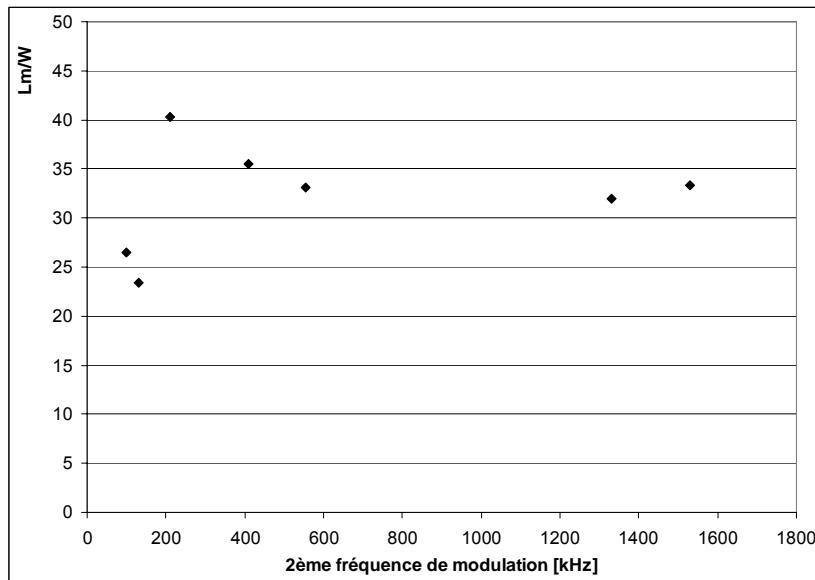


Figure 36 Teneur à 1,2 mg/cc (soufre)

12.7 Modèle de régulation du Lightron en charge

La capacité du Lightron a été mesurée à l'aide d'un RLC mètre : $C_{mag} = 620 \text{ pF}$.

L'inductance est mesurée avec un RLC mètre. Cette inductance est due au filament qui est un fil enroulé et des selfs de choc à l'entrée. Les noyaux des selfs de choc ont été retirés : $L_{mag} = 1 \mu\text{H}$.

Résistance à vide : la résistance d'un magnétron hors fonctionnement (pas de courant anodique) est infinie. C'est un circuit ouvert quand $|V_{cathode}| < 3 \text{ kV} \pm 0.1 \text{ kV}$.

Résistance dynamique :

La résistance dynamique dépend du type du bulbe mis en place et de son état physique (densité d'énergie, masse volumique et dégrée d'ionisation, ...). Pour la présente mesure, nous avons mis en

place un bulbe de 8,3 cc remplis su soufre à 1,3 mg/cc. La résistance à été déterminée à partir d'une réponse à un saut unité :

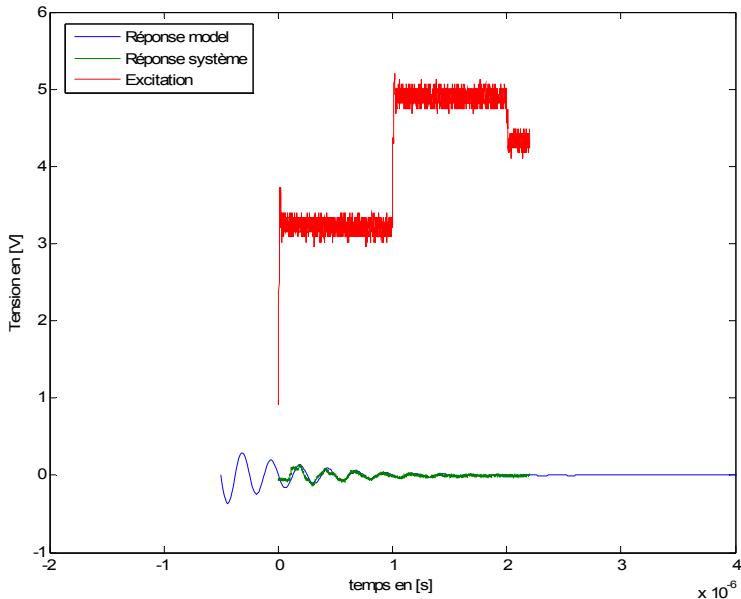


Figure 37 Mesure + réponse du model

On remarque que le système fait une oscillation amortie quand il y a un passage par zéro de l'excitation. Le deuxième saut ne provoque pas de réponse oscillante amortie.

Equation du temps (t) d'une oscillation amortie :

$$\text{oscillation amortie} = C \cdot \sin(\omega_0 t + \beta) \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{Équation 1}$$

C : constante de proportionnalité

ω_0 : pulsation propre du régime libre ; $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_o$

β : déphasage en rad

τ : constante de temps

Pour faire coller le modèle à la mesure on ajuste les paramètres suivants :

$$C = 0,179559 \text{ V}$$

$$f_0 = 4 \cdot 10^6 \text{ Hz} \Rightarrow \omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = 2,51 \cdot 10^7 \text{ rad/s}$$

$$\beta = \pi \text{ et } \tau = 6,312 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

A partir de la capacité apparente du magnétron, on suppose qu'elle est indépendante de la charge du Lightron, τ nous fournit la résistance dynamique :

$$\tau = R_{\text{mag}} C_{\text{mag}} \quad \text{Équation 2}$$

$$\text{On obtient } R_{\text{mag}} = \frac{6,3 \cdot 10^{-7} \text{ s}}{620 \cdot 10^{-12} \text{ F}} \cong 1 \text{ k}\Omega$$

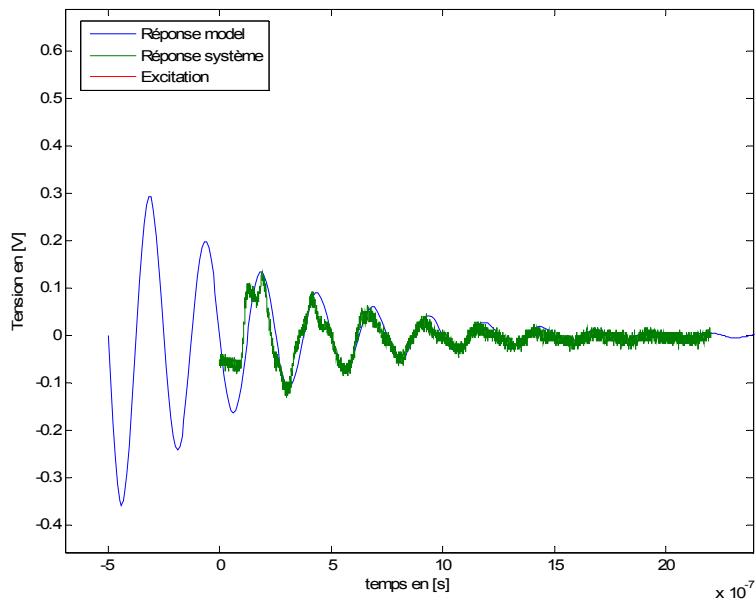


Figure 38 Zoom sur la réponse du système et du modèle, superposition des courbes

Nous avons procéder à une analyse d'incertitude sur toute l'oscillation amortie :

Tableau 6 Tableau des valeurs des amplitudes

$-\ln(A_2/A_1)$ [-]	Incertainude [-]	$-(t_1-t_2)$ [s]	Incertainude [s]	τ) [s]
0.36250083	0.10606467	2.29E-07	2.00E-08	6.31E-07
0.73717461	0.13449042	4.70E-07	2.00E-08	6.37E-07
1.05564801	0.16860525	7.33E-07	2.00E-08	6.94E-07
1.52569492	0.2436626	9.70E-07	2.00E-08	6.36E-07
1.74901162	0.29374055	1.21E-06	2.00E-08	6.94E-07
2.03640513	0.37704977	1.48E-06	2.00E-08	7.29E-07

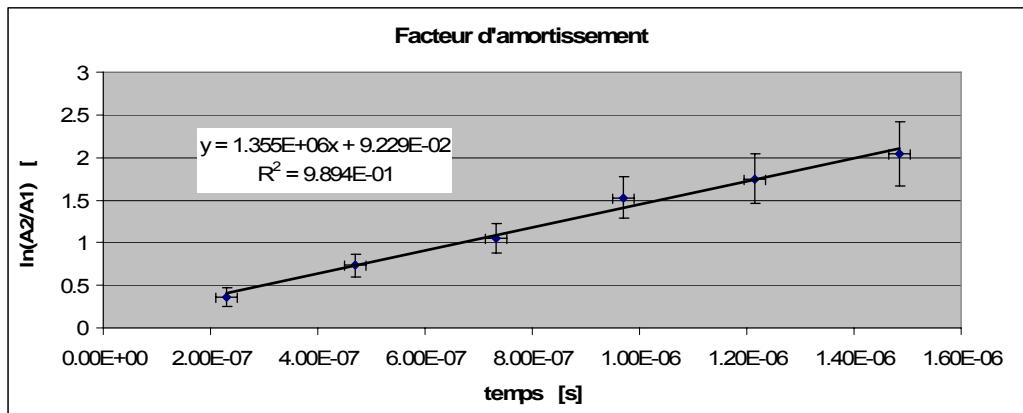


Tableau 7 Facteur d'amortissement pour l'ensemble des mesures du Tableau 6

Remarque : Le graphique ci dessus présente une courbe de tendance dont la pente est égale à $1/\tau$. La courbe croise l'axe vertical près de 0, c'est ce que nous attendions.

Le premier couple de point utilisé pour le calcul est plus précis que ce que la courbe de tendance donne. Cela vient du fait que la précision de la mesure de l'amplitude et du temps devient imprécise quand l'oscillation est presque amortie. La meilleure manière de vérifier si la valeur est juste est de simuler le résultat et de superposer la simulation et la mesure réel. Ce qui a été fait plus haut (Figure 38). Nous pouvons maintenant calculer la fonction transfert de notre système :

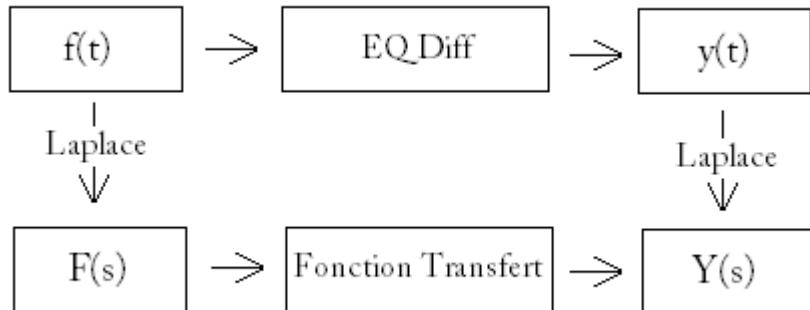


Figure 39 Synoptique de la fonction transfert et des transformée de Laplace

Nous connaissons $f(t)$ et $y(t)$, en passant ses deux fonctions dans l'espace de Laplace nous pouvons déterminer la fonction transfert du système. La fonction transfert est le rapport entre $Y(s)$ et $F(s)$:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{F(s)}$$

Équation 3

La fonction transfert obtenue est représentée sur la Figure 40.

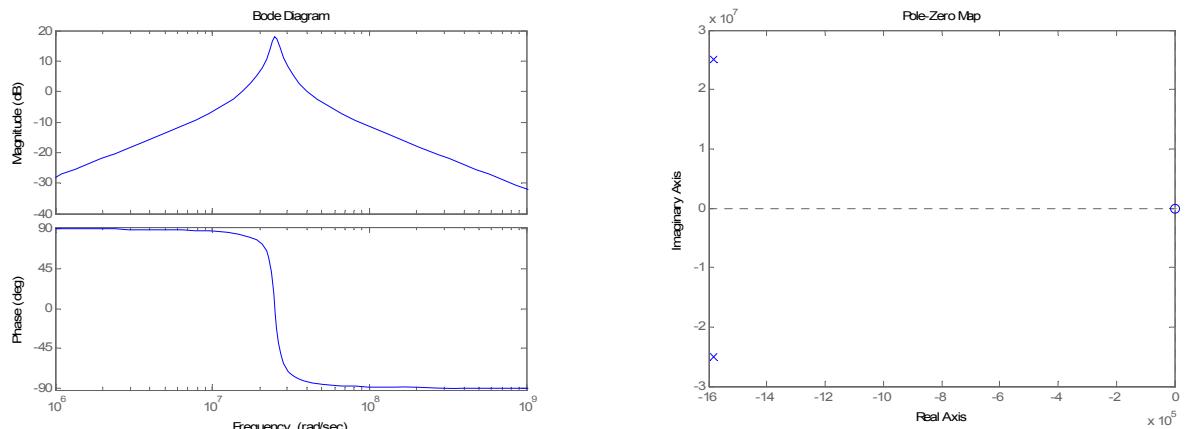


Figure 40 Fonction transfert du Lightron en charge. A gauche : Bode ; A droite : Pôles et zéro

13 Bibliographie

- [1] G. Courret, M. Croci : **Rayonnement d'une lampe à vapeur de soufre**, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2004
- [2] G. Courret : **Mesure de l'efficacité lumineuse de la lampe SOLAR-1000**, Projet HESSO Nanosun, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2004.
- [3] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/oi/2003/l_037/l_03720030213fr00190023.pdf
- [4] G. Courret : Zweiter Zwischenberichterstattung, **Environmental Friendly High Efficient Light Source**, Bundesamt für Energie, February 2006.
- [5] G. Courret : Annual Report 2005, **Environmental Friendly High Efficient Light Source**, Bundesamt für Energie, contract N°101078
- [6] G. Courret : Annual Report 2006, **Environmental Friendly High Efficient Light Source**, Bundesamt für Energie, contract N°101078 et 101080.
- [7] G. Courret, L. Calame, M. Croci et P. Egolf : **Environmental Friendly High Efficient Light Source**, 14 Schweizerisches Status-Seminar 2006 Energie und Umweltforschung im Bauwesen, Zürich, Suisse, 2006
- [8] G. Courret, A. Meyer : Detailed programm of extension, **Environmental Friendly High Efficient Light Source**, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2006
- [9] G. Courret : **Calibration du radiateur du Lightron**, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2007.
- [10] G. Courret : **Essai du Lightron et du spectromètre Ocean Optics**, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2007.
- [11] G. Courret, M. Croci, **Lampe plasma à bulbe sphérique de petite taille**, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2006
- [12] G. Courret : Zwischenberichterstattung, **Environmental Friendly High Efficient Light Source**, Bundesamt für Energie, February 2006
- [13] J-M. Rax : **Physique des plasmas**, Sciences Sup, Dunod, Paris, 2005.
- [14] L. Calame, G. Courret, M. Croci : **Bulbe rugby non symétrique** Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2007
- [15] C. W. Johnston and J J A M van der Mullen : **Measured and simulated response of a high pressure sulfur spectrum to power interruption**, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004), pages 573-587
- [16] G. Courret, M. Croci et P. Egolf : **Modèle mécanique et thermodynamique d'un plasma enfermé dans un bulbe en rotation**, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2006
- [17] G. Courret, M. Croci : **Rayonnement d'une lampe à vapeur de soufre**, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2004

[18] G. Courret et M. Croci : ***Excitation électromagnétique hyperfréquence d'une vapeur de soufre***, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2005

[19] L. Calame : ***Démarrage du bulbe antenne***, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2007

[20] G. Courret, M. Croci : ***Dissociation moléculaire dans le bulbe d'une lampe à vapeur de soufre***, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2004

[21] L. Calame, G. Courret, M. Croci : ***Optimisation de la teneur en sélénium***, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2007

[22] G. Courret, M. Croci : ***Variation de la teneur en soufre***, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2006

[23] L. Calame, G. Courret, M. Croci : ***Optimisation de la teneur en tellure***, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2007

[24] L. Calame, G. Courret, M. Croci : ***Modulation haute fréquence du plasma de soufre***, Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Suisse, 2007