

Université de Montréal

Applicateurs linéaires de champs EM utilisant la technologie triplaque
pour l'entretien de décharges HF (50-2450 MHz)

par
Jérôme Pollak

Département de physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître es Sciences (M. Sc)
en physique

Mars 2005

© Jérôme Pollak, 2005



QC

3

U54

2005

V.021



AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Applicateurs linéaires de champs EM utilisant la technologie triplaque
pour l'entretien de décharges HF (50-2450 MHz)

présenté par :

Jérôme Pollak

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Mme Joëlle Margot	Présidente du jury
M. Michel Moisan	Directeur de recherche
M. Jean-Jacques Laurin	Membre du jury

Résumé

Les plasmas créés par des champs de haute fréquence (HF) qui s'étendent sur des distances bien supérieures à la longueur d'onde dans le vide sont généralement entretenus par la propagation d'ondes de surface. Des applicateurs de champ HF se déployant sur toute la longueur du tube à décharge permettent également la production de longues colonnes de plasma. Jusqu'à présent, ces applicateurs étaient principalement basés sur la technologie des guides d'onde. Des lignes de transmission TEM planes peuvent aussi servir d'applicateur linéaire de champ. Nous avons développé une telle nouvelle structure HF de ce type, reposant sur la technologie triplaque et permettant d'entretenir une ou plusieurs colonnes de plasma par la propagation d'une onde électromagnétique guidée par l'applicateur.

Notre étude est centrée sur les caractéristiques électrodynamiques de ces applicateurs qui ne nécessitent aucun système d'adaptation d'impédance pour obtenir un transfert efficace de puissance du générateur vers l'applicateur sur une large gamme de fréquences (50 - 2450 MHz). Les décharges ainsi créées ont été analysées par comparaison à des décharges d'ondes de surfaces entretenues dans les mêmes conditions opératoires : une plus faible densité de plasma a pu être obtenue, entraînant ainsi une plus basse température du gaz et un volume de décharge plus important pour une même puissance absorbée. L'uniformité lumineuse de la décharge (reflétant jusqu'à un certain point l'uniformité du plasma) est supérieure à celle du plasma d'onde de surface jusqu'à la pression atmosphérique avec de l'argon comme gaz plasmagène. Nous avons examiné la contraction et la filamentation de ces décharges à haute pression ainsi que l'influence du débit du gaz sur ces phénomènes.

Cette nouvelle technologie apparaît complémentaire aux lanceurs d'ondes de surface et étend, de ce fait, les champs d'application possible des plasmas HF. Par exemple, l'une des principales caractéristiques de ces décharges, en l'occurrence une faible température du gaz, permet d'envisager l'exploitation de ces plasmas pour stériliser des tubes creux de faible diamètre formés de polymères thermosensibles.

Mots-clés : plasma HF, applicateur linéaire, onde TEM, onde de surface, contraction de la décharge, stérilisation à basse température, matériau thermosensible.

Abstract

High frequency (HF) generated plasmas extending over distances that are large compared to the free-space wavelength are usually sustained by the propagation of surface waves. Linear applicators running along the full discharge-tube length can also produce long plasma columns. To date, these linear applicators have been mainly based on waveguide technology. However, planar TEM transmission lines can also be designed as linear field applicators. Based on such a concept, we have worked out a new HF structure, using the stripline technology, which allowed one or more plasma columns to be sustained through the propagation of an electromagnetic wave guided by the applicator.

Our work is centered on the electrodynamic characteristics of these applicators, which do not require any impedance matching system to achieve an efficient power transfer from the generator to the applicator over a large range of frequencies (50-2450 MHz). These discharges have been analysed by comparison with surface-wave discharges sustained under the same operating conditions : a lower plasma density is obtained, which yields a lower gas temperature and a more important discharge volume for the same absorbed power. The uniformity of the emitted light intensity, an indication of the plasma uniformity, is better than for surface wave plasmas up to atmospheric pressure when using argon as the carrier gas. We have studied the contraction and filamentation of these discharges at high pressures as well as the effect of the gas flow on these phenomena.

This new type of plasma appears complementary to surface wave plasmas and extends the possible applications of HF plasmas. For example, one of the main characteristics of these discharges, namely a low gas temperature, allows to consider the use of these plasmas to sterilize small-diameter hollow tubes made of thermosensitive polymers.

Key words : HF plasma, linear applicator, TEM wave, surface wave, discharge contraction, low temperature sterilization, thermosensitive material.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des notations et symboles	xv
Remerciements	xviii
Introduction	1
Chapitre 1 Les lignes triplaques et leurs principales caractéristiques	3
1.1 Définition d'une ligne tripaque	3
1.2 Du câble coaxial à la ligne tripaque : vers une structure ouverte qui ne rayonne pas	5
1.2.1 Confinement du champ électrique dans la ligne tripaque	6
1.2.2 Comparaison entre une structure ouverte et une structure fermée	8
1.3 Construction et ingénierie	9
1.3.1 Transitions d'une ligne coaxiale vers une ligne tripaque	9
1.3.2 Schémas des lignes triplaques construites	11
1.4 Impédance d'entrée d'une ligne tripaque	14
1.4.1 Impédance caractéristique : formules théoriques et mesures expérimentales	14
1.4.2 Modes de propagation et extension d'échelle : fréquence de coupure du premier mode d'ordre supérieur	18
1.4.3 Transitions et discontinuités	21
1.5 Tenue en puissance des lignes triplaques	28
1.6 Qualité de la transmission des lignes triplaques comparée à celle des câbles coaxiaux classiques	29
1.7 Résumé et conclusion	30

Chapitre 2 Étude des décharges engendrées par une ligne triplaque	32
2.1 Genèse des applicateurs triplaques	33
2.1.1 La famille des applicateurs linéaires	34
2.1.2 Applicateurs linéaires basés sur la technologie micro-ruban	36
2.1.3 Vers les applicateurs triplaques	38
2.2 Décharges entretenues par une onde TEM et décharges d'ondes de surface	39
2.2.1 Comment repérer la présence d'une décharge d'onde de surface ?	39
2.2.2 Comment éviter le lancement d'une onde de surface ?	40
2.2.3 Relations avec d'autres travaux	42
2.3 Méthodes de diagnostics	44
2.4 Caractéristiques électrodynamiques de l'applicateur	46
2.4.1 Vers un système large bande	47
2.4.2 Bilan des flux de puissance	48
2.4.3 Densité de puissance absorbée par le plasma	52
2.5 Profils axiaux de l'intensité du champ électrique et de l'intensité lumineuse	54
2.5.1 Mode d'onde progressive	54
2.5.2 Mode d'onde stationnaire	56
2.6 Recherche de l'homogénéité des décharges à haute pression	57
2.6.1 Pression égale à 20 Torr	57
2.6.2 Pression égale à 150 Torr	59
2.6.3 Pression atmosphérique (760 Torr)	62
2.7 Résumé et conclusion	63
Chapitre 3 Application à la stérilisation de tubes creux de petit diamètre et thermosensibles	64
3.1 Problématique	65
3.2 Étude des gradients de pression dans des tubes de petit diamètre (inférieurs à 10 mm)	66
3.3 Optimisation de l'émission des UVV dans un plasma d'argon	69
3.3.1 Expérience d'absorption optique	69
3.3.2 Importance du degré de pureté de l'argon	71
3.3.3 Pression du gaz	72

3.3.4 Puissance incidente et fréquence du générateur	75
3.4 Protocole expérimental de stérilisation	76
3.4.1 Dépôt et récupération de spores dans des tubulures	76
3.4.2 Expérience de stérilisation	77
3.5 Courbes de survie	79
3.6 Interprétation des résultats	80
3.7 Résumé et conclusion	83
Conclusion	85
Bibliographie	87

Liste des tableaux

<u>Tableau 2.1</u>	Principales caractéristiques des plasmas créés à l'intérieur de lignes micro-rubans (figure 2.4.a) suivant les dispositifs de Bilgic <i>et al.</i> ^[25] , Bass <i>et al.</i> ^[26] et Schermer <i>et al.</i> ^[27]	37
<u>Tableau 3.1</u>	Conditions opératoires adoptées et maintenues constantes lors de chacune des expériences de stérilisation.	79

Liste des figures

<u>Figure 1.1</u>	Schéma de la configuration d'une ligne triplaque et indication de ses grandeurs caractéristiques.	4
<u>Figure 1.2</u>	Représentation des lignes de champ électrique à l'intérieur d'une ligne triplaque. .	4
<u>Figure 1.3</u>	Évolution conceptuelle d'une ligne coaxiale vers une ligne triplaque.	5
<u>Figure 1.4</u>	Variation de l'intensité de la composante E_x du champ électrique en fonction de la distance x vers l'extérieur d'une ligne triplaque définie par $w = 31.0$ mm et $h = 71.8$ mm, à trois fréquences du champ électrique.	6
<u>Figure 1.5</u>	Comparaison du confinement du champ électrique en fonction des dimensions de la ligne triplaque.	7
<u>Figure 1.6</u>	Mesures du pourcentage de transmission réalisées sur une ligne triplaque ouverte, puis sur la même ligne triplaque fermée.	8
<u>Figure 1.7</u>	Transition d'un connecteur N à une ligne triplaque en vue de profil (a) et selon la coupe AA (b).	10
<u>Figure 1.8</u>	Coupe transversale de l'applicateur linéaire.	12
<u>Figure 1.9</u>	Vue de dessus de l'applicateur linéaire avec la plaque supérieure (1) retirée.	12
<u>Figure 1.10</u>	Vue de côté de l'applicateur linéaire.	12
<u>Figure 1.11</u>	Vue de dessus de l'applicateur circulaire avec la plaque supérieure (1) retirée. . .	13
<u>Figure 1.12</u>	Vue de côté de l'applicateur circulaire.	13

- Figure 1.13 Exemple de TOS déterminé à partir du module du coefficient de réflexion $|\Gamma_e|$ en fonction de la fréquence pour une ligne triplaque terminée par une charge de 50 ohms. 15
- Figure 1.14 Variation de l'impédance caractéristique d'une ligne triplaque à âme plane en fonction de ses grandeurs géométriques d'après la formule (3), avec $\varepsilon_r = 1$ 16
- Figure 1.15 Comparaison de l'impédance caractéristique d'une ligne triplaque à âme plane calculée d'après l'expression (3) de Ghose^[5] avec nos mesures expérimentales. . . 17
- Figure 1.16 Comparaison de l'impédance caractéristique d'une ligne triplaque à âme cylindrique selon les calculs de Lo^[8] et Ishii^[7] avec nos mesures expérimentales. 18
- Figure 1.17 Dépendance de la fréquence de coupure du premier mode TE en fonction de l'écart entre les deux plans de masse, pour des impédances caractéristiques de 50 Ω et de 100 Ω 20
- Figure 1.18 Réponse en fréquence de la ligne triplaque circulaire représentée sur les figures 1.11 et 1.12. 21
- Figure 1.19 Comparaison de la transmission d'une ligne triplaque utilisant trois supports diélectriques en polystyrène puis trois en Téflon, de 12.7 mm de longueur..... 23
- Figure 1.20 Comparaison de la transmission d'une ligne triplaque utilisant trois supports diélectriques en Téflon de longueur L égale à 6.4 mm, puis à 12.7 mm. 24
- Figure 1.21 Comparaison de la réponse en fréquence d'une ligne triplaque en fonction du type de transition utilisé. En bleu : les cylindres sont vissés dans une bande centrale de 3.2 mm d'épaisseur. En rouge : les cylindres pincent une bande centrale de 1.6 mm d'épaisseur..... 26

- Figure 1.22 Comparaison de la réponse en fréquence d'une ligne triplaque en fonction du type de jonction utilisé. En bleu : cylindres vissés dans la bande centrale. En noir : une bande identique à celle du conducteur central forme un angle droit avec ce dernier. 27
- Figure 1.23 Comparaison de la réponse en fréquence d'une ligne triplaque en fonction du type de transition utilisé : angle droit et courbure progressive. 28
- Figure 1.24 Comparaison de la transmission entre une ligne triplaque fabriquée par nos soins et deux modèles de câbles coaxiaux différents (RG393/U et RG214/U)..... 30
- Figure 2.1 Schéma conceptuel de l'applicateur triplaque : des enceintes diélectriques de section rectangulaire (a) ou circulaire (b) sont disposées dans l'axe de la ligne triplaque. ... 32
- Figure 2.2 Classification des applicateurs de champ électrique HF selon Zakrzewski et Moisan^[23]..... 34
- Figure 2.3 Un applicateur de type "ligne de transmission" : le ou les tubes à décharge sont totalement immergés dans le champ électrique confiné à l'intérieur de la structure. 35
- Figure 2.4 Deux types d'applicateurs linéaires micro-rubans : (a) le plasma est directement entretenu à l'intérieur de la ligne micro-ruban et (b) le plasma est créé par un autre moyen, la ligne micro-ruban ne servant que de système d'accord d'impédance. ... 36
- Figure 2.5 Lancement d'ondes de surface et production du plasma correspondant à une extrémité de la ligne triplaque dans un tube de 6 mm de diamètre interne (Ar, 1 Torr, 600 MHz). 41
- Figure 2.6 Lancement d'ondes de surface à l'une des deux extrémités de la ligne triplaque dans un tube de 26 mm de diamètre interne, à 600 MHz et à 20 Torr. 42

<u>Figure 2.7</u>	Schéma du dispositif expérimental permettant d'entretenir des décharges triplaques.	4
<u>Figure 2.8</u>	Configurations des applicateurs triplaques adoptées chronologiquement au cours de notre étude.	48
<u>Figure 2.9</u>	Schémas de principe de la source de plasma triplaque montrant (a) les divers flux de puissance et (b) son circuit équivalent.	49
<u>Figure 2.10</u>	Pourcentage de puissance absorbée par les deux décharges en fonction de la puissance incidente, à 200 MHz et 600 MHz.	51
<u>Figure 2.11</u>	Comparaison des longueurs de colonnes de plasma entretenues par un applicateur triplaque (deux configurations) et par un lanceur d'ondes de surface (surfatron) en fonction de la puissance absorbée par la décharge.	53
<u>Figure 2.12</u>	Profils axiaux d'intensité lumineuse et d'intensité du champ électrique : système triplaque (Ar, 1 Torr, 600 MHz).	55
<u>Figure 2.13</u>	(a) Schéma d'un applicateur triplaque terminé par une jonction en court-circuit et (b) mesure des profils axiaux de l'intensité du champ électrique avec et sans plasma à 200 MHz.	56
<u>Figure 2.14</u>	Comparaison des profils latéraux (suivant y) d'intensité lumineuse obtenus pour les mêmes conditions opératoires entre la colonne d'une DOS et celle d'une décharge triplaque.	58
<u>Figure 2.15</u>	Photo d'une décharge triplaque bi-tube d'argon à 150 Torr dans des tubes de 26 mm de diamètre interne. Le débit du gaz est égale à 2 lsm (soit 1 lsm par tube).	60
<u>Figure 2.16</u>	Photos de deux décharges triplaques d'argon à la pression atmosphérique dans des tubes de 26 mm de diamètre interne à différents temps d'exposition.	62

<u>Figure 3.1</u>	Montage expérimental permettant la mesure de la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'un tube de 6 mm de diamètre interne et de 2 m de longueur.	66
<u>Figure 3.2</u>	Mesures de la pression à l'entrée (p_1) et à la sortie du tube (p_2) pour différentes puissances de pompage.	67
<u>Figure 3.3</u>	Variation (courbe d'étalonnage) de la pression à l'entrée et de celle à la sortie d'un tube de 6 mm de diamètre interne et de 2 m de longueur en fonction du débit d'argon incident.	68
<u>Figure 3.4</u>	Dispositif expérimental de mesure de l'absorption optique due aux métastables d'une décharge d'argon entretenue dans la structure triplaque.	70
<u>Figure 3.5</u>	Position axiale à laquelle s'effectue la mesure des métastables.	71
<u>Figure 3.6</u>	Effet de l'ajout d'azote dans la décharge d'argon sur le signal d'absorption optique.	72
<u>Figure 3.7</u>	Mesure d'absorption en fonction de la pression relevée du côté du système de pompage.	73
<u>Figure 3.8</u>	Mesure d'absorption (vanne totalement ouverte) en fonction (a) du débit et (b) de la pression déterminée à la sortie du tube (p_2), à l'abscisse de la mesure des métastables (p_0) et à l'entrée du tube (p_1).	74
<u>Figure 3.9</u>	Mesure d'absorption sur Ar I 763.5 nm en fonction (a) de la puissance incidente et (b) de la fréquence du générateur.	75
<u>Figure 3.10</u>	Schéma de principe d'une expérience de stérilisation de l'intérieur d'une tubulure effectuée à flux d'UVV constant.	78
<u>Figure 3.11</u>	Courbes de survie obtenues dans un plasma d'argon créé au moyen de la structure triplaque à partir de trois dépôts de nombre initial différent.	80

Figure 3.12 Évaluation par microscopie à balayage de la répartition de 10^6 spores dans un volume de 25 μ l d'eau déposées sur une surface plane de Téflon après séchage. Les spores sont regroupées à l'intérieur d'un cercle (a). Elles s'amassent à sa périphérie pour former une couronne (b) et se répartissent de manière plus ou moins homogène à l'intérieur du cercle (c). 81

Figure 3.13 Portoir pour le séchage des tubulures : les spores sont déposées sur des tubulures et la suspension sèche sans que les tubulures (déposées sur le portoir) ne bougent. Les spores se déposent principalement sur la face inférieure des tubulures, comme nous le laisse supposer la configuration du dépôt séché des billes d'encre de Chine . . . 83

Listes des notations et symboles

Acronymes

ATCC	American type culture collection
DOS	Décharge d'onde de surface
EM	Electromagnétique
HF	Haute fréquence
PA	Pression atmosphérique
PE	Polyéthylène
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
RF	Radio fréquence
TEM	Transverse electric and magnetic
TOS	Taux d'onde stationnaire
UV	Ultraviolet
UVV	Ultraviolet du vide (de 100 à 200 nm)

Abréviations

<i>B. subtilis</i>	<i>Bacillus subtilis</i>
°C	Degré Celcius
mLsm	Millilitre standard par minute

Symboles latins

A	Aire d'une section transversale d'un tube
A_L	Coefficient d'absorption totale d'une raie
D	Diamètre interne d'un tube

e	Charge de l'électron
f_{\max}	Fréquence maximale d'utilisation d'une ligne triplaque sur le mode purement TEM
h	Distance entre les plans de masse d'une ligne triplaque
m	Mode d'une onde de surface
m_e	Masse de l'électron
n_c	Densité critique
P_A	Puissance absorbée par le plasma
P_I	Puissance incidente
P_R	Puissance réfléchie
P_S'	Puissance rayonnée à l'extérieur de la ligne triplaque
P_S''	Puissance dissipée dans les conducteurs et le diélectrique d'une ligne triplaque
P_T	Puissance transmise
Q	Débit
Re	Nombre de Reynolds
t	Épaisseur de la bande conductrice centrale d'une ligne triplaque
V	Vitesse moyenne d'un écoulement
w	Largeur de la bande conductrice centrale d'une ligne triplaque
Z_0	Impédance caractéristique d'une ligne de transmission
Z_L	Impédance caractéristique d'une charge
Z_P	Impédance caractéristique de la ligne triplaque contenant les tubes diélectriques et le plasma

Symboles grecs

Γ_e	Coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne triplaque
Γ_s	Coefficient de réflexion à la sortie de la ligne triplaque
Δ_e	Plan d'entrée de l'applicateur
Δ_s	Plan de sortie de l'applicateur
ϵ_0	Permittivité diélectrique du vide
ϵ_{eff}	Permittivité relative effective

ε_r	Permittivité relative
λ_0	Longueur d'onde du champ électromagnétique dans le vide
λ_g	Longueur d'onde du champ électromagnétique guidée
μ	Viscosité dynamique d'un gaz
ρ	Densité d'un gaz
ω	Pulsation du champ électromagnétique

Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'un travail en équipe et je souhaite exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à tous ceux qui y ont participé.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur de recherche, le professeur Michel Moisan, pour le soutien constant qu'il a apporté à ce projet de recherche. Il m'a offert tous les moyens pour faciliter sa réalisation créant ainsi un climat de confiance et de sérénité que j'ai beaucoup apprécié. Il m'a également accordé une grande liberté d'action, tout en étant présent pour me conseiller grâce à ses connaissances dans ce domaine de recherche et rectifier, quand il le fallait, la trajectoire de mes travaux.

Par ailleurs, c'est au cours des étés 2003 et 2004 passés à Montréal que le professeur Zenon Zakrzewski a grandement fait avancer cette étude. En effet, il a proposé, d'une part, de nombreuses innovations techniques et, d'autre part, fait avancer la compréhension des phénomènes physiques. Ainsi, le temps qu'il a consacré à ce projet de même que son immense expérience dans le développement d'applicateurs de champ HF ont contribué à la réussite de ce projet. Le plaisir que j'ai eu à travailler en laboratoire provenait pour une grande part de son enthousiasme communicatif.

Les agents d'atelier Robert Lemay, Robert Martel, Jean-Sébastien Mayer, Martin Robert, Laurent Goyet et Tomy Arial ont joué un rôle de premier plan dans ce projet, non seulement en construisant les dispositifs expérimentaux, mais également en participant à leur conception. Ils m'ont par la même occasion initié aux règles élémentaires du dessin technique.

Je remercie également la professeure Joëlle Margot ainsi que le professeur Jean-Jacques Laurin pour avoir accepté d'être membres du jury de ce mémoire et pour les conseils scientifiques qu'ils m'ont prodigués.

Plusieurs personnes m'ont souvent "pris en main" au laboratoire. Tout d'abord, Yassine Kabouzi (mon "très cher cousin") m'a épaulé avec gentillesse et discernement, tout en collaborant activement à l'avancement de ce projet. Olivier Barthélemy m'a beaucoup appris dans le domaine de l'optique. Cela s'est avéré très utile pour aligner des lentilles, concevoir des collimateurs et prendre des photographies de plasma. De plus, son humour a créé la bonne humeur dans le

groupe et il m'a initié, comme il le dit si bien, aux "Grands Ballets Canadiens de Montréal". J'ai également eu une étroite collaboration avec Karim Benhacene-Boudam dans le domaine de la stérilisation, plusieurs résultats figurant dans le troisième chapitre de ce mémoire étant d'ailleurs directement issus de cette association. Je ne remercierai jamais assez Danielle Kéroack pour l'aide qu'elle m'a apportée tout au long de ces deux années, en particulier pour la mise en page et la relecture de l'ensemble du mémoire. J'exprime ma gratitude à Jacynthe Séguin qui m'a patiemment enseigné quelques rudiments de microbiologie et à qui je dois tout le travail microbiologique présenté au troisième chapitre.

J'aimerais également remercier d'autres collègues qui m'ont conseillé ou ont participé à certains travaux : Elisabeth Fafard, Eduardo Castaños Martinez, Bachir Saoudi et Kremena Makasheva.

Finalement, je remercie Natacha (ma tendre moitié) pour ses nombreuses relectures, pour m'avoir toujours soutenu et supporté (dans les deux sens du terme), particulièrement dans la difficile phase de l'écriture. Mes parents ont grandement amélioré ce mémoire dans sa forme et, même si je n'ai pas suivi leurs traces dans la carrière médicale, j'espère qu'ils sont fiers de moi.

Introduction

Au cours des dernières années, le Groupe de physique des plasmas de l'Université de Montréal s'est donné comme défis à relever la stérilisation d'instruments médicaux thermosensibles et la détoxification de gaz à effet de serre. Ces deux thématiques font partie d'une longue liste de procédés utilisant des plasmas de laboratoire : nous pouvons citer, entre autres, l'éclairage, l'analyse élémentaire, le traitement de surface et les lasers à gaz. Chacune de ces applications requiert des plasmas ayant des caractéristiques très différentes. Afin de s'adapter à ces demandes, il est nécessaire de développer des sources de plasma pouvant fonctionner dans des conditions opératoires particulières.

Parmi l'ensemble des plasmas de laboratoire, les décharges entretenues par des champs de fréquence radio et micro-ondes (conjointement référées au vocable haute fréquence (HF)) occupent une place de plus en plus importante. Plusieurs motifs expliquent cette tendance. En premier lieu, le coût de ces décharges est devenu attractif en raison de la diminution du prix des générateurs HF. Ensuite, comparativement aux décharges en courant continu, les décharges HF permettent de s'affranchir d'électrodes internes (pouvant contaminer le plasma) et sont généralement plus fiables.

Au sein de la famille des plasmas HF, les décharges d'ondes de surface constituent aujourd'hui le moyen le plus efficace de production de longues colonnes de plasma^[32]. Ces décharges peuvent être entretenues dans plusieurs gaz différents et dans de larges domaines de pression (de 10^{-4} Torr jusqu'à plusieurs fois la pression atmosphérique) et de fréquences (27 MHz à 10 GHz). Ces décharges sont celles dont la modélisation est la plus avancée et les deux dernières décennies ont vu en outre la création de divers applicateurs de champ HF (dispositifs appelés lanceurs d'ondes de surface) permettant d'entretenir efficacement ces décharges. Cependant, malgré toutes les qualités de ces sources de plasma, des limitations sont encore observées dans plusieurs applications industrielles.

Pour cette raison, nous avons cherché une autre manière de générer des plasmas HF, nos objectifs étant directement issus de ces limitations. En particulier, les applicateurs que nous souhaitons créer devront :

- 1) engendrer un plasma de faible température, compatible avec certaines applications telle la stérilisation en décharge d'instruments médicaux formés de polymères thermosensibles.
- 2) réduire les phénomènes de contraction et de filamentation observés à la pression atmosphérique dans des tubes de grand diamètre, car ceux-ci diminuent l'efficacité de plusieurs procédés comme la détoxification de gaz à effet de serre^[35].
- 3) posséder une bonne efficacité énergétique dans la plus grande plage de conditions opératoires possible (fréquence d'entretien du plasma, pression du gaz, etc.), afin de présenter un grande souplesse d'utilisation à leur utilisateur potentiel. L'idéal consisterait à s'affranchir des systèmes d'adaptation d'impédance généralement utilisés, à savoir les boîtes d'accord d'impédance en circuits LC aux radio-fréquences et les portions de lignes de transmission aux fréquences micro-ondes.
- 4) présenter un encombrement minimum afin de faciliter leur implantation industrielle. Le problème se pose aux fréquences inférieures à 915 MHz et aux puissances supérieures à 500 W où la technologie en guide d'onde (surfaguide^[53]) ne peut être employée (la taille des guides étant prohibitive) et où l'utilisation d'applicateurs basés sur des structures coaxiales (surfatron^[54], robox^[32]) est limitée en puissance.

Pour réaliser ces quatre objectifs, nous nous sommes tournés vers l'utilisation de lignes triplaques, technologie jusqu'à présent peu employée dans le domaine de la physique des plasmas. Dans le premier chapitre, nous présenterons l'étude de ces lignes qui offrent une grande souplesse d'utilisation dans la bande de fréquence désirée (50 - 2450 MHz) et dans le deuxième chapitre nous traiterons de leur exploitation pour générer des plasmas. Le troisième chapitre sera consacré à l'une des applications des décharges ainsi créées : la stérilisation de tubes creux de faible diamètre et thermosensibles. Une bibliographie comprenant les références citées dans chacun des chapitres est insérée à la fin du mémoire.

Chapitre 1

Les lignes triplaques et leurs principales caractéristiques

Les lignes triplaques sont des lignes de transmission qui, de par leur structure plane, sont utilisées de manière courante dans les circuits micro-ondes intégrés. Récemment, de nouvelles applications de ce lignes sont apparues telles que la mesure de la constante diélectrique et de la tangente de perte de matériaux. L'usage que nous allons en faire ici est très particulier puisqu'il s'agit, à notre connaissance, de la première exploitation de ce type de structure dans le but d'entretenir des décharges plasma à l'intérieur de tubes situés dans l'axe de la ligne. L'objectif de ce chapitre consiste à étudier les propriétés de ces lignes et à dégager leurs grandeurs physiques caractéristiques hors plasma.

1.1 Définition d'une ligne triplaque

Il existe deux grandes catégories de lignes de transmission, celles qui peuvent propager un mode fondamental TEM¹ (ou quasi-TEM) et celles qui supportent uniquement d'autres modes^[1]. La ligne triplaque appartient à la première catégorie. Sa configuration est représentée sur la figure 1.1 : une bande conductrice de largeur w et d'épaisseur t est centrée entre deux plaques conductrices, séparées d'une distance h , qui sont mises à un potentiel commun. L'intérieur de cette structure est rempli d'un diélectrique de permittivité relative ϵ_r .

¹ Ce terme signifie que les composantes E et H du champ électromagnétique dans la direction de propagation de l'onde sont nulles.

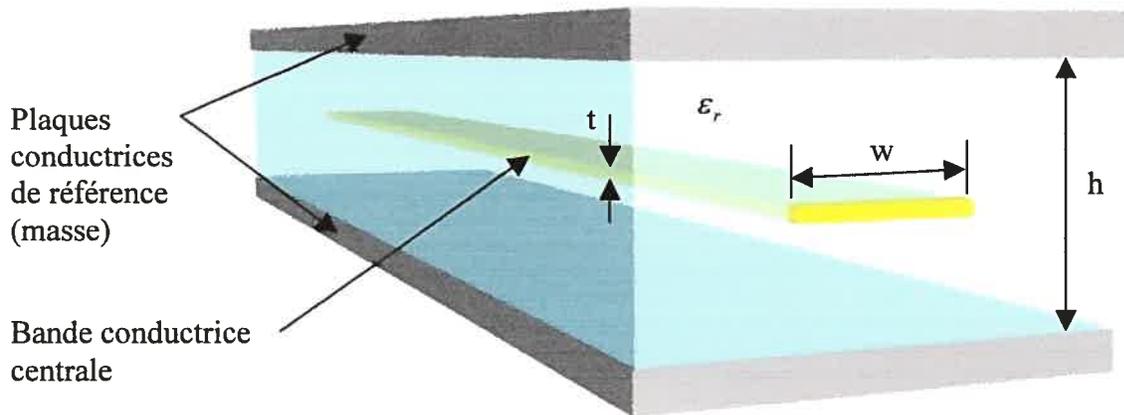


Figure 1.1 Schéma de la configuration d'une ligne triplaque et indication de ses grandeurs caractéristiques.

Les lignes de champ électrique sont indiquées sur la figure 1.2 qui constitue une coupe transversale de la figure 1.1. Cette représentation formelle a pour seule ambition de montrer au lecteur la direction du champ électrique et le fait qu'il y a concentration des lignes de champ dans la région de la bande centrale. Malgré la relative simplicité de ces lignes, un calcul rigoureux des lignes de champ présente des difficultés. Une analyse détaillée peut être obtenue dans la littérature scientifique^[2,3].

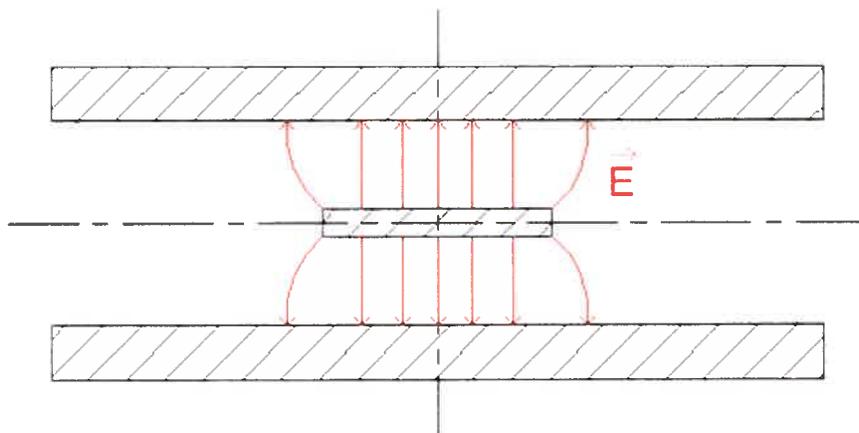


Figure 1.2 Représentation des lignes de champ électrique à l'intérieur d'une ligne triplaque.

Nous pouvons observer sur les deux figures ci-dessus qu'une ligne triplaque est une structure ouverte. Par conséquent, son utilisation peut s'avérer dangereuse pour l'utilisateur et perturber les

appareils de mesure. Cependant, si certaines conditions géométriques sont respectées, la ligne triplaque ne rayonne pas. La démonstration de cette affirmation est le sujet de la prochaine section.

1.2 Du câble coaxial à la ligne triplaque : vers une structure ouverte qui ne rayonne pas

La ligne triplaque représente la forme plane du câble coaxial. La figure 1.3 est une simulation de l'évolution conceptuelle d'une ligne coaxiale vers une ligne triplaque.

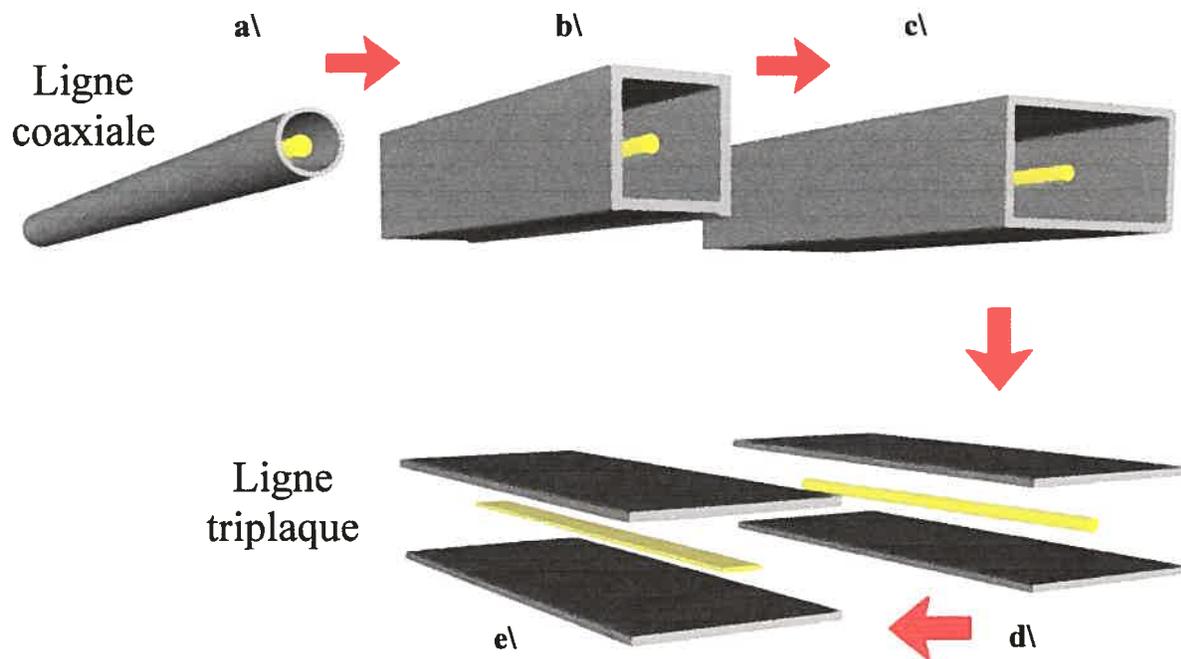


Figure 1.3 Évolution conceptuelle d'une ligne coaxiale vers une ligne triplaque.

Les lignes coaxiales et triplaques ont une caractéristique commune : toutes deux peuvent propager un mode fondamental TEM. Le câble coaxial (figure 1.3.a) étant une structure fermée, toute fuite d'énergie électromagnétique à l'extérieur de la ligne est impossible. De son côté, la ligne triplaque (figure 1.3.e) est une structure ouverte. Certaines restrictions géométriques doivent être imposées à la structure pour éviter la fuite d'énergie. Plus précisément, si la largeur des deux plaques conductrices de référence est suffisamment grande par rapport à l'écart entre celles-ci et par rapport à la largeur du conducteur central (figure 1.3.c), alors les plaques latérales d'un guide

classique peuvent être retirées (figure 1.3.d) sans perte d'énergie. Nous allons maintenant démontrer cette assertion de deux manières différentes.

1.2.1 Confinement du champ électrique dans la ligne triplaque

Tout d'abord, nous avons déterminé le degré de confinement du champ électrique dans la ligne triplaque. Pour ce faire, nous avons inséré une antenne électrique à l'intérieur de la structure. Avant tout, il importe de s'interroger sur les emplacements possibles de l'antenne. Nous avons vu antérieurement (figure 1.2) que les lignes de champs sont principalement concentrées dans la région de la bande centrale. C'est pourquoi les emplacements 1 et 2 sur le schéma de la figure 1.4 sont à proscrire. En effet, une antenne placée en ces lieux perturberait la propagation du champ électromagnétique. Ceci constituerait alors un diagnostic intrusif, ce que nous souhaitons éviter. Voilà pourquoi nous avons disposé l'antenne sur un des côtés de la bande centrale. C'est ce que nous avons voulu représenter sur le schéma de la figure 1.4.

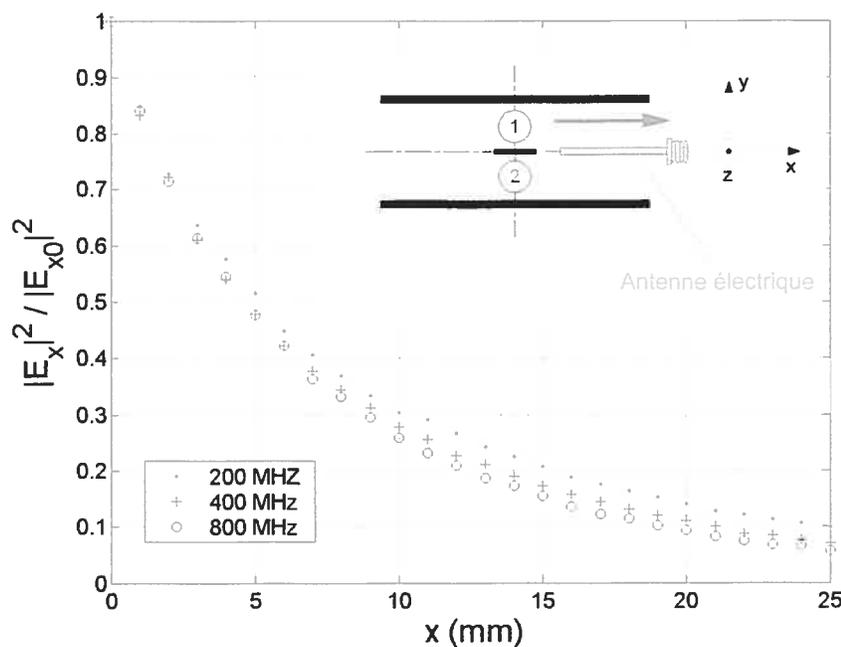


Figure 1.4 Variation de l'intensité de la composante E_x du champ électrique en fonction de la distance x vers l'extérieur d'une ligne triplaque définie par $w = 31.0$ mm et $h = 71.8$ mm, à trois fréquences du champ électrique.

L'expérience consiste à retirer progressivement l'antenne vers l'extérieur de la ligne (suivant l'axe des x) par pas de 1 mm. L'origine de l'axe des x est déterminée lorsque l'extrémité de la pointe² de l'antenne est située à 1 mm de la bande centrale. La hauteur de l'antenne est fixée tout au long de la mesure à celle de la bande centrale, c'est-à-dire en $y = 0$. Nous remarquons alors la décroissance très rapide de l'intensité du champ électrique qui est inférieure, dès 25 mm, à environ 10 % de sa valeur au niveau de la bande centrale. Il est intéressant de signaler que le confinement dépend peu de la fréquence utilisée entre 200 et 800 MHz.

Par la suite, de manière à observer l'influence de la géométrie de la ligne triplaque sur le confinement du champ électrique, nous avons effectué la même expérience à 200 MHz, mais avec une structure définie par $w = 26.4$ mm et $h = 24.0$ mm. Les résultats de la figure 1.5 démontrent que le confinement du champ électrique est meilleur lorsque la distance h entre les plaques est plus faible³. En effet, nous pouvons remarquer que pour cette nouvelle ligne triplaque, aucun champ électrique suivant x n'est détecté à partir de 20 mm de la bande centrale, contrairement au cas précédent.

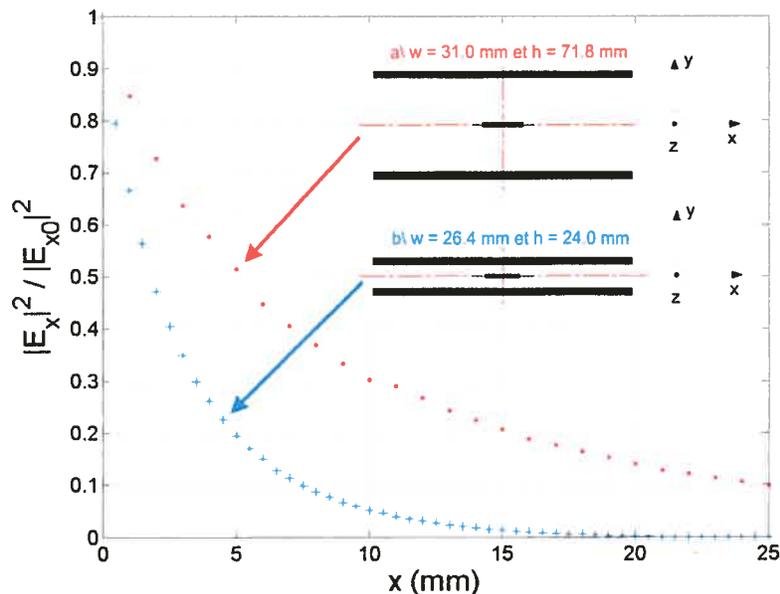


Figure 1.5 Comparaison du confinement du champ électrique en fonction des dimensions de la ligne triplaque.

² La pointe de l'antenne électrique est dirigée suivant l'axe des x, comme l'indique le schéma de la figure 1.4. Elle est constituée à partir d'un câble coaxial semi-rigide à l'extrémité duquel le conducteur externe et le diélectrique ont été enlevés sur une distance de 5 mm. Le diamètre de l'âme est égal à 0.4 mm tandis que le conducteur externe a un diamètre égal à 2.2 mm.

³ Toutefois, w a légèrement varié de 31.0 mm à 26.4 mm, mais ce changement est minime comparé à celui de h puisque cette dernière dimension a été réduite d'un facteur trois environ, passant de 71.8 mm à 24.0 mm.

En pratique, afin d'éviter toute fuite d'énergie à l'extérieur de la ligne, nous avons opté pour des largeurs de plaque égales à 90 mm lorsque $h = 24$ mm, et de 200 mm pour des dimensions de h supérieures.

1.2.2 Comparaison entre une structure ouverte et une structure fermée

Par la suite, nous avons employé une deuxième méthode de diagnostic afin de confirmer qu'une ligne triplaque ne rayonne pas. Nous avons utilisé une ligne triplaque ouverte (c'est-à-dire sans les plaques latérales) et la même structure mais fermée avec du papier métallique sur les côtés, servant ainsi de cage de Faraday. Nous avons alors mesuré au moyen d'un analyseur de réseau⁴ la transmission du signal pour chacune de ces lignes (figure 1.6).

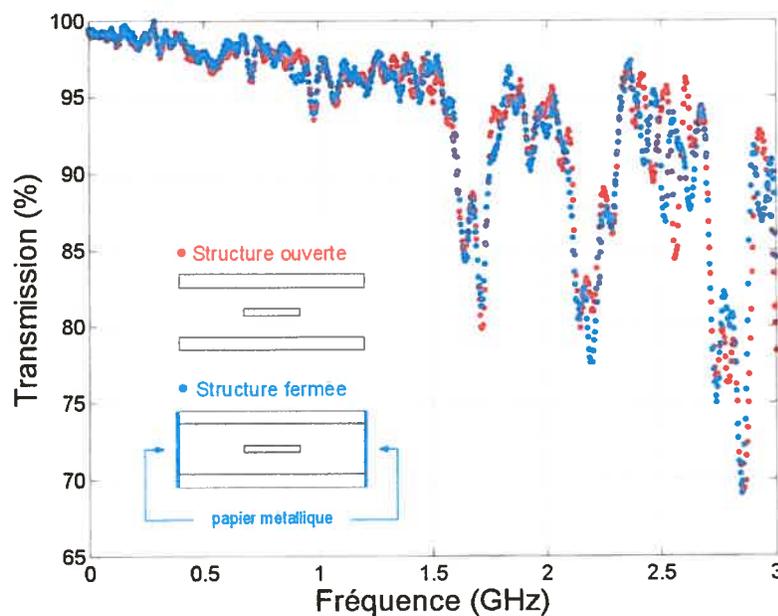


Figure 1.6 Mesures du pourcentage de transmission réalisées sur une ligne triplaque ouverte, puis sur la même ligne triplaque fermée.

En analysant les résultats, il apparaît clairement que les deux enregistrements se superposent. La présence du papier métallique ne modifie donc pas la transmission du signal. Autrement dit, le

⁴ L'analyseur de réseau utilisé est un HP8753C qui fonctionne entre 300 kHz et 3 GHz. Cet instrument est contrôlé par un système d'acquisition et d'enregistrement des données.

champ électromagnétique n'est pas perturbé, ce qui prouve son confinement à l'intérieur de la ligne triplaque.

Nous venons donc de démontrer que nous disposons d'une structure ouverte qui ne rayonne pas. Cette propriété a de nombreuses conséquences :

- Les utilisateurs et l'équipement sont protégés de tout rayonnement.
- L'impédance caractéristique de la ligne est définie de manière unique ainsi que la longueur d'onde du champ électromagnétique guidé : $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\epsilon_r}$ où λ_0 représente la longueur d'onde dans le vide.
- L'utilisation d'une cage de Faraday n'est pas nécessaire, ce qui facilite l'accès à des diagnostics à l'intérieur de la ligne. Nous pouvons ainsi introduire aisément une antenne électrique, afin d'obtenir des profils axiaux d'intensité relative de champ électrique (cela sera effectué au chapitre 2).
- Des supports métalliques peuvent alors servir de lien mécanique entre les plaques conductrices externes, sans risque d'interférence avec le champ de l'onde. Ces haubans assurent également le même potentiel aux deux plaques tout au long de la structure.

1.3 Construction et ingénierie

Nous allons présenter la manière dont nous avons construit ces lignes triplagues. Dans un premier temps, nous allons décrire le type de transition adopté entre un câble coaxial et une ligne triplaque. Par la suite, nous exposerons les schémas des lignes triplagues construites.

1.3.1 Transitions d'une ligne coaxiale vers une ligne triplaque

De nombreuses méthodes permettent d'effectuer une transition entre une ligne coaxiale et une ligne triplaque^[4]. Généralement, ce type de jonction est réalisé dans l'axe de la ligne ou par l'intermédiaire d'un orifice percé dans l'une des deux plaques de référence. Dans notre cas particulier, l'espace situé au-dessus, en dessous et dans l'axe de la bande centrale doit demeurer libre afin d'y insérer des enceintes à décharge (figure 2.1). Une solution consiste à réaliser la

transition sur un des côtés de la ligne triplaque (figure 1.7). Cette méthode va maintenant être présentée.

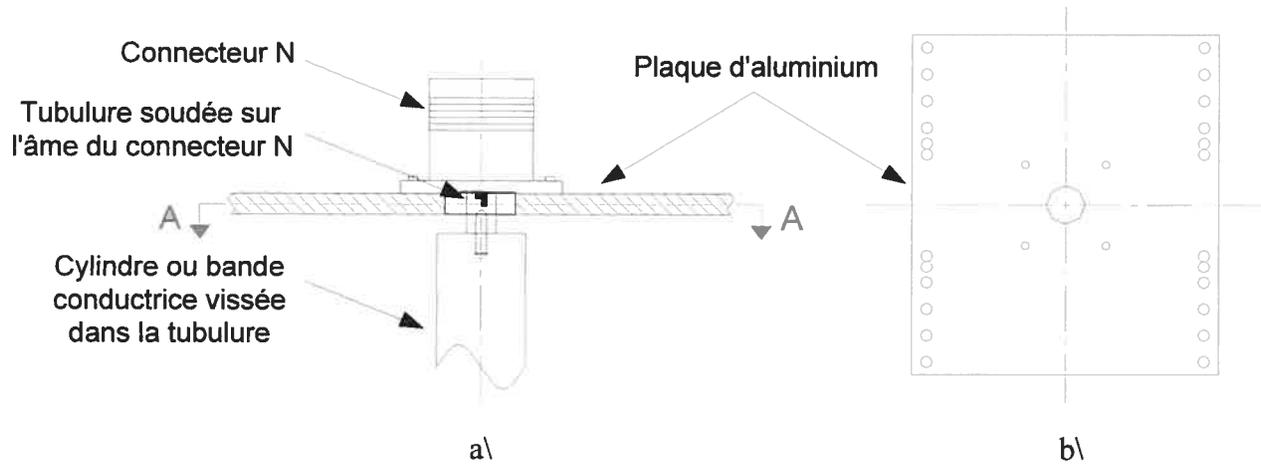


Figure 1.7 Transition d'un connecteur N à une ligne triplaque en vue de profil (a) et selon la coupe AA (b).

Un connecteur N de type standard est vissé sur une plaque d'aluminium. Cette dernière est percée afin de laisser passer l'âme du connecteur. Un petit tube en cuivre de 4.6 mm de diamètre externe et de 6 mm de longueur, la tubulure, est soudé sur l'âme du connecteur. Les cylindres ou bandes constituant le conducteur central de la ligne triplaque sont alors vissés dans la tubulure. Cette dernière et l'orifice de passage dans la plaque d'aluminium forment une section de ligne coaxiale (région en bleu sur la figure 1.7.a). Son impédance caractéristique est donnée par la formule suivante^[1] :

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1)$$

où a et b représentent respectivement le rayon externe de la tubulure et le rayon de l'orifice percé dans la plaque d'aluminium. Pour éviter toute mauvaise adaptation d'impédance, cette section de ligne coaxiale doit posséder une impédance caractéristique égale à 50Ω , ce qui impose un rapport des rayons égal à 2.3 (avec de l'air $\epsilon_r = 1$). En pratique, le diamètre de la tubulure ne doit pas être trop petit afin de pouvoir supporter de fortes puissances. Il est à noter, toutefois, que l'impédance caractéristique de cette portion de ligne a peu d'importance lorsque sa longueur est très faible devant la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique utilisé. Nous pouvons

observer sur la figure 1.7.b que la plaque d'aluminium est percée de nombreux orifices. Cela permet de faire varier, de manière discrète, l'écart h entre les plaques de 18.8 mm à 71.8 mm.

1.3.2 Schémas des lignes triplaques construites

Plusieurs lignes triplaques ont été fabriquées tout au long de ce travail, dans deux géométries différentes : linéaire et circulaire. Les figures 1.8 à 1.10 présentent une ligne tripaque linéaire vue en coupe transversale, vue de dessus (avec la plaque supérieure retirée) et vue de côté. Les figures 1.11 et 1.12 décrivent une ligne tripaque circulaire vue de dessus (avec la plaque supérieure retirée) et vue de côté.

Afin de fournir au lecteur une idée des dimensions, nous allons brièvement décrire ces deux structures. Dans les deux cas, les plaques de référence ont une épaisseur de 6.4 mm^5 et la bande conductrice centrale a une épaisseur t égale à 3.2 mm. Les plaques de l'applicateur linéaire mesurent 700 mm de longueur par 90 mm de largeur. Nous utilisons également des plaques de même longueur et de 200 mm de largeur lorsque l'écart h entre les plaques dépasse 30 mm, afin d'éviter toute fuite d'énergie à l'extérieur de la ligne. Quant aux plaques de l'applicateur circulaire (figure 1.12), elles mesurent 800 mm de diamètre. Cette géométrie de ligne est utilisée car elle permet de réduire l'encombrement de l'applicateur dans certaines applications (telle celle présentée au chapitre 3), ce qui peut s'avérer un atout important lors de son implantation industrielle.

⁵ De manière à uniformiser le système d'unité de mesure, toutes les dimensions utilisées dans ce mémoire sont exprimées dans le système métrique. Les tolérances de construction admises sont de l'ordre du $10^{\text{ème}}$ de millimètre.

Légende des figures 1.8 à 1.12

1. Plaque métallique supérieure
 2. Bande conductrice centrale
 3. Support diélectrique
 4. Support métallique

5. Plaque métallique inférieure
 6. Connecteur N
 7. Arrivée de la puissance
 8. Branchement possible d'une charge adaptée

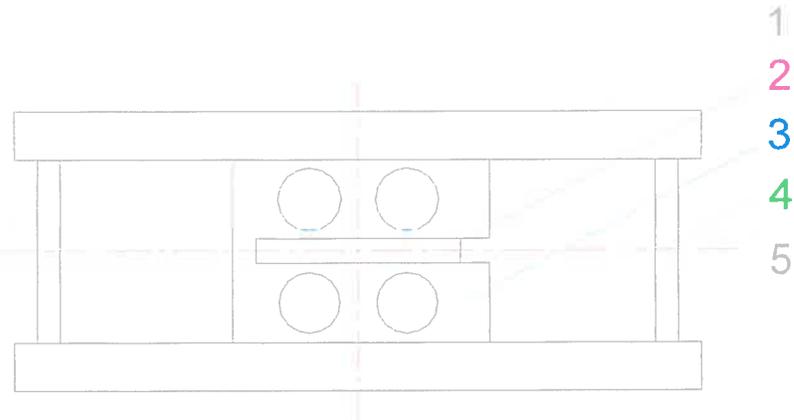


Figure 1.8 Coupe transversale de l'applicateur linéaire.

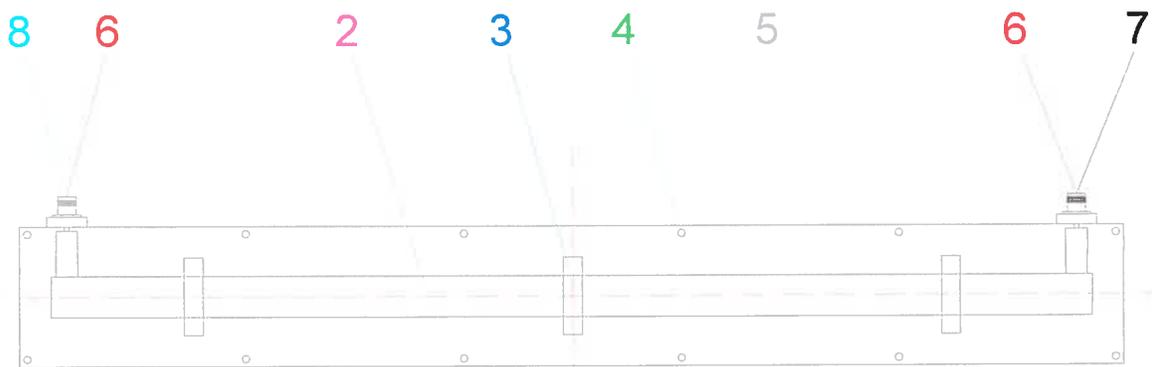


Figure 1.9 Vue de dessus de l'applicateur linéaire avec la plaque supérieure (1) retirée.

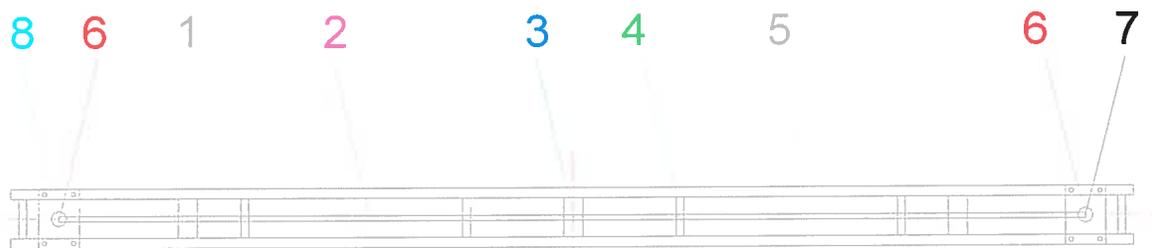


Figure 1.10 Vue de côté de l'applicateur linéaire.

Légende des figures 1.8 à 1.12

1. Plaque métallique supérieure
 2. Bande conductrice centrale
 3. Support diélectrique
 4. Support métallique

5. Plaque métallique inférieure
 6. Connecteur N
 7. Arrivée de la puissance
 8. Branchement possible d'une charge adaptée

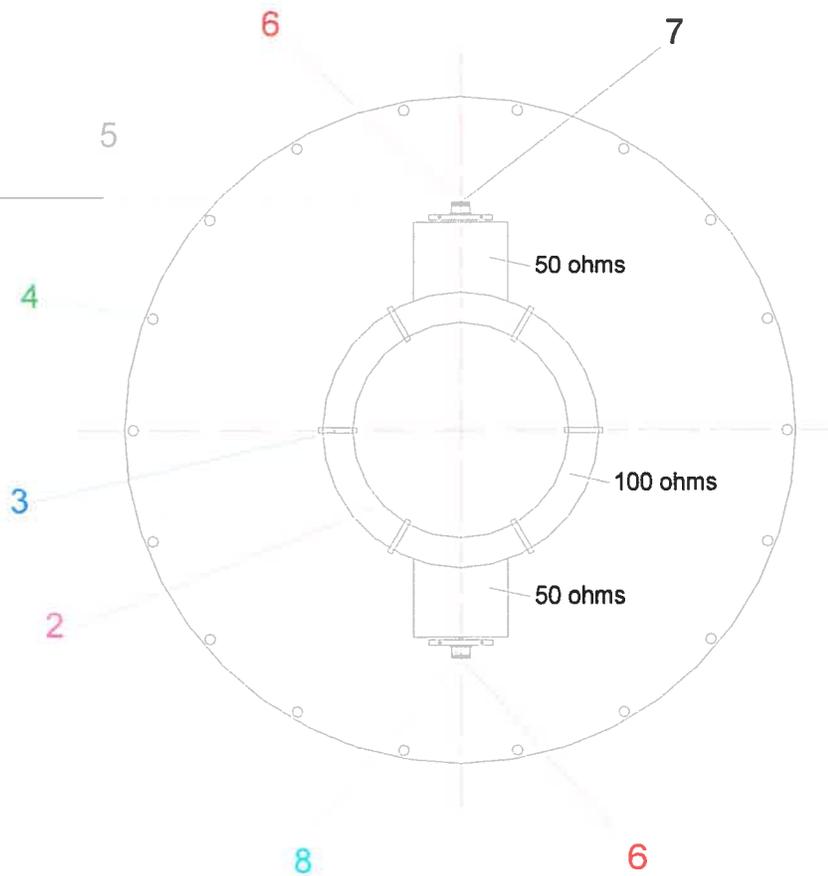


Figure 1.11 Vue de dessus de l'applicateur circulaire avec la plaque supérieure (1) retirée.

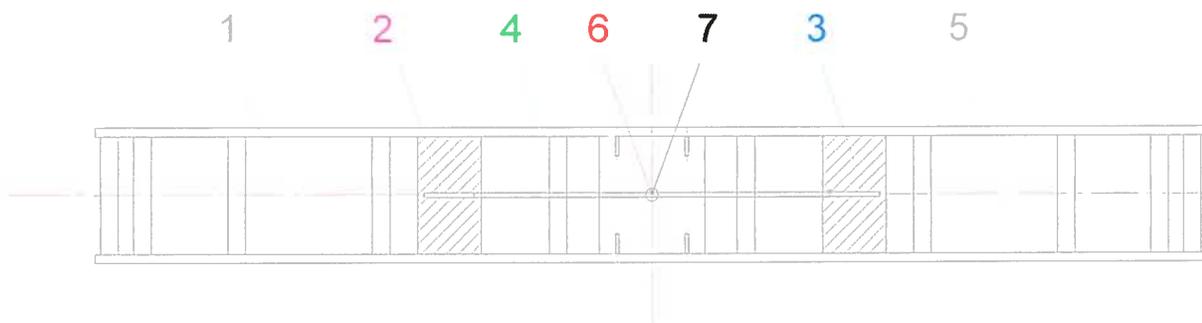


Figure 1.12 Vue de côté de l'applicateur circulaire.

1.4 Impédance d'entrée d'une ligne triplaque

L'impédance d'entrée d'une ligne de transmission est une grandeur importante puisque sa valeur détermine le coefficient de réflexion à son entrée. Elle dépend de nombreux paramètres que nous allons successivement présenter.

1.4.1 Impédance caractéristique : formules théoriques et mesures expérimentales.

L'impédance caractéristique d'une ligne de transmission (notée Z_0) est définie par le rapport entre le champ électrique et le champ magnétique. Si le champ électromagnétique de l'onde guidée possède une structure TEM, alors l'impédance caractéristique est définie de manière unique. Après avoir effectué une recherche bibliographique, nous avons réalisé que les différentes formules théoriques donnant l'impédance caractéristique de la ligne triplaque à âme plane fournissent les mêmes résultats (Howe^[4], Ghose^[5], Liao^[6]). Par contre, celles concernant la ligne triplaque à âme cylindrique divergent (Ishii^[7], Lo^[8]). La connaissance précise de l'impédance caractéristique de ces lignes étant fondamentale dans notre étude, nous avons entrepris de la mesurer expérimentalement. Pour ce faire, nous avons appliqué une méthode mise au point par Yue *et al.*^[9] qui utilise un analyseur de réseau. Selon cet auteur, l'impédance caractéristique peut être calculée en mesurant le taux d'onde stationnaire (TOS) en fonction de la fréquence à l'entrée d'une ligne triplaque terminée par une charge d'impédance Z_L (égale à 50 ohms). L'impédance caractéristique de la ligne est alors donnée par la formule suivante^[9,10] :

$$\left(\frac{Z_0}{Z_L}\right)^{\pm 1} = \sqrt{(TOS)_{\max} (TOS)_{\min}} \quad (2)$$

où l'exposant +1 est utilisé quand $Z_0 > Z_L$ et -1 quand $Z_0 < Z_L$.

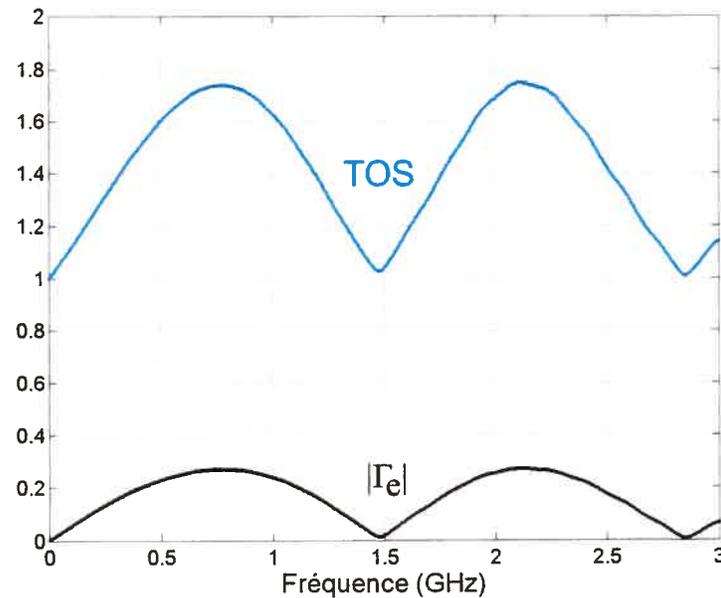


Figure 1.13 Exemple de TOS déterminé à partir du module du coefficient de réflexion $|\Gamma_e|$ en fonction de la fréquence pour une ligne triplaue terminée par une charge de 50 ohms.

Avec l'analyseur de réseau, les valeurs des maxima et des minima du TOS peuvent être déterminées à partir du module du coefficient de réflexion à l'entrée de la ligne triplaue (noté $|\Gamma_e|$), ce qui est illustré sur la figure 1.13.

1.4.1.1 Conducteur central de géométrie plane

Débutons notre analyse de l'impédance caractéristique des lignes triplaues par le cas de la ligne à âme plane. Des diverses expressions fournies dans la littérature^[4,5,6], nous retenons la formule simple présentée par Ghose^[5] :

$$Z_0 \sqrt{\epsilon_r} = 94.15 \left(\frac{w}{(h-t)} + 1.18 \frac{t}{h} + 0.45 \right)^{-1} \quad (3)$$

où Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne et où toutes les autres notations sont définies sur la figure 1.1. Nous avons choisi de représenter sur la figure 1.14 la dépendance de Z_0 en fonction du rapport w/h . Chaque courbe est obtenue pour une épaisseur t différente. En analysant les

résultats, nous observons la décroissance de Z_0 lorsque la largeur w augmente ou que la distance h diminue.

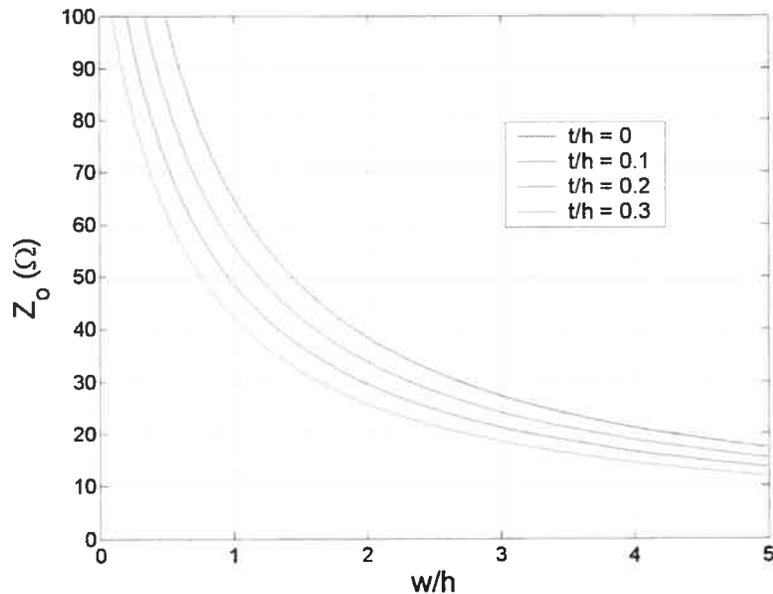


Figure 1.14 Variation de l'impédance caractéristique d'une ligne triplaque à âme plane en fonction de ses grandeurs géométriques d'après la formule (3), avec $\epsilon_r = 1$.

Passons maintenant aux résultats expérimentaux. Une photo d'une des lignes triplaques (avec la plaque supérieure retirée) dont nous souhaitons déterminer l'impédance caractéristique est insérée dans la figure 1.15. Chacun des six points expérimentaux correspond à une largeur w de la bande centrale différente. Quant à la distance h entre les plaques, cette dernière demeure inchangée ($h = 24.0$ mm) pour chacune des expériences. Les six bandes utilisées possèdent la même épaisseur t égale à 3.2 mm. Nous avons donc inséré dans la formule de Ghose^[5], pour le paramètre $\frac{t}{h}$, la valeur $\frac{3.2 \text{ mm}}{24.0 \text{ mm}} = 0.133$.

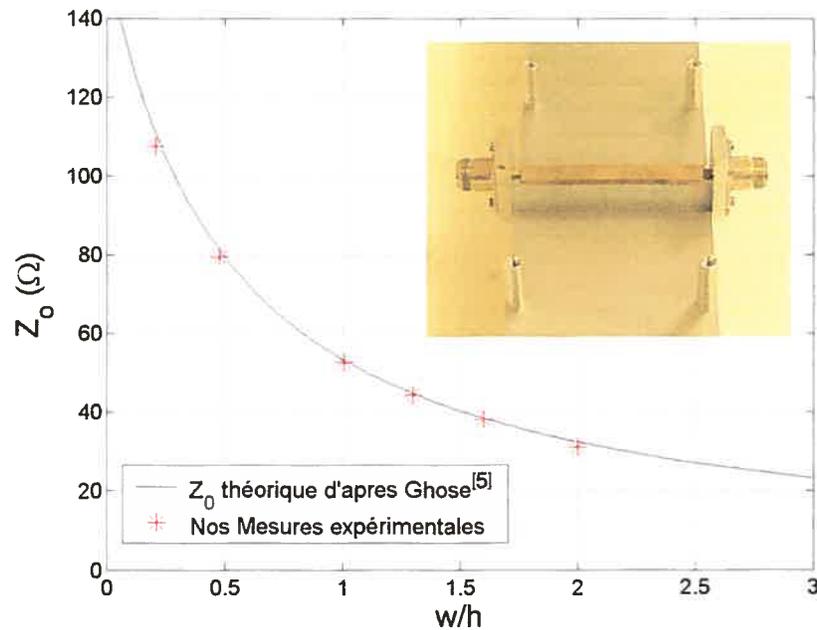


Figure 1.15 Comparaison de l'impédance caractéristique d'une ligne triplaque à âme plane calculée d'après l'expression (3) de Ghose^[5] avec nos mesures expérimentales (0 à 3 GHz).

Nous pouvons observer sur la figure 1.15, l'excellente concordance entre la formule théorique donnée par Ghose^[5] et nos mesures expérimentales.

1.4.1.2 Ligne triplaque avec âme cylindrique

Plusieurs formules d'impédance caractéristique de ligne triplaque à âme cylindrique ont été publiées^[7,8] qui diffèrent suivant leurs auteurs (figure 1.16). L'impédance fournie par Lo^[8] est plus élevée que celle donnée par Ishii^[7] pour des valeurs de d/h comprises entre 0.2 et 0.9. Sur cette même figure, nous observons que nos résultats expérimentaux plaident clairement en faveur de la formule fournie par Ishii^[7].

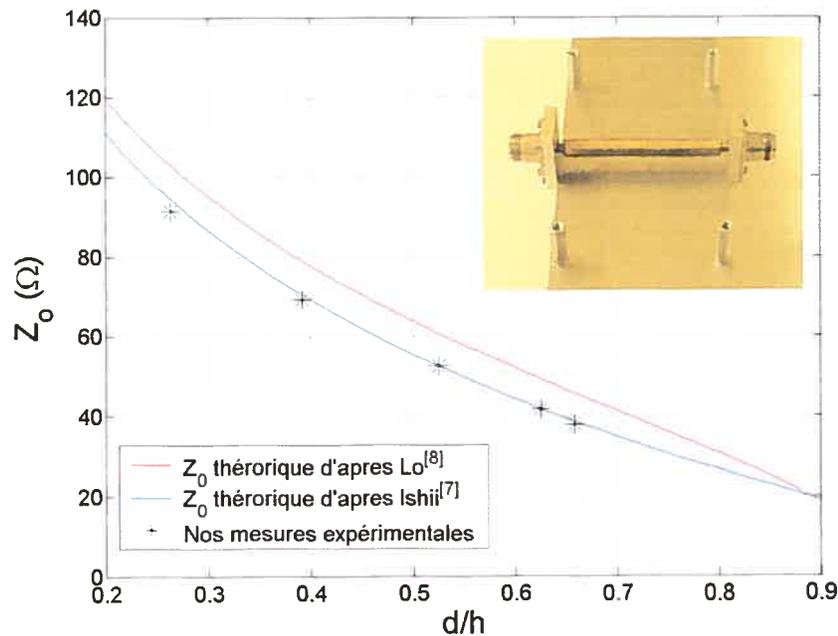


Figure 1.16 Comparaison de l'impédance caractéristique d'une ligne triplaquée à âme cylindrique selon les calculs de Lo^[8] et Ishii^[7] avec nos mesures expérimentales (0 à 3 GHz).

Pour nous guider dans la réalisation des lignes triplaquées à âme cylindrique, nous avons par conséquent choisi la formule donnée par Ishii^[7] qui, dans le cas où l'influence des plaques latérales sur la valeur de Z_0 est négligeable, se réduit à l'expression suivante^[19] :

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{h}{d} \right) + 14.5 \quad (4)$$

où d et h représentent respectivement le diamètre du cylindre conducteur et la distance entre les plans de masse.

1.4.2 Modes de propagation et extension d'échelle : fréquence de coupure du premier mode d'ordre supérieur.

L'utilisation des lignes triplaquées présentée dans ce travail est peu commune dans la mesure où la distance entre les plaques est beaucoup plus grande que dans les applications courantes de ces lignes. Voilà pourquoi une question fondamentale est rapidement apparue au cours de nos recherches : une ligne triplaquée fonctionne-t-elle de la même manière si nous effectuons une

extension d'échelle de sa structure? Nous savons que pour éviter toute fuite d'énergie à l'extérieur de la ligne, l'augmentation de la distance entre les plaques requiert l'élargissement de ces dernières (section 1.2). Il faut également s'assurer que l'impédance caractéristique de la ligne demeure inchangée en ajustant en conséquence la largeur de la bande centrale selon l'équation (3) : il faut garder approximativement (en négligeant l'épaisseur de la bande) un rapport $\frac{w}{h}$ constant. Finalement, nous devons nous interroger sur le domaine de validité de l'équation (3). Jusqu'à présent, nous avons affirmé que le champ électromagnétique se propageant à l'intérieur de la structure est TEM. Ceci n'est plus valable lorsque la largeur de la bande centrale ou l'écart entre les plaques devient égal à une certaine fraction de la longueur d'onde. Plus précisément, la fréquence maximale d'utilisation de la ligne sur le mode purement TEM est donnée par l'équation suivante^[14] :

$$f_{\max} (GHz) = \frac{15}{h\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{\left(\frac{w}{h} + \frac{\pi}{4}\right)} \quad (5)$$

où w et h sont en cm. Elle correspond à la fréquence de coupure du premier mode TE d'ordre supérieur susceptible d'être excité. Nous avons représenté sur la figure 1.17 la dépendance de cette fréquence de coupure en fonction de l'écart h entre les deux plans de masse, pour deux valeurs d'impédance caractéristique, soit 50 ohms et 100 ohms. D'après l'équation (5), la variation de f_{\max} est en $1/h$ pour un rapport fixe de w/h , donc pour une impédance caractéristique donnée (en négligeant l'épaisseur t). Prenons un exemple pour bien assimiler l'importance de cette formule. Si la distance entre les plaques est supérieure à 3 cm, alors nous pouvons prédire que l'utilisation d'applicateurs triplaques à 2.45 GHz n'est pas envisageable pour former une ligne de 50 ohms.

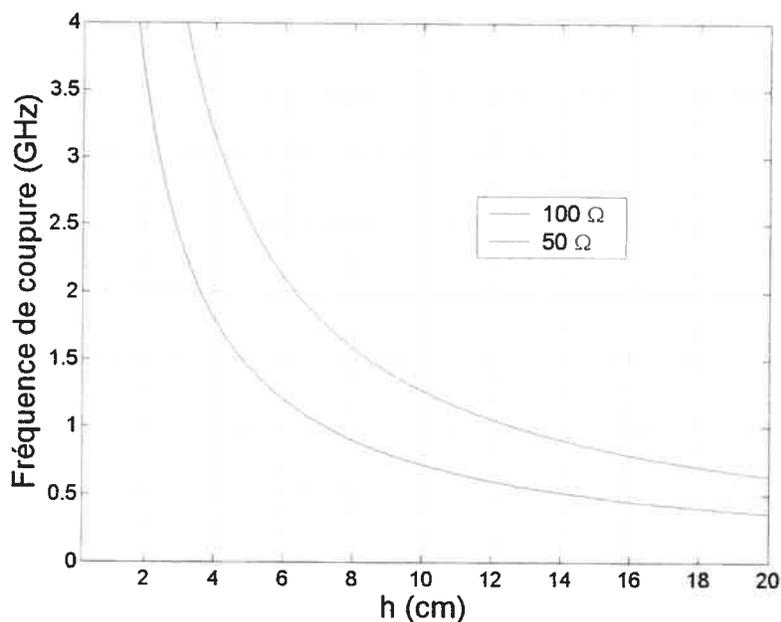


Figure 1.17 Dépendance de la fréquence de coupure du premier mode TE en fonction de l'écart entre les deux plans de masse, pour des impédances caractéristiques de 50 Ω et de 100 Ω .

À cette fréquence, la longueur d'onde du champ électromagnétique dans le vide est égale à 12.2 cm. Nous retiendrons donc que l'écart entre les plaques ne doit pas dépasser environ un quart de longueur d'onde.

Après avoir présenté la théorie, il importe de la confronter à la pratique. Pour cela, nous avons soumis à l'analyseur de réseau la ligne circulaire représentée sur les figures 1.11 et 1.12. Nous observons sur la figure 1.18 qu'au-dessus d'une certaine fréquence, de l'ordre de 800 MHz, la qualité de la transmission se dégrade rapidement. Nous pouvons donc utiliser cette ligne triplaque de manière efficace que pour des fréquences inférieures à 800 MHz. En insérant dans l'équation (5) les dimensions⁶ ($w = 112.6$ mm et $h = 84.7$ mm) de cette ligne que nous avons construite, nous trouvons $f_{\max} = 850$ MHz. Par conséquent, ce résultat constitue un bon accord entre l'expérience et la théorie.

⁶ D'après la figure 1.17, les portions de 50 ohms ont une plus basse fréquence de coupure que celles de 100 ohms. Ce sont donc les deux portions de 50 ohms qui limitent la plage d'utilisation de cette ligne et que nous devons donc utiliser dans l'équation (5).

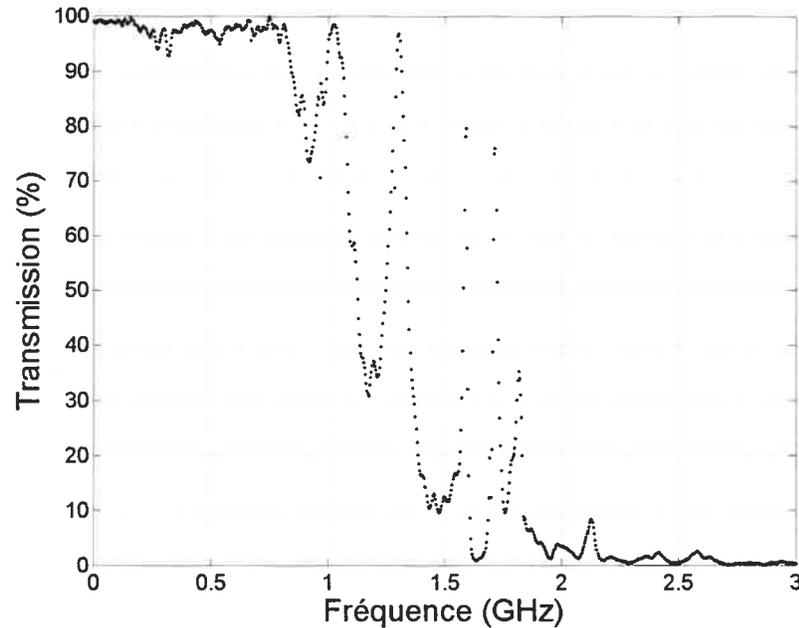


Figure 1.18 Réponse en fréquence de la ligne triplaque circulaire représentée sur les figures 1.11 et 1.12.

En conclusion, une ligne triplaque constitue un filtre passe-bas, c'est-à-dire un dispositif pouvant transmettre efficacement des ondes électromagnétiques dont les fréquences sont inférieures à la fréquence de coupure donnée par l'équation (5).

1.4.3 Transitions et discontinuités

Nous allons maintenant discuter d'un sujet que nous avons ignoré lors de nos premières expériences et qui s'est révélé par la suite d'une importance considérable. Nous allons aborder l'étude des discontinuités présentes dans la ligne triplaque et qui peuvent altérer la propagation du champ électromagnétique.

1.4.3.1 Influence de la nature et de la géométrie des supports diélectriques

Tout comme les câbles coaxiaux, les lignes triplaques utilisent des supports en matériau diélectrique afin de maintenir la bande conductrice centrée entre les deux plans de masse. Notre objectif consiste à concevoir des supports diélectriques permettant d'obtenir peu de réflexion pour des fréquences inférieures à 3 GHz. Par conséquent, nous avons sélectionné la méthode la plus

appropriée pour atteindre ce but parmi celles proposées dans la littérature scientifique (Rizzi^[11], Harvey^[12]). Dans un premier temps, nous allons décrire cette méthode, puis nous l'appliquerons à nos expériences.

Deux éléments relatifs aux supports (leur permittivité et leur longueur) peuvent influencer la propagation du champ électromagnétique. Tout d'abord, commençons par étudier le premier paramètre. En désignant par Z_0 l'impédance caractéristique de la ligne triplaquée sans support diélectrique, l'impédance caractéristique de la portion de ligne contenant le support en Téflon est donnée par

$$Z_1 = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6)$$

où ϵ_{eff} représente la permittivité relative effective⁷ de la portion de ligne où est situé l'espaceur. Comme nous pouvons l'observer sur le schéma de la figure 1.8, les supports diélectriques ne couvrent pas la totalité de la largeur de cette portion de ligne. Une partie des lignes de champs passe à l'intérieur du support alors qu'une autre partie traverse l'air. Par conséquent, si ϵ_r représente la permittivité relative du support diélectrique, alors

$$1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r . \quad (7)$$

D'après les relations (6) et (7), la portion de ligne contenant le support constitue une ligne de transmission d'impédance plus faible que Z_0 . Afin de pouvoir utiliser la ligne triplaquée de manière efficace jusqu'à 3 GHz, nous devons déterminer à partir de quelle fréquence la présence des supports diélectriques risque d'affecter la propagation du champ électromagnétique.

Nous avons commencé par utiliser du polystyrène de faible densité, donc de permittivité approchant celle de l'air. Nous avons également utilisé du Téflon qui possède à la fois une faible permittivité relative ($\epsilon_r = 2.1$) et une température de fusion élevée ($270 \text{ }^{\circ}\text{C}$) pour un polymère. Nous comparons sur la figure 1.19, la transmission du signal dans deux lignes triplaquées de géométrie identique utilisant respectivement trois supports en polystyrène et trois supports en Téflon. Dans les deux cas, ceux-ci ont une longueur L égale à 12.7 mm.

⁷ La permittivité effective peut être interprétée comme la constante diélectrique d'un milieu homogène qui remplacerait l'air et le diélectrique dans la ligne. Cette notion est habituellement employée dans le cas de la ligne micro-ruban^[11].

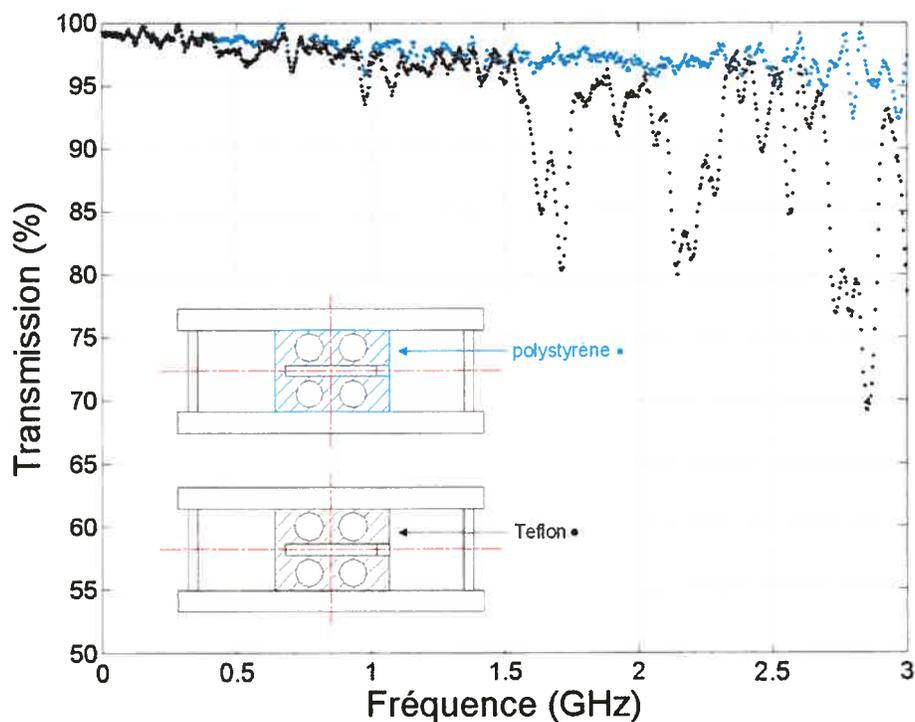


Figure 1.19 Comparaison de la transmission d'une ligne triplaque utilisant trois supports diélectriques en polystyrène puis trois en Téflon, de 12.7 mm de longueur.

Nous pouvons observer que le matériau de plus faible permittivité (le polystyrène) permet d'obtenir la meilleure transmission. Malheureusement, le polystyrène résiste mal à l'échauffement et se révèle également difficile à découper, si bien que nous l'avons par la suite abandonné.

Nous avons alors réduit la longueur des supports en Téflon de 12.7 mm à 6.4 mm. Ceci a permis d'améliorer la transmission du signal aux fréquences supérieures à 1.5 GHz (figure 1.20).

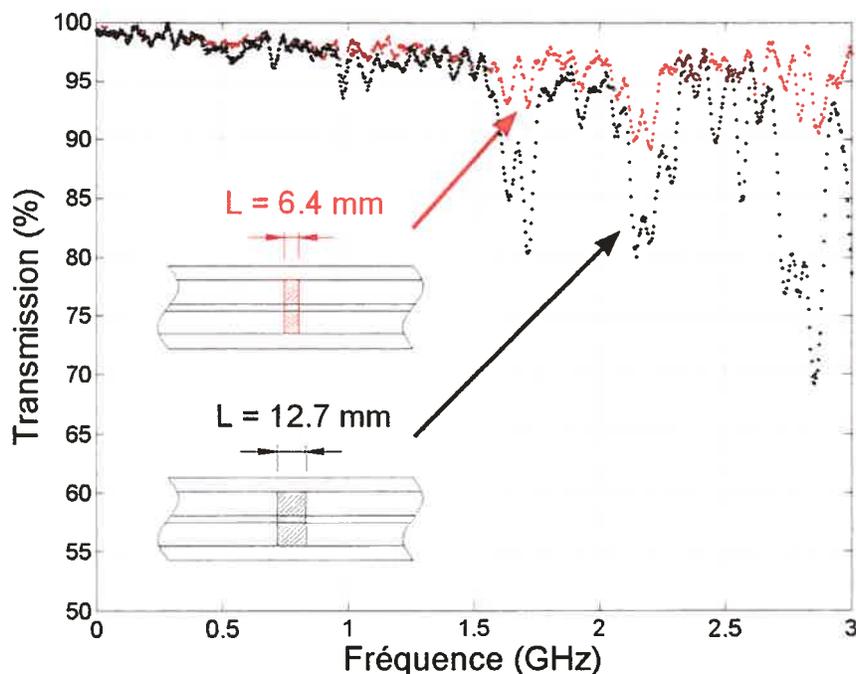


Figure 1.20 Comparaison de la transmission d'une ligne triplaque utilisant trois supports diélectriques en Téflon de longueur L égale à 6.4 mm, puis à 12.7 mm.

Finalement, nous avons recherché, pour les supports diélectriques, un compromis entre une faible permittivité, une longueur réduite et une bonne rigidité mécanique. Compte tenu de ces trois paramètres, le Téflon s'est avéré être un matériau approprié.

1.4.3.2 Étude des jonctions et transitions affectant la bande conductrice centrale

En plus des supports diélectriques, il existe d'autres sources de perturbation pouvant influencer la propagation du champ électromagnétique. Les transitions affectant la bande centrale, tels un angle droit ou un changement abrupt de sa largeur, ont été étudiées par Bahl et Garg^[14]. Ces auteurs les ont répertoriées et ont donné dans chaque cas une représentation en termes de circuit équivalent permettant d'en tenir compte. Plusieurs méthodes ont été développées afin de réduire leurs effets^[14,11].

Nous avons négligé au début de nos recherches l'influence que pouvaient avoir ces transitions sur la propagation du champ électromagnétique. Par la suite, nous avons réalisé que

celles-ci représentent une importante source de réflexion. Nous avons alors cherché à modifier pas à pas ces jonctions de manière à en réduire les effets. Nous avons employé une méthode systématique consistant à enregistrer la transmission du signal, pour chaque transition étudiée, à l'aide de l'analyseur de réseau. Lors de ces expériences, nous avons maintenu l'impédance caractéristique du corps de la ligne constante de manière à isoler l'effet des transitions.

Nos premiers essais ont été effectués avec des jonctions formées d'un cylindre conducteur, à angle droit, venant pincer une bande centrale de 1.6 mm d'épaisseur (photo encadrée en rouge sur la figure 1.21). Une fente a été percée dans le cylindre afin d'y insérer la bande sur une longueur de 4 mm. Un orifice a également été foré dans le cylindre pour diminuer sa raideur afin de permettre de serrer la bande dans le cylindre par l'intermédiaire d'une vis. Ce type de transition a été écarté pour trois raisons :

- Due à sa trop faible épaisseur, la rigidité mécanique de la bande centrale s'est avérée insuffisante pour l'empêcher de fléchir entre les deux plaques. Cela rendait nécessaire l'utilisation de nombreux supports diélectriques, régulièrement espacés le long de la ligne. Ces derniers pouvaient alors engendrer des réflexions (voir la section précédente).
- Le contact électrique entre le cylindre et la bande n'était pas très performant.
- La création de ces cylindres nécessitait une longue période de fabrication.

Une étape décisive a été franchie lorsque l'épaisseur de la bande centrale a été augmentée à 3.2 mm. En effet, la rigidité de la bande centrale étant alors nettement meilleure, il a été possible de réduire le nombre de supports à seulement trois. De surcroît, nous avons pu percer cette bande dans son épaisseur⁸ et cela nous a permis d'y visser facilement les cylindres, sans devoir démonter la ligne (voir la photo encadrée en bleu sur la figure 1.21).

⁸ Puisque l'épaisseur t a été augmentée de 1.6 mm à 3.2 mm, la largeur w de la bande centrale a été diminuée afin de conserver une impédance caractéristique identique (50 ohms).

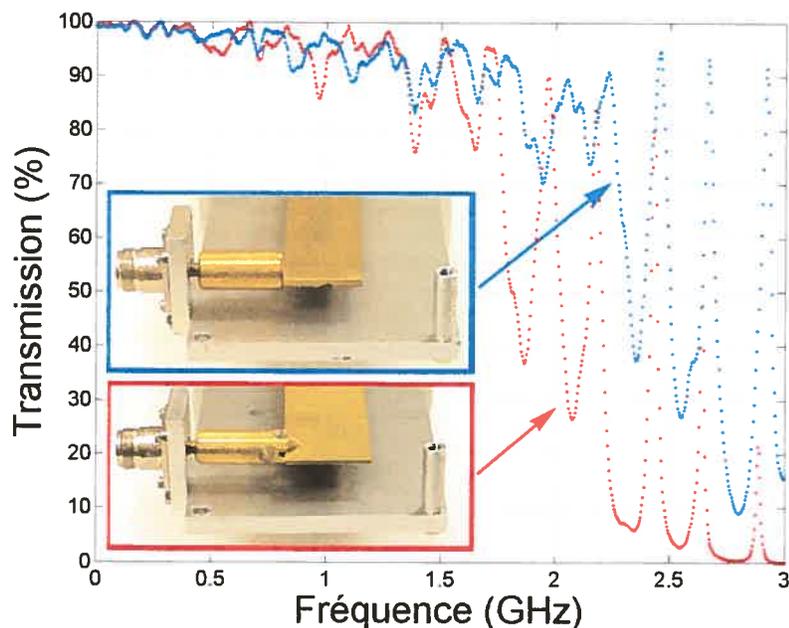


Figure 1.21 Comparaison de la réponse en fréquence d'une ligne triplaque en fonction du type de transition utilisé. En bleu : les cylindres sont vissés dans une bande centrale de 3.2 mm d'épaisseur. En rouge : les cylindres pincents une bande centrale de 1.6 mm d'épaisseur.

En comparant la réponse en transmission d'une ligne utilisant successivement ces deux types de transition (figure 1.21), il apparaît que les fréquences en dessous d'approximativement 1.5 GHz sont peu affectées par la nature de la transition. Pour des fréquences supérieures, la transmission du signal est meilleure lorsque le cylindre est vissé dans la bande. Néanmoins, ce nouveau système, bien que plus efficace, ne nous permet pas d'obtenir une bonne qualité de transmission au-dessus d'environ 0.7 GHz. C'est pourquoi nous avons tenté de remédier à ce problème en utilisant, comme transition, une jonction de configuration identique à celle de la bande centrale mais formant un angle droit à chacune des deux extrémités de la ligne triplaque (voir la photo encadrée en noir sur la figure 1.22). Nous pensions, en effet, que la rupture de géométrie, d'un cylindre à une bande, pouvait être à l'origine de cette mauvaise transmission. Toutefois, le résultat s'est avéré pire (figure 1.22).

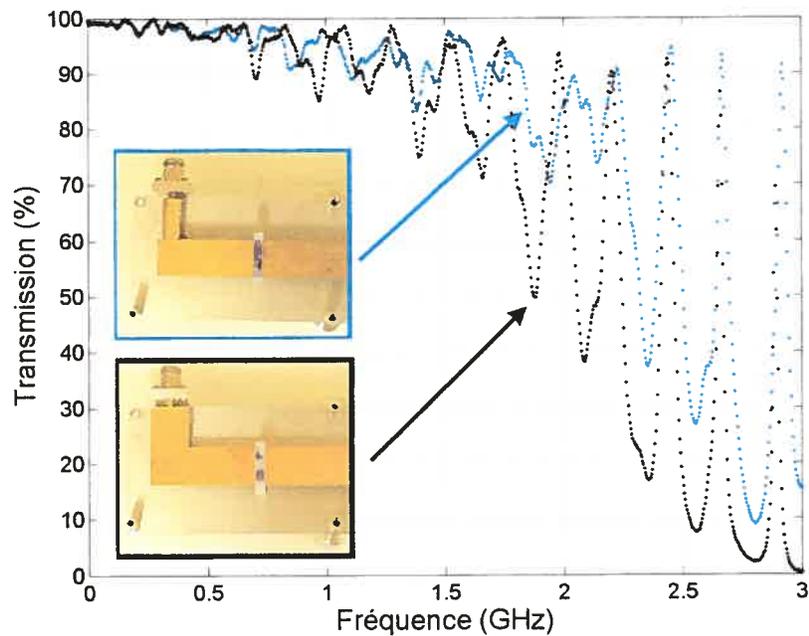


Figure 1.22 Comparaison de la réponse en fréquence d'une ligne triplaque en fonction du type de jonction utilisé. En bleu : cylindres vissés dans la bande centrale. En noir : une bande identique à celle du conducteur central forme un angle droit avec ce dernier.

Finalement, nous avons testé des transitions utilisant une bande courbe (voir la photo encadrée en rouge sur la figure 1.23). En effet, Rizzi^[11] conseille d'utiliser ce type de jonction afin d'accroître la qualité de la transmission. En pratique, nous avons choisi de travailler avec un rapport entre le rayon de courbure et la largeur de la bande égal à :

$$\frac{R}{w} = \frac{42 \text{ mm}}{26.4 \text{ mm}} = 1.6$$

De cette façon, nous avons pu fortement réduire les réflexions causées par cet angle droit pour des fréquences inférieures à 3 GHz, comme le montre la figure 1.23, en rouge.

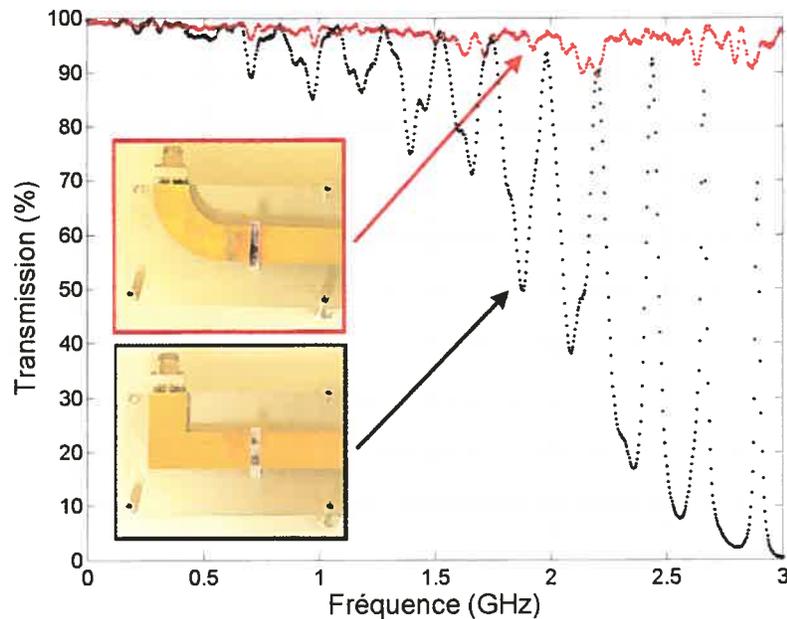


Figure 1.23 Comparaison de la réponse en fréquence d'une ligne triplaque en fonction du type de transition utilisé : angle droit et courbure progressive.

En somme, il importe de se rappeler qu'un infime changement de la géométrie des transitions entraîne d'importants effets électriques aux fréquences micro-ondes. Afin d'optimiser la transmission du signal dans une large gamme de fréquences, nous devons donc tenir compte de ces détails structuraux.

1.5 Tenue en puissance des lignes triplaques

Afin de pouvoir utiliser ces lignes à plusieurs centaines de watts, il importe de nous assurer de leur bonne tenue en puissance. Deux éléments diminuent la puissance maximale qu'une ligne triplaque peut admettre, les claquages électriques et les pertes (par effet Joule) dans le diélectrique et les conducteurs. Ainsi, les claquages électriques qui apparaissent entre la bande conductrice centrale et les plaques réduisent la tenue en tension crête-à-crête, donc en puissance. Ensuite, l'échauffement du conducteur central et du diélectrique limite la puissance moyenne admissible pour maintenir l'intégrité de la ligne^[13]. En ce qui concerne ces claquages, Bahl et Garg^[14] conseillent d'arrondir les bords de la bande conductrice centrale afin de réduire la concentration du champ à ces extrémités. Quant aux réflexions (dues à une mauvaise adaptation

d'impédance), elles induisent une diminution de la puissance maximale admissible. Dans le pire des cas, un coefficient de réflexion égal à l'unité (réflexion totale) doublera la tension maximum sur la ligne, ce qui diminuera la tenue en puissance par un facteur quatre^[1].

Récemment, Zakrzewski^[19] a développé un applicateur (lanceur d'onde de surface) basé sur la technologie triplaque et pouvant supporter des puissances au moins égales à 2.5 kW⁹. Nos lignes triplaques devraient également fonctionner sans difficulté majeure puisque, comparativement à Zakrzewski^[19], nous avons travaillé non seulement avec des puissances inférieures, mais également avec des distances entre les plans de masse supérieures (le risque de claquage diminue lorsque h augmente). En pratique, nous n'avons rencontré aucun problème et ce, même pour des puissances allant jusqu'à 400 W à 2.45 GHz en mode d'onde stationnaire.

1.6 Qualité de la transmission des lignes triplaques comparée à celle des câbles coaxiaux classiques

Nous souhaitons évaluer la qualité de la transmission des lignes triplaques que nous avons construites avec celles de câbles coaxiaux classiques. Pour ce faire, à l'aide de l'analyseur de réseau, nous comparons la transmission entre une ligne triplaque que nous avons élaboré et deux modèles de câbles coaxiaux différents (RG214/U de Delco Wire and Cable et RG393 de Times Microwave Systems).

⁹ À ces puissances, les connecteurs ainsi que les câbles coaxiaux semi-rigides sont à proscrire. La ligne triplaque est donc directement alimentée en puissance par un guide d'onde.

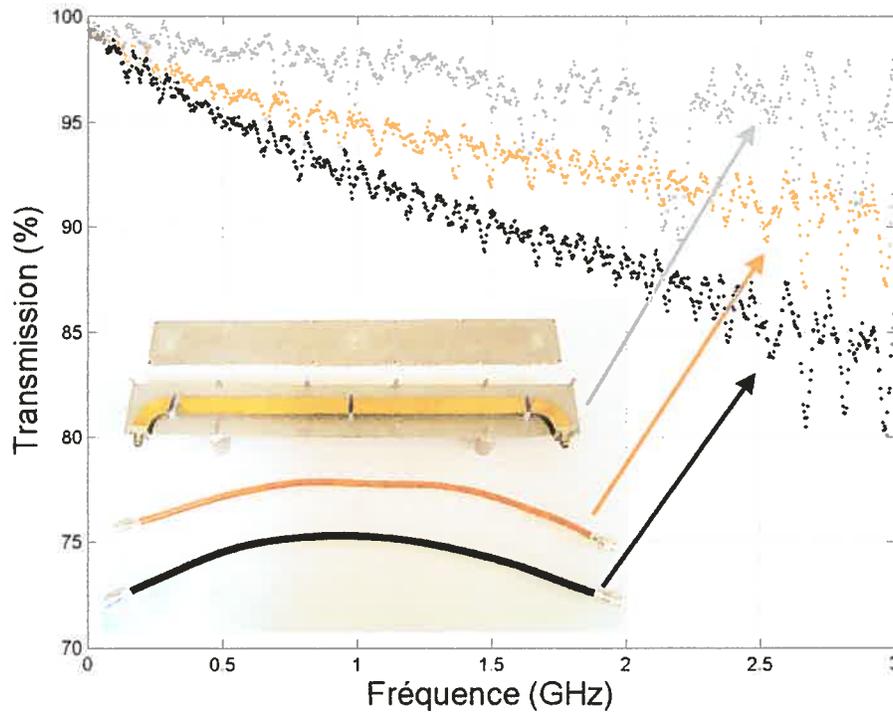


Figure 1.24 Comparaison de la transmission entre une ligne triplaque fabriquée par nos soins et deux modèles de câbles coaxiaux différents (RG393/U et RG214/U).

Ces trois lignes de transmission ayant la même longueur (70 cm), il apparaît clairement sur la figure 1.24 que la ligne triplaque a moins de pertes par unité de longueur que les deux câbles coaxiaux présentés. Ce résultat s'explique par la nature et la tangente de perte du diélectrique employé : de l'air dans la ligne triplaque ; du Téflon (PTFE) et du polyéthylène (PE) respectivement pour les câbles RG393/U et RG214/U (le PTFE à une plus faible tangente de perte que le PE).

1.7 Résumé et conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons démontré que les lignes triplagues que nous avons conçues permettent une bonne transmission du champ électromagnétique. L'utilisation de ces structures en tant que ligne de transmission requiert la connaissance, notamment, de l'impédance d'entrée de la structure et de la fréquence de coupure du premier mode TE d'ordre supérieur. Nous avons également mis l'accent sur les conditions géométriques à respecter pour assurer

qu'une telle ligne ouverte ne rayonne pas. En tenant compte de ces paramètres, nous savons dans quels cas l'utilisateur potentiel peut se servir sans risques (c'est-à-dire sans fuites de rayonnement électromagnétique) et de manière efficace (sans puissance réfléchie) d'une ligne triplaque. Désormais, nous sommes à même d'utiliser correctement ces lignes en vue d'entretenir des décharges plasma, sujet que nous allons aborder dans le chapitre 2.

Chapitre 2

Étude des décharges engendrées par une ligne triplaque

Nous allons à présent exploiter la technologie triplaque décrite au premier chapitre pour créer des plasmas. L'idée de départ consiste à insérer des enceintes diélectriques (contenant un gaz plasmagène) de part et d'autre de la bande centrale à l'intérieur de la ligne triplaque (figure 2.1). Si l'intensité du champ électrique HF est suffisante, des décharges apparaissent dans ces enceintes. Afin d'alléger le texte, nous désignerons le plasma ainsi créé par les termes "plasma triplaque" ou "décharge triplaque".

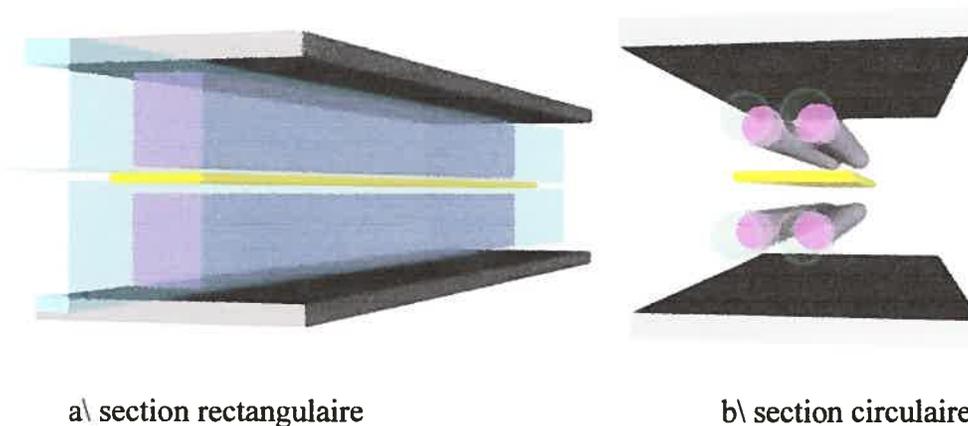


Figure 2.1 Schéma conceptuel de l'applicateur triplaque : des enceintes diélectriques de section rectangulaire (a) ou circulaire (b) sont disposées dans l'axe de la ligne triplaque.

La géométrie de la ligne triplaque se prête naturellement à la création de décharges dans des enceintes de section rectangulaire (figure 2.1.a). Cependant, nous nous sommes restreint à étudier uniquement des décharges entretenues dans des tubes (figure 2.1.b). Plusieurs raisons nous ont

amené à faire ce choix. La principale est que ce travail constitue une première étape dans l'étude de ces décharges, si bien que des modifications fréquentes des dimensions de la ligne triplaque rendent peu pratique l'emploi d'enceintes planes faites sur mesure. De plus, nous disposons en réserve d'un grand éventail de tubes en silice fondue de différents diamètres. Nous avons utilisé ce matériau en raison de son excellente résistance thermique et de sa transparence dans le visible. Enfin, comme nous le verrons au chapitre 3, les plasmas triplaque se prêtent bien à la stérilisation de tubes diélectriques.

Avant d'entamer l'analyse des décharges ainsi induites, nous allons au préalable éclairer le lecteur sur les raisons poussant à l'exploitation de la technologie triplaque en tant qu'applicateur de champ EM.

2.1 Genèse des applicateurs triplaques

Le Groupe de physique des plasmas de l'Université de Montréal possède une longue tradition de développement d'applicateurs de champs hautes-fréquences. Notre étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux. En entamant cette maîtrise, nous avons poursuivi les recherches déjà entreprises sur les applicateurs microbandes^[15,16,17]. Tout d'abord, nous avons développé pendant six mois (de janvier à juillet 2003) des applicateurs utilisant des antennes microbandes de type "patch" rectangulaire^[15]. Ensuite, nous avons consacré deux mois à l'étude des applicateurs "poème"^[16,17] et "surfarib"^[16,17] en vue de réaliser une extension d'échelle de ces applicateurs pour obtenir de plus grands volumes de plasma. Ce travail a été extrêmement formateur dans le domaine de l'ingénierie micro-ondes, sachant qu'un applicateur microbande peut être créé tout simplement avec du ruban métallique, une paire de ciseaux et un analyseur de réseau. De plus, les applicateurs mentionnés ci-dessus étant de type distribué (plusieurs dispositifs alimentant en puissance une même enceinte contenant le plasma), nous avons dans le même temps travaillé sur un diviseur de puissance en guide d'onde^[20,21].

Par la suite, nous avons entrevu la possibilité d'entretenir des décharges dans l'axe d'une structure triplaque (figure 2.1). Devant les premiers résultats probants obtenus, nous avons alors laissé de côté le travail effectué précédemment afin de nous consacrer uniquement au développement des applicateurs triplaques. Nous avons d'ailleurs choisi de restreindre ce mémoire à la présentation exclusive de ce sujet. Le concept de cette source de plasma résulte du

mariage entre deux types de structure que nous allons successivement présenter, les applicateurs linéaires et les applicateurs micro-rubans.

2.1.1 La famille des applicateurs linéaires

L'utilisation de champs de fréquences radio (RF) ou micro-ondes, conjointement désignés sous le vocable de champs de hautes-fréquences (HF), permet de produire des plasmas sans contact direct avec des électrodes. Par conséquent, les problèmes liés à l'utilisation de celles-ci (corrosion, contamination du gaz) sont considérablement réduits^[22]. Dans la famille des applicateurs HF, nous nous intéressons à ceux permettant d'entretenir des décharges sur des distances bien supérieures à la longueur d'onde dans le vide du rayonnement électromagnétique utilisé. Zakrzewski et Moisan^[23] en ont présenté une description unifiée. La figure 2.2 constitue un classement, basé sur l'article de ces auteurs, des différents types d'applicateurs de champ électrique HF. Le terme "applicateur linéaire" désigne des structures allongées dont l'une des dimensions est bien plus grande que les deux autres. Avec ce type d'applicateur, il n'existe aucune restriction de principe quant à la longueur des décharges ainsi induites, à l'exception de la puissance de sortie du générateur. La longueur des décharges peut ainsi être contrôlée, contrairement aux cavités résonnantes où le volume de plasma créé est fixé à l'avance par les dimensions de la structure.

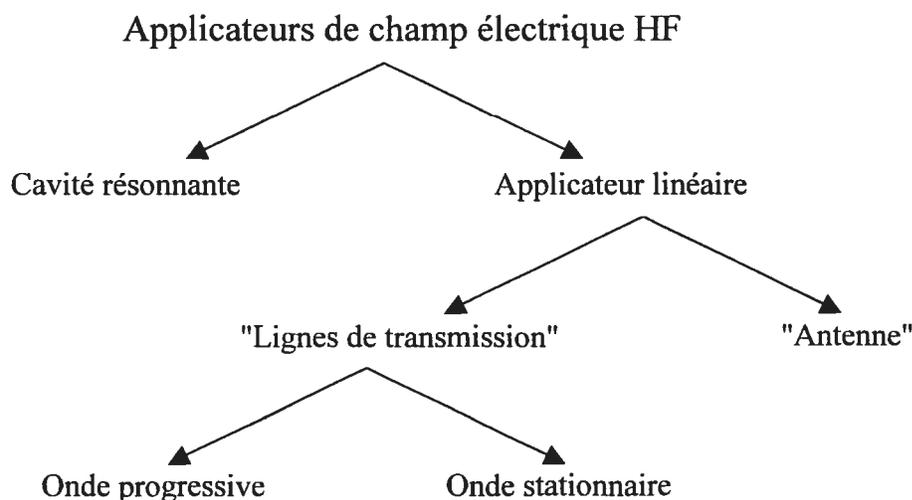


Figure 2.2 Classification des applicateurs de champ électrique HF selon Zakrzewski et Moisan^[23].

Zakrzewski et Moisan^[23] distinguent deux catégories d'applicateurs linéaires suivant la manière dont la puissance est transférée au plasma. Dans le cas des applicateurs de type "ligne de transmission", le plasma est directement créé à l'intérieur ou tout près de la structure de guidage de l'onde et sa présence affecte par conséquent la propagation de celle-ci. Quant aux applicateurs de type "antenne", le plasma est généré par le champ électrique rayonné à l'extérieur de la structure et il n'a en principe que peu d'influence sur l'applicateur.

La séparation conceptuelle bien distincte entre ces deux catégories doit être prise avec précaution en pratique. En effet, l'influence sur une antenne d'un plasma situé dans son champ proche (à une distance de l'ordre de la longueur d'onde dans le vide du champ EM utilisé) n'est pas en général négligeable. De manière réciproque, lorsqu'un plasma est créé à l'intérieur d'une ligne de transmission mais que sa densité électronique est sous-critique, il affecte peu les propriétés de cette ligne^[24]. Dans les faits, le système triplaque cumule à la fois les propriétés d'un applicateur de type "antenne" (faible influence du plasma sur les caractéristiques électrodynamiques de l'applicateur) et celles d'un applicateur de type "ligne de transmission" (large gamme de fréquences d'opération, voir chapitre 1). En effet, si nous reprenons la figure 1.2, cette fois en y insérant les tubes diélectriques (figure 2.3), nous pouvons observer que ces derniers sont totalement immergés dans la zone de champ de haute intensité. L'applicateur triplaque est donc un bien un applicateur linéaire de type "ligne de transmission", car le plasma qu'il génère est situé à l'intérieur de sa structure. Néanmoins, comme nous le montrerons tout au long de ce chapitre, la présence du plasma affecte peu les propriétés de l'onde EM qui l'entretient.

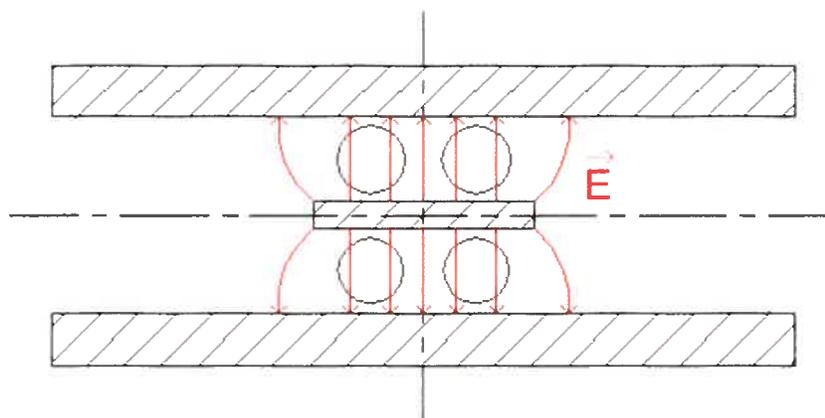


Figure 2.3 Un applicateur de type "ligne de transmission" : le ou les tubes à décharge sont totalement immergés dans le champ électrique confiné à l'intérieur de la structure.

Par ailleurs, le système triplaqué peut fonctionner en mode d'onde progressive ou stationnaire selon la façon de terminer l'extrémité de la ligne triplaqué (charge adaptée ou court-circuit). Sachant que les lignes de champ électrique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde et que les tubes sont disposés suivant la longueur de l'applicateur (figure 2.3), le gaz plasmagène contenu dans les tubes ne subit pas de composante axiale de champ électrique. L'importance de cette propriété sera discutée plus en détail à la section 2.2.

2.1.2 Applicateurs linéaires basés sur la technologie micro-ruban

Les applicateurs linéaires utilisés jusqu'à maintenant sont essentiellement basés sur deux types de structures^[23], les guides d'ondes et les câbles coaxiaux. Paradoxalement, les lignes micro-rubans et triplaques ont été très peu exploitées comme applicateur de champ alors qu'elles suscitent depuis de nombreuses années l'essentiel de la recherche dans le domaine des dispositifs HF. En 1999, Bilgic *et al.*^[25] ont utilisé des lignes micro-rubans dans le but de créer un plasma. Par la suite, plusieurs articles ont été publiés sur le même thème^[26,27,28,29]. Les enjeux motivant la recherche dans ce domaine ont été résumés par Brokaert^[30]. Pour ces auteurs, l'emploi de structures micro-rubans permet avant tout de diminuer la taille des applicateurs. La miniaturisation des sources de plasma autorise alors le développement de dispositifs, compacts et légers, donc portatifs, pouvant être utilisés dans plusieurs domaines d'application, le principal étant l'analyse spectrochimique.

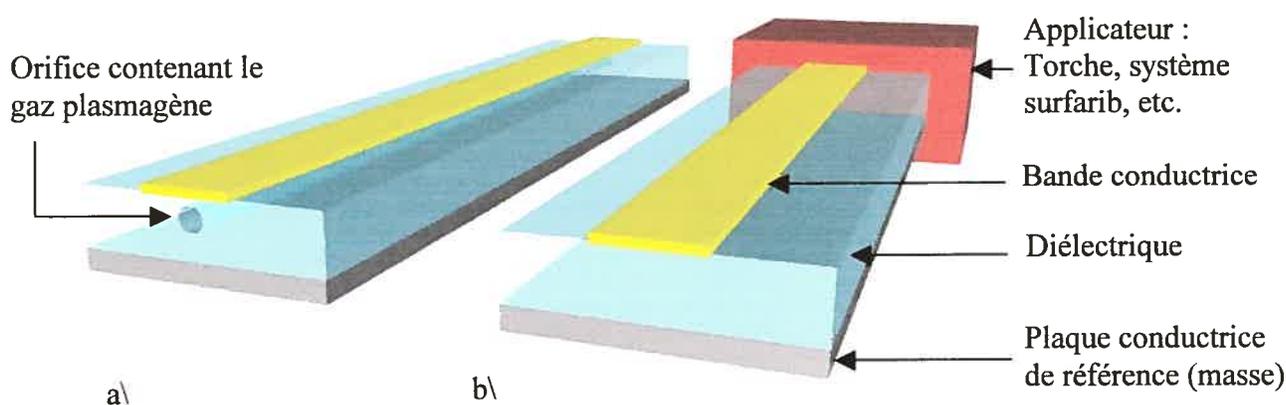


Figure 2.4 Deux types d'applicateurs linéaires micro-rubans : (a) le plasma est directement entretenu à l'intérieur de la ligne micro-ruban et (b) le plasma est créé par un autre moyen, la ligne micro-ruban ne servant que de système d'accord d'impédance.

Nous allons maintenant distinguer deux catégories d'applicateur linéaire micro-ruban (figure 2.4). Dans le premier cas^[25,26,27], le plasma est directement créé dans un orifice situé à l'intérieur du diélectrique (figure 2.4.a). Dans le deuxième cas^[15,16,17,18,19,28,29],¹, ces lignes ne servent que de système d'adaptation d'impédance (figure 2.4.b), le plasma étant alors engendré par un autre type d'applicateur (torche, système surfarib, etc.). La première catégorie étant proche du travail exposé dans ce mémoire, nous avons résumé les principales caractéristiques des sources de plasma présentées aux références 25, 26 et 27 dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Principales caractéristiques des plasmas créés à l'intérieur de lignes micro-rubans (figure 2.4.a) suivant les dispositifs de Bilgic *et al.*^[25], Bass *et al.*^[26] et Schermer *et al.*^[27].

Référence	25	26	27
Puissance incidente (W)	10 à 40	5 à 25	5 à 40
Gaz	Ar	He	Ar
Pression	PA	PA	PA
Flux du gaz (mLsm)	0 -1500	17-150	300 -1000
Nature du diélectrique	Silice fondue	Silice fondue	Saphir
Distance bande conductrice-plaque de masse (mm)	2.5	25	11.2
Section transversale du plasma (mm ²)	1	0.04	0.3
Longueur du plasma (mm)	20 à 30	10	2
Fréquence de la source	2.45 GHz	13.56 MHz	2.45 GHz
Système d'accord d'impédance	Portion de ligne micro-ruban en circuit ouvert	Réseau LC	Portion de ligne micro-ruban en circuit ouvert

¹ Les applicateurs "surfarib"^[16,17] appartiennent à la deuxième catégorie puisque ce sont des lanceurs d'ondes de surface. Quant aux applicateurs "poème"^[16,17], ils n'appartiennent à aucune de ces deux catégories. Le plasma constitue dans ce cas le plan de masse de la ligne micro-ruban.

En premier lieu, nous pouvons observer sur ce tableau que ces structures permettent d'entretenir des décharges d'argon et d'hélium à la pression atmosphérique avec des puissances inférieures à 40 W. Nous remarquons en même temps les faibles dimensions des applicateurs et des volumes de plasmas générés ($< 30 \text{ mm}^3$). Ces plasmas peuvent être créés à des fréquences radio (13.56 MHz) ou à des fréquences micro-ondes (2.45 GHz). Dans les deux cas, un système d'accord d'impédance est nécessaire afin d'assurer un faible pourcentage de puissance réfléchi vers le générateur.

Nous constatons donc un usage de la technologie micro-ruban limité à des plasmas ne s'étendant que sur des distances très inférieures à la longueur d'onde dans le vide du champ électromagnétique utilisé. Ceci provient certainement de l'idée répandue que ces lignes ne peuvent supporter de fortes puissances^[31]. Nous avons démontré à la section 1.6 que cette conception est fautive.

2.1.3 Vers les applicateurs triplaques

Cette section a pour but d'expliquer le cheminement qui nous a porté vers l'étude d'un applicateur linéaire basé sur la technologie triplaque. En premier lieu, nous désirions pouvoir contrôler le volume du plasma généré. Voilà pourquoi nous nous sommes tourné vers la catégorie des applicateurs linéaires. En deuxième lieu, pour pouvoir travailler dans une large gamme de fréquence d'entretien du plasma, nous avons écarté les structures ne pouvant pas propager un mode fondamental TEM. Nous pensons en particulier aux guides d'ondes dont les dimensions sont d'ailleurs prohibitives aux fréquences inférieures à 915 MHz. En troisième lieu, étant donné que nous souhaitons avoir la possibilité de créer des décharges planes, nous nous sommes tourné vers les technologies à ruban.

Parmi l'ensemble des lignes de transmission à ruban, notre attention s'est portée sur les lignes triplaques pour plusieurs raisons. Tout d'abord, une ligne triplaque ne rayonne pas (section 1.2) contrairement à la ligne micro-ruban qui perd une fraction du flux de puissance propagé sous forme de rayonnement. À forte puissance et à haute fréquence, l'utilisation d'une telle ligne serait dangereuse pour le personnel et l'équipement à moins d'employer une cage de Faraday. L'utilisation de cette dernière diminuerait la souplesse de tels dispositifs et rendrait peu pratique le diagnostic des décharges ainsi induites. De plus, comme nous l'avons indiqué sur la figure 2.1,

une ligne triplaque permet d'entretenir simultanément plusieurs décharges, de part et d'autre de la bande centrale. Cette souplesse d'utilisation peut être d'un grand intérêt dans toute application industrielle nécessitant un dispositif à la fois compact et multitube. Enfin, la technologie triplaque permet d'éviter le lancement d'ondes de surface. Ce point crucial fait l'objet de la prochaine section.

2.2 Décharges entretenues par une onde TEM et décharges d'ondes de surface

Les décharges d'ondes de surface (DOS) constituent aujourd'hui le moyen le plus efficace de production de longues colonnes de plasma. Néanmoins, pour les raisons indiquées en introduction, nous souhaitons éviter le lancement d'ondes de surface. Une onde de surface étant une onde progressive, une des caractéristiques de ces décharges est que leur longueur augmente au fur et à mesure que la puissance incidente croît. Or, les décharges triplagues sont également entretenues par une onde progressive (guidée il est vrai par la structure triplaque et non par le plasma). Par conséquent, il n'est pas évident de déterminer si la décharge triplaque est entretenue par la propagation d'une onde TEM ou d'une onde de surface. Pour répondre à cette interrogation, nous allons tout d'abord résumer les éléments permettant de reconnaître la présence d'une DOS. Par la suite, nous traiterons du cas des applicateurs triplagues et nous finirons par discuter des résultats d'autres auteurs portant sur la question du lancement non désiré d'ondes de surface.

2.2.1 Comment repérer la présence d'une décharge d'ondes de surface ?

Parmi l'ensemble des décharges HF, celles employant des ondes de surface sont les plus étudiées et les mieux comprises. Moisan et Zakrzewski^[32] en ont résumé les principales caractéristiques. Le plasma d'une onde de surface fait partie de la structure de guidage de l'onde elle-même. En effet, seuls le plasma et le ou les diélectriques environnants sont nécessaires à sa propagation. Nous allons nous appuyer sur les quatre points suivants pour repérer la présence d'une décharge d'ondes de surface (DOS) :

- Si nous observons la présence de plasma dans un lieu que le champ électrique émis par l'applicateur ne peut atteindre, et que la longueur de ce plasma augmente avec

l'accroissement de la puissance incidente, alors ceci constitue la "signature" d'une DOS².

- Une DOS possède une densité électronique supérieure à la densité critique^[33] (décharge sur-dense³). Dans le cas où une décharge sous-dense peut être produite dans la même enceinte qu'une DOS, étant donné que l'intensité lumineuse émise par un plasma augmente avec la densité électronique, une différence abrupte d'intensité lumineuse entre plusieurs points de la décharge constitue un indice permettant de distinguer ces deux types de décharges (figure 2.5).
- Lorsque la pression du gaz atteint la dizaine de Torr, les décharges HF se contractent radialement^[34,35]. Cependant, la structure de la contraction (figure 2.6) permet de repérer la présence d'une DOS.
- D'après Durandet *et al.*^[36], la décroissance radiale quasi-exponentielle de l'intensité du champ électrique au fur et à mesure que la distance par rapport au tube croît permet de montrer de façon rigoureuse que le plasma produit est le résultat de la propagation d'une onde de surface. Comme l'intensité du champ électrique diminue, dans les deux cas, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la bande centrale (figure 1.5), c'est la plus ou moins grande rapidité de cette décroissance qui suggère ou non la présence d'une DOS.

2.2.2 Comment éviter le lancement d'une onde de surface ?

Tous les lanceurs d'ondes de surface créés jusqu'à maintenant utilisent un orifice de lancement^[32] afin d'exciter ces ondes de surface. Quelle que soit la technologie employée (coaxiale^[32], guide d'onde^[32], microbande (surfarib)^{[16],[17]} ou triplaque^{[18],[19]}), un interstice de lancement est constitué d'un circuit ouvert où les lignes de champ électrique possèdent une composante axiale non nulle dans la région où est placée l'enceinte à décharge.

² Dans le cas où le libre parcours moyen des particules est plus grand que la longueur de l'enceinte à décharge, cette condition n'est pas suffisante pour s'assurer que le plasma observé est effectivement entretenu par la propagation d'une onde de surface^[36].

³ Les termes "sous-dense" et "sur-dense" réfèrent respectivement à une densité électronique inférieure et supérieure à la densité critique donnée par : $n_c = \frac{m_e \epsilon_0}{e^2} \omega^2$ où les notations e et m désignent la charge et la masse de l'électron, tandis que ω représente la pulsation du champ électromagnétique.

Dans cette section, nous allons démontrer que l'utilisation d'une onde plane guidée se propageant dans une ligne triplaque permet d'atteindre notre but, en l'occurrence éviter le lancement d'ondes de surface. De fait, cela sera obtenu par le contrôle de la direction et de l'intensité des lignes de champ électrique dans la ligne triplaque.

Avec nos premières configurations de ligne triplaque, nous ne pouvions empêcher l'excitation d'ondes de surface aux discontinuités de la ligne triplaque. En fait, lorsque la ligne triplaque est terminée par un circuit ouvert, l'intensité du champ électrique passe par un maximum en ce lieu et une telle terminaison représente la forme plane d'un orifice de lancement classique. Aussi, avons-nous rapidement abandonné la configuration de ligne triplaque représentée à la figure 2.8.a.

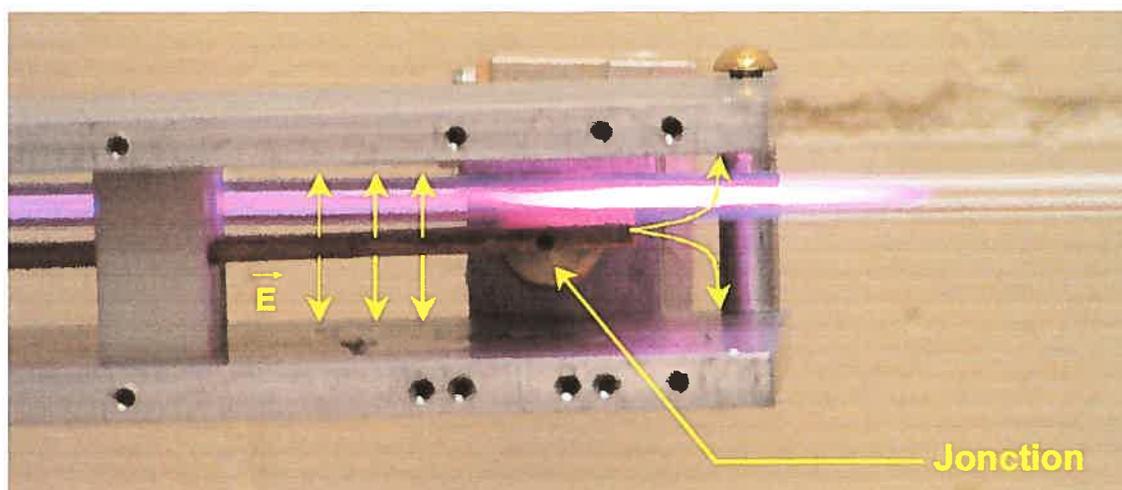


Figure 2.5 Lancement d'ondes de surface et production du plasma correspondant à une extrémité de la ligne triplaque dans un tube de 6 mm de diamètre interne (Ar, 1 Torr, 600 MHz).

Nous avons alors inséré une jonction à l'extrémité de la ligne triplaque permettant de connecter celle-ci à une charge adaptée. C'est ce qui a été effectué à la figure 2.5, photographie de l'une des extrémités de la structure que nous avons présentée (sans le plasma et le tube) en rouge à la figure 1.22. Avec une telle transition, nous pouvons prévenir l'excitation d'ondes de surface si la puissance incidente ne dépasse pas un certain seuil. Nous expliquons ceci par l'existence d'une composante axiale du champ électrique au niveau de la jonction (figure 2.5) contrairement au

corps de la ligne triplaque, où le champ électrique, parfaitement transverse, est moins favorable au lancement d'ondes de surface.

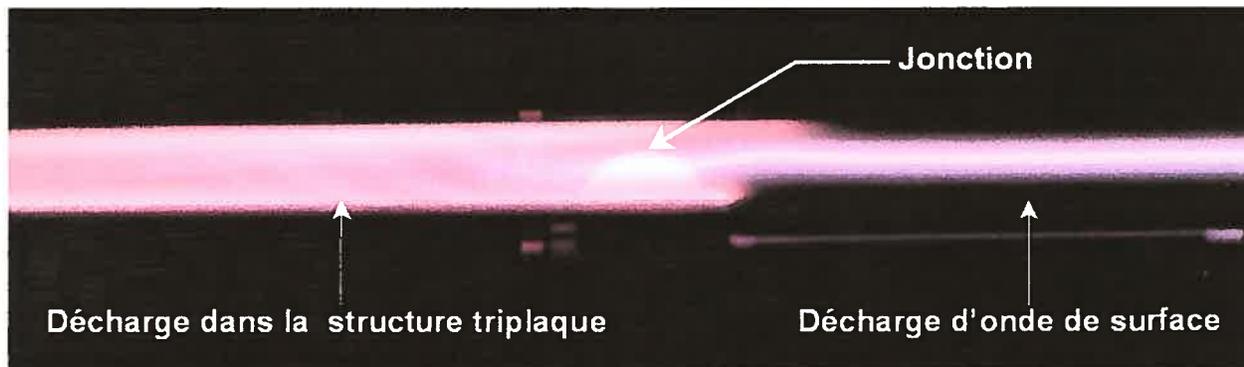


Figure 2.6 Lancement d'ondes de surface à l'une des deux extrémités de la ligne triplaque dans un tube de 26 mm de diamètre interne, à 600 MHz et à 20 Torr.

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 2.6, la décharge triplaque présente une forme de contraction différente de celle des DOS. La structure même de la contraction peut donc constituer une autre indication permettant de distinguer ces deux types de décharges entre elles.

2.2.3 Relations avec d'autres travaux

Divers auteurs ont également travaillé sur la question du lancement non désiré d'ondes de surface. Par exemple, Sauvé *et al.*^[37] ont développé deux applicateurs linaires de type antenne présentant un patron de rayonnement dont la composante principale du champ électrique est, dans un cas, dirigée suivant l'axe de l'enceinte à décharge et, dans un autre, dirigée perpendiculairement à cet axe. Ces auteurs avaient alors remarqué qu'il existait une relation entre la direction du champ électrique appliqué et le mode d'absorption de puissance par le plasma à l'abscisse où est rayonné le champ électrique. Plus précisément, ils avaient démontré qu'un champ électrique dirigé perpendiculairement à l'enceinte à décharge favorise l'absorption de puissance à l'abscisse où est rayonné le champ électrique.   l'inverse, un champ électrique dirigé dans l'axe de l'enceinte à décharge provoque l'excitation d'ondes de surface, ce qui entraîne un effet sur les autres segments de la décharge.

Un deuxième étude portant sur la question du lancement non désiré d'ondes de surface a été effectuée par Zakrzewski et Moisan^[24]. Ces derniers ont montré que deux modes d'ondes, sous-dense et sur-dense, peuvent exister dans une colonne de plasma créée dans l'axe d'un guide d'onde rectangulaire. Dans le premier cas, le champ électrique et l'intensité lumineuse sont en phase et le plasma affecte peu la propagation du champ électromagnétique. Dans le cas de la décharge sur-dense, un champ électrique intense dans la direction du guide est présent et ressemble à celui d'une onde de surface. Nos résultats vont donc dans le sens de ceux fournis par Sauvé *et al.*^[37] et par Zakrzewski et Moisan^[24].

Pour prévenir l'excitation d'ondes de surface, Bilgic *et al.*^[25] ont proposé, dans le cas de la ligne micro-ruban, de diminuer l'intensité du champ électrique au niveau des circuits ouverts en élargissant la ligne micro-ruban à ces endroits. Nous n'avons pas utilisé cette solution, car la présence de circuits ouverts ne permet pas d'obtenir un système performant du point de vue électrodynamique dans une large bande de fréquence.

Schermer *et al.*^[27] ont développé en 2003 un applicateur linéaire micro-ruban dont les principales caractéristiques ont été décrites dans le tableau 2.1. L'extrémité de leur ligne micro-ruban (où une composante axiale du champ électrique existe) forme un circuit ouvert, donc constitue un lieu où l'intensité du champ électrique passe par un maximum. Ces auteurs ont remarqué l'extension du plasma (généré à la pression atmosphérique)   l'extérieur de la ligne. De plus, ils ont démontré que la distance de sortie de ce plasma augmente lorsque la puissance incidente croît. Comme nous l'avons vu à la section 2.2.1, ceci représente la signature d'une DOS. Cependant, ces auteurs ne semblent pas avoir reconnu qu'il s'agissait d'une DOS, car à trois reprises, ils ont signalé le phénomène décrit ci-dessus sans spécifier qu'il s'agissait d'une décharge de ce type. Dans leur cas, l'excitation d'une DOS est d'un grand intérêt car le plasma crée est destiné au domaine de l'analyse spectroscopique et la sortie du plasma à l'extérieur de la ligne micro-ruban permet une plus grande souplesse dans la disposition du spectromètre (le diélectrique employé dans leur ligne micro-ruban étant opaque à la lumière).

En somme, le problème du lancement non désiré d'ondes de surface s'est posé aussi bien pour divers diamètres d'enceintes à décharges (0.64 mm pour Schermer *et al.*^[27], 6 mm sur la figure 2.5 et 26 mm sur la figure 2.6) que pour des structures radicalement différentes de la nôtre (Sauvé *et al.*^[37], Zakrzewski et Moisan^[24]). Nous retiendrons également que le contrôle précis de

l'intensité et de la direction du champ électrique dans la ligne triplaque permet d'éviter l'excitation d'ondes de surface.

2.3 Méthodes de diagnostics

Nous avons mis en œuvre trois types de diagnostic pour étudier les décharges triplaques :

Diagnostic 1 : caractéristiques électrodynamiques de l'applicateur.

Diagnostic 2 : profils axiaux de l'intensité du champ électrique et de l'intensité lumineuse.

Diagnostic 3 : profils latéraux de l'intensité lumineuse et prises de photos de décharges à haute pression.

Avant de présenter ces trois diagnostics, nous exposerons au préalable le dispositif expérimental permettant de créer des plasmas triplaques (figure 2.7). Nous avons travaillé à des puissances de l'ordre de la centaine de watts pour des fréquences variant de 50 à 2450 MHz. Lors de nos premières expériences, une fraction de la puissance incidente était réfléchie vers le générateur, si bien qu'un circulateur devait être employé. Par la suite, nous l'avons retiré, grâce aux progrès décrits à la section 2.4.

Légende

1. Générateur HF
2. Charge adaptée
3. Circulateur
4. Ligne bi-directionnelle
5. Bascule (commutateur)
6. Bolomètre
7. Bouteille de gaz
8. Système de division du flux de gaz
9. Ligne directionnelle
10. Applicateur triplaque
11. Système de pompage

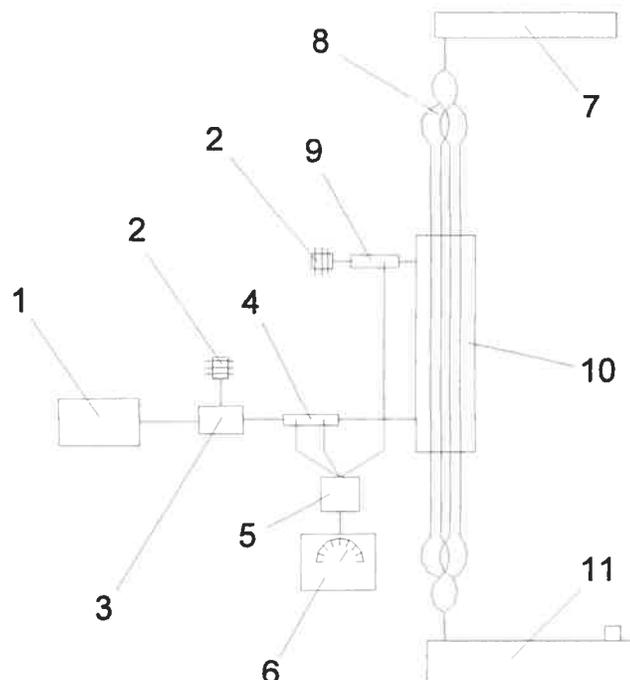


Figure 2.7 Schéma du dispositif expérimental permettant d'entretenir des décharges triplaques.

Diagnostic 1 : caractéristiques électrodynamiques de l'applicateur.

Une ligne bi-directionnelle (4), située en amont de l'applicateur dans le sens du flux de puissance HF, extrait un pourcentage des puissances incidente et réfléchi. Quant à la ligne directionnelle (9), positionnée en aval de l'applicateur, elle prélève une fraction de la puissance transmise à la charge adaptée placée en fin de structure triplaqué. Un bolomètre (6), muni d'une bascule (5), permet de mesurer successivement ces trois puissances. Comme nous le verrons à la prochaine section, la mesure des puissances incidente, réfléchi et transmise permet de déterminer la puissance absorbée par le plasma, grandeur que nous cherchons à calculer. Par ailleurs, chaque composant micro-ondes est connecté à ses voisins via des lignes ou des connexions coaxiales. Les paramètres de transmission de tous ces éléments, pris séparément, ont été au préalable mesurés à l'analyseur de réseau afin de déterminer leurs caractéristiques en fonction de la fréquence. Aussi, prendrons-nous en compte leurs contributions au bilan des flux de puissances.

Diagnostic 2 : profils axiaux de l'intensité du champ électrique et de l'intensité lumineuse.

L'intensité du champ électrique est prélevé au moyen d'une antenne électrique (identique à celle présentée sur le schéma de la figure 1.4) et la puissance correspondante est mesurée au moyen d'un bolomètre. Une partie de la lumière émise par le plasma est recueillie par un collimateur, puis est transmise (par l'intermédiaire d'une fibre optique) à une photodiode. La longueur du collimateur (30 mm), son diamètre d'ouverture (0.7 mm) et sa distance par rapport au tube (87 mm) sont choisis de manière à obtenir la meilleure résolution spatiale possible tout en gardant une intensité de signal acceptable. Le collimateur et l'antenne sont montés sur une platine micrométrique suivant l'axe des x et des y (figure 1.4), elle-même fixée sur un chariot mobile selon l'axe de l'applicateur (axe des z). Ce chariot est relié à un potentiomètre dont la tension de sortie ainsi que celles de la photodiode et du bolomètre sont reliées à un système de saisie et de stockage de données. Les valeurs obtenues étant relatives, nous avons choisi de normaliser chacune des tensions mesurées par rapport à leur valeur maximale.

Diagnostic 3 : profils latéraux de l'intensité lumineuse et prises de photos de décharges à haute pression.

Nous mesurons des profils latéraux d'intensité lumineuse afin d'évaluer l'homogénéité de ces décharges. Ceci est possible uniquement lorsque le plasma est stationnaire, c'est-à-dire lorsque ses paramètres sont constants dans le temps. Dans le cas contraire (à haute pression), nous enregistrons la configuration lumineuse des décharges au moyen d'un appareil photographique dont la durée d'exposition des clichés varie entre 25/1000 de seconde et 1 seconde. Nous avons étudié en particulier l'effet du débit du gaz sur l'homogénéité lumineuse des décharges à la pression atmosphérique.

Nous allons à présent mettre en œuvre ces moyens de diagnostic.

2.4 Caractéristiques électrodynamiques de l'applicateur

Un applicateur idéal devrait permettre d'optimiser le transfert de puissance du générateur au plasma et ce, quelles que soient les conditions opératoires. Ceci est en général très difficile à obtenir, car un plasma ne présente pas vis-à-vis de l'applicateur les mêmes caractéristiques selon les conditions opératoires. C'est pourquoi, un ou plusieurs systèmes d'adaptation d'impédance sont généralement nécessaires, le jeu consistant alors à étudier leur sensibilité devant une modification quelconque des conditions opératoires. Généralement, des circuits LC (bobines, condensateurs) sont utilisés aux radio-fréquences, tandis qu'aux fréquences micro-ondes, il s'agit de leurs équivalents, à savoir des portions de lignes de transmission (piston court-circuit etc.).

L'approche électrodynamique des applicateurs triplaques est tout autre. En effet, un applicateur triplaque bien conçu ne nécessite aucun système de réglage pour minimiser la puissance réfléchie. Nous montrerons que ceci est possible grâce au travail effectué au premier chapitre et au fait que la présence du plasma a peu d'incidence sur les caractéristiques électrodynamiques de l'applicateur hors plasma.

2.4.1 Vers un système à large bande

Le premier système que nous avons créé est présenté à la figure 2.8.a. Une mini-ligne triplaquée à âme cylindrique (50 ohms) est connectée à une ligne triplaquée à âme plane (100 ohms), l'alimentation en puissance HF s'effectuant à mi-longueur de l'applicateur. Nous avons choisi cette première configuration en pensant que le plasma absorberait toute la puissance incidente et que la puissance restante aux deux extrémités de la ligne serait donc nulle. Ce n'est pas le cas : dans cette configuration, l'intensité lumineuse du plasma et l'intensité du champ électrique présentent des profils axiaux d'onde stationnaire, à cause des réflexions de puissance causées par les deux circuits ouverts. De plus, des ondes de surface sont excitées au niveau de ces derniers. Aussi, avons-nous modifié la configuration initiale en insérant des charges adaptées aux extrémités de la ligne (figure 2.8.b) par l'intermédiaire de jonctions cylindriques d'impédance caractéristique égale à 70.7 ohms. Ces portions de lignes ont également pour rôle de ramener l'impédance de la ligne (100 ohms) à celle des charges adaptées (50 ohms). En outre, elles mesurent un quart de longueur d'onde à 915 MHz, soit 82 mm. Mais, ces sections de transformateurs quart-d'onde sont, par principe, dépendantes de la fréquence, si bien que pour nous en affranchir et ainsi obtenir un meilleur accord d'impédance dans une plus large gamme de fréquence d'entretien du plasma, nous avons à nouveau modifié la configuration de la ligne (figure 2.8.c). L'impédance caractéristique de cette dernière est égale à 50 ohms d'un bout à l'autre de la ligne. Sa réponse en fréquence hors plasma a été étudiée précisément (figure 1.22, en bleu). Avec cette configuration, nous pouvons obtenir un bon accord d'impédance pour des fréquences d'entretien du plasma inférieures à 700 MHz. Aux fréquences supérieures (des tests ont été effectués à 2.45 GHz), l'intensité lumineuse du plasma présente un profil axial d'onde partiellement stationnaire et la puissance réfléchiée à l'entrée de l'applicateur est importante. C'est pourquoi, afin d'élargir encore plus la gamme de fréquence d'entretien du plasma, nous avons étudié les discontinuités (supports diélectriques et transitions) affectant la propagation du champ électromagnétique dans la ligne triplaquée hors plasma (section 1.4.3).

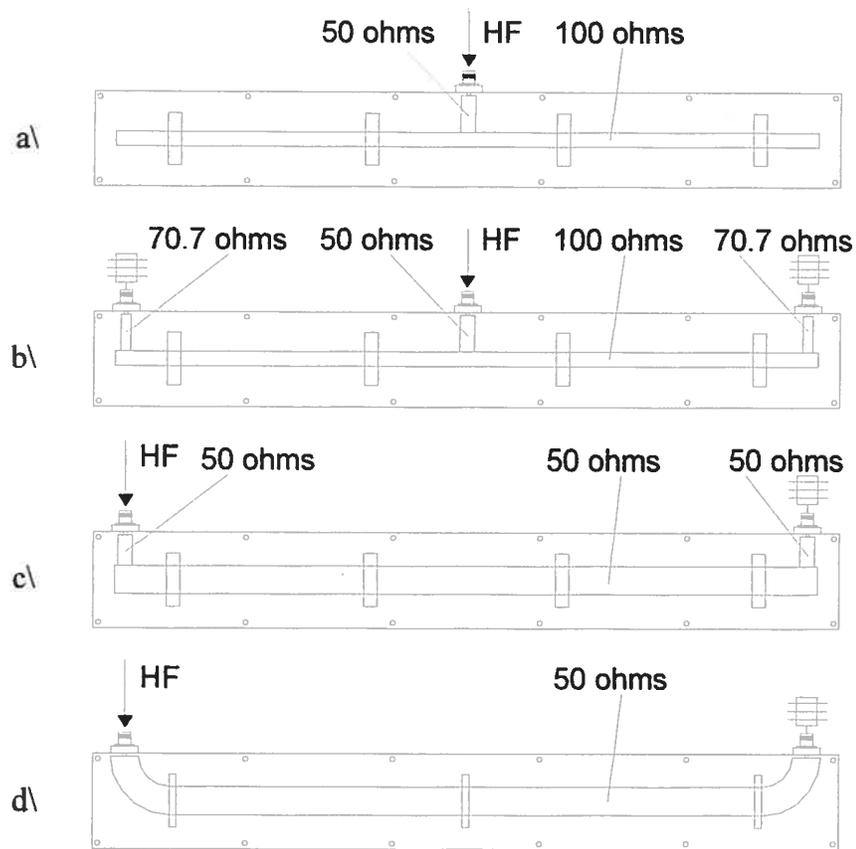


Figure 2.8 Configurations des applicateurs triplaques adoptées chronologiquement au cours de notre étude.

La configuration de la figure 2.8.d représente la dernière ligne triplaque construite et offre de très loin les meilleurs résultats. Néanmoins, nous n'avons pas encore effectué toutes les mesures avec cette ligne. Pour cette raison, une partie des résultats présentés dans ce chapitre a été obtenue avec les autres configurations.

2.4.2 Bilan des flux de puissance

Nous avons schématisé sur la figure 2.9 les flux de puissance et le circuit équivalent de la source de plasma présentée à la figure 2.8.d.

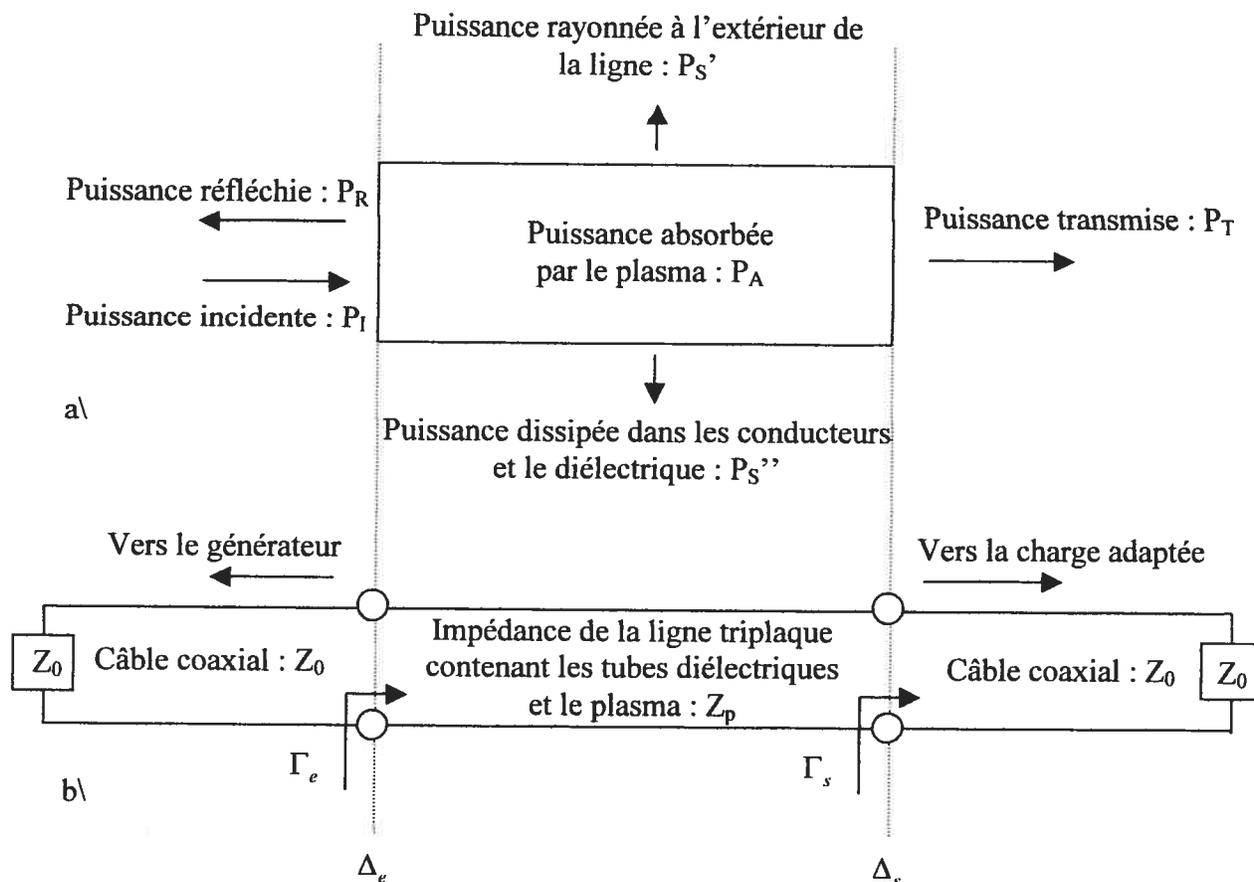


Figure 2.9 Schémas de principe de la source de plasma triplaque montrant (a) les divers flux de puissance et (b) son circuit équivalent.

Étant donné que l'énergie se conserve, la puissance absorbée par le plasma est égale à :

$$P_A = P_I - P_R - P_T - P_{S'} - P_{S''} \quad (7)$$

où toutes les notations utilisées sont définies sur la figure 2.9. Nous avons démontré que $P_{S'}$ et $P_{S''}$ sont négligeables devant la puissance transmise, respectivement aux sections 1.2 et 1.6. Par conséquent, l'équation (7) se réduit à :

$$P_A = P_I - P_R - P_T. \quad (8)$$

Il est important de souligner que P_R et P_I sont définies par rapport au plan d'entrée de l'applicateur (Δ_e), tandis que P_T est définie par rapport au plan de sortie de l'applicateur (Δ_s). À la grande différence de la majorité des applicateurs créés jusqu'à présent, aucun circuit d'accord

d'impédance n'est nécessaire pour éviter qu'une partie de la puissance incidente ne soit réfléchi vers le générateur ($P_R = 0$). En conséquence, la relation (8) se simplifie pour donner :

$$P_A = P_I - P_T. \quad (9)$$

A priori, on pouvait penser que le plasma absorberait toute l'énergie de l'onde guidée et que la puissance transmise à la charge adaptée (P_T) serait donc nulle. Nous allons démontrer expérimentalement que cette idée est fautive. Nous avons placé deux tubes de 26 mm de diamètre interne de part et d'autre de la bande centrale d'une ligne triplaque (schéma de la figure 2.10). Dans ces tubes circule de l'argon à une pression de 2 Torr. L'alimentation en puissance est effectuée à mi-longueur de l'applicateur (figure 2.8.b) et deux charges adaptées sont disposées à chaque extrémité de celui-ci. Dans cette configuration, P_T représente la somme des puissances absorbées par les deux charges adaptées⁴. Ces dernières ont pour rôle d'absorber l'énergie non utilisée pour entretenir les deux décharges. L'expérience consiste à mesurer la puissance absorbée par le plasma (P_A) en fonction de la puissance incidente (P_I), pour deux fréquences d'entretien du plasma, 200 MHz et 600 MHz. Pour ce faire, nous avons tout d'abord mesuré la puissance réfléchi à l'entrée de l'applicateur (en présence de plasma) qui a été trouvée quasi-nulle ($P_R / P_I \leq 3\%$) aux deux fréquences mentionnées ci-dessus. Par la suite, nous avons mesuré la puissance perdue dans les deux charges adaptées (P_T) afin d'en déduire la puissance absorbée par les décharges (P_A). Le résultat de cette expérience est présenté à la figure 2.10.

⁴ Ces deux puissances sont égales puisque l'applicateur présente une symétrie par rapport à l'arrivée de puissance (voir la figure 2.7.b).

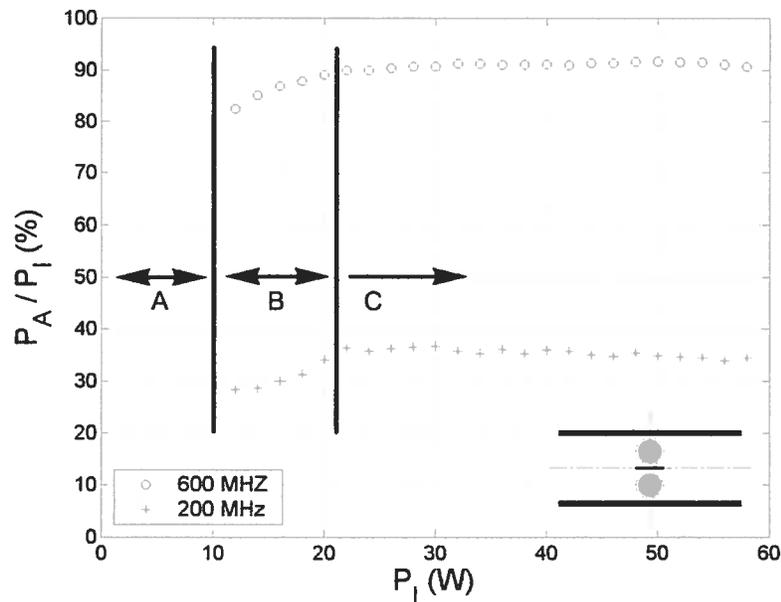


Figure 2.10 Pourcentage de puissance absorbée par les deux décharges en fonction de la puissance incidente, à 200 MHz et 600 MHz.

Ce graphique étant riche en informations, nous l'avons découpé en trois parties en fonction de la valeur de la puissance incidente :

- **Partie A** ($0 \text{ W} < P_I < 12 \text{ W}$) : l'intensité du champ électrique n'est pas suffisante pour maintenir le plasma. Toute la puissance incidente est absorbée par les charges adaptées.
- **Partie B** ($12 \text{ W} < P_I < 22 \text{ W}$) : plus la puissance incidente augmente, plus la longueur des décharges croît, jusqu'à atteindre la totalité de la longueur de l'applicateur pour $P_I = 22 \text{ W}$. Dans ces conditions, le pourcentage de puissance absorbée par les décharges s'élève lorsque la puissance incidente augmente.
- **Partie C** ($P_I > 22 \text{ W}$) : la longueur des décharges n'augmente plus, elle est fixée par la longueur de la ligne triplaque. Le pourcentage de puissance absorbée par les décharges demeure approximativement constant. Nous pouvons penser que la densité du plasma augmente alors.

En analysant les résultats, nous constatons que la forme des courbes de la figure 2.10 est identique pour les deux fréquences d'entretien du plasma utilisées. De plus, nous pouvons

observer que la fréquence a un grand impact sur le pourcentage de puissance absorbée par le plasma. En effet, seulement 35 % de la puissance appliquée est absorbée par les décharges à 200 MHz, tandis que cette valeur augmente à environ 90 % à 600 MHz. Nous pouvons en déduire que le transfert de puissance du générateur au plasma est plus grand à 600 MHz du fait d'une plus grande densité de plasma. Par ailleurs, nous constatons que le flux de puissance se rend jusqu'aux charges adaptées ($P_T \neq 0$). Si les transitions reliant la ligne triplaque aux charges adaptées ne sont pas parfaitement conçues, elles peuvent donner lieu à des réflexions de puissance et donc à un profil d'onde partiellement stationnaire, altérant ainsi l'homogénéité axiale des décharges, ce que nous souhaitons éviter. C'est pourquoi nous avons pris grand soin de bien étudier ces transitions (section 1.7) afin d'éviter toute réflexion de puissance en ces endroits.

2.4.3 Densité de puissance absorbée par le plasma

Afin de comparer divers types de décharges entre elles, un des paramètres à retenir est la densité de puissance absorbée par la plasma. Nous avons confronté une décharge triplaque avec une DOS entretenue dans les mêmes conditions opératoires : 915 MHz, 1 Torr, tube de 6 mm de diamètre interne. Nous avons pris deux séries de mesures avec l'applicateur triplaque : avec une seule décharge puis avec deux décharges entretenues de part et d'autres de la bande centrale (figure 2.11). La longueur de la bande centrale étant égale à 62 cm (figure 2.8.d)⁵, cette distance est la longueur de plasma maximale que peut générer l'applicateur triplaque avec un seul tube (point B). Avec deux tubes, la somme des longueurs atteintes par les deux colonnes de plasma est le double, soit 124 cm (point D).

Quant à la DOS, cette dernière a été créée par un surfatron (schéma de la figure 2.11). Aucune mesure n'a été prise entre 0 et 11 W, car la longueur de la colonne de plasma arrière ne dépasse pas dans ces conditions 7 cm, soit la longueur du corps du surfatron, nous empêchant ainsi de déterminer la longueur de la colonne de plasma avec précision.

⁵ En réalité la bande centrale mesure légèrement plus de 62 cm à cause des jonctions courbes. Cependant, la longueur de ces jonctions est inutilisable pour créer un plasma, car les tubes ne sont plus centrés sur la bande en ces endroits.

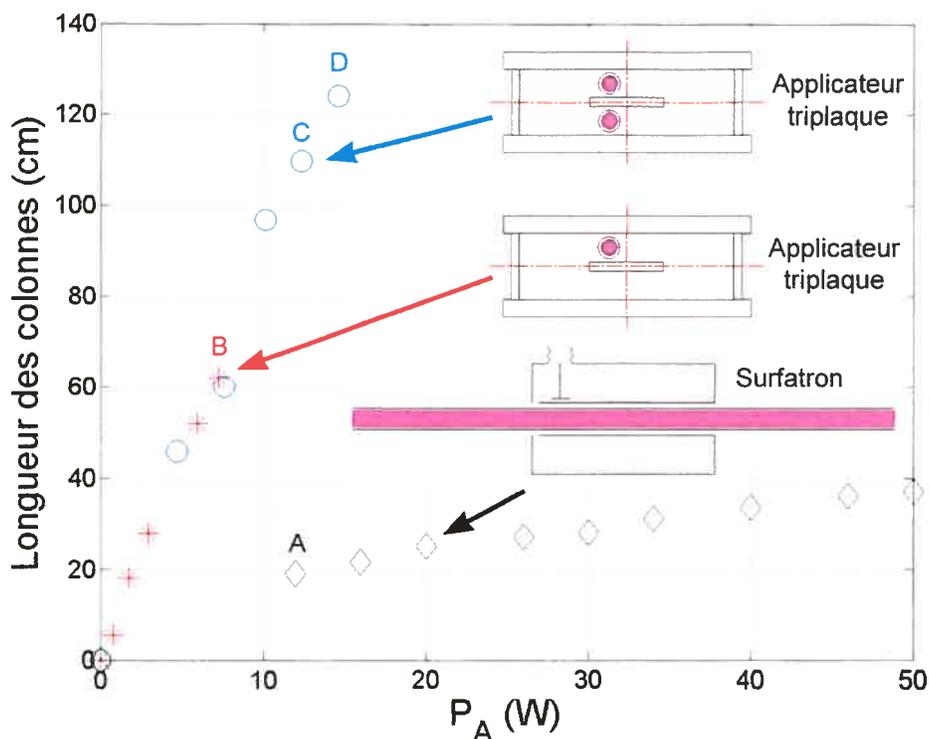


Figure 2.11 Comparaison des longueurs de colonnes de plasma entretenues par un applicateur triplaque (deux configurations) et par un lanceur d'ondes de surface (surfatron) en fonction de la puissance absorbée par la décharge.

En comparant les décharges triplaques avec une DOS entretenue dans les mêmes conditions opératoires, il s'avère que les décharges triplaques sont au moins cinq fois plus longues⁶ (comparaison entre le point A et le point C) pour la même puissance absorbée. Par conséquent, la puissance absorbée par unité de volume de la décharge triplaque est très inférieure à celle de la DOS. De nombreuses conséquences découleront de cette propriété, d'une importance capitale dans la compréhension des résultats présentés dans la suite de notre étude :

- La température du gaz est plus faible⁷, caractéristique entraînant d'intéressantes perspectives dans le domaine du traitement de surfaces thermosensibles (chapitre 3).

⁶ Les longueurs des colonnes de plasma ont été grossièrement mesurées avec une règle, méthode créant une incertitude d'environ 2 cm.

⁷ Nous avons vérifié cette propriété de façon simple. Au cours de cette expérience, les tubes contenant les décharges triplaques sont restés quasiment à la température de la pièce, tandis qu'il n'a pas été possible de toucher au tube du surfatron contenant la DOS.

- L'homogénéité axiale de la décharge est supérieure, car le coefficient d'atténuation de l'onde est plus faible (section 2.5).
- L'homogénéité radiale de la décharge est meilleure à haute pression (section 2.6).

2.5 Profils axiaux de l'intensité du champ électrique et de l'intensité lumineuse

L'un des objectifs de notre étude étant la recherche de l'homogénéité des décharges triplaques, nous avons mesuré les variations de l'intensité du champ électrique et de l'intensité lumineuse le long des colonnes de plasma. Nous débuterons notre analyse par le cas d'une ligne triplaque terminée par une charge adaptée. Par la suite, nous traiterons celui où la ligne se termine par un court-circuit.

2.5.1 Mode d'onde progressive

Dans un premier temps, nous allons présenter une expérience réalisée avec une ligne triplaque (figure 2.8.d) terminée par une charge adaptée. La longueur de l'applicateur est égale à 700 mm ; l'arrivée de puissance est fixée en $z = 0$ mm et la charge adaptée se situe en $z = 700$ mm. Un tube en silice fondue de 6 mm de diamètre interne est centré sur l'axe de la ligne triplaque et dans celui-ci circule de l'argon à la pression de 1 Torr (mesurée du côté du système de pompage). Les supports en Téflon destinés à soutenir mécaniquement le tube à décharge et la bande centrale sont placés en $z = 80$ mm, $z = 350$ mm et $z = 620$ mm. Ces supports étant opaques à la lumière, nous avons retiré les points expérimentaux présents aux abscisses correspondantes.

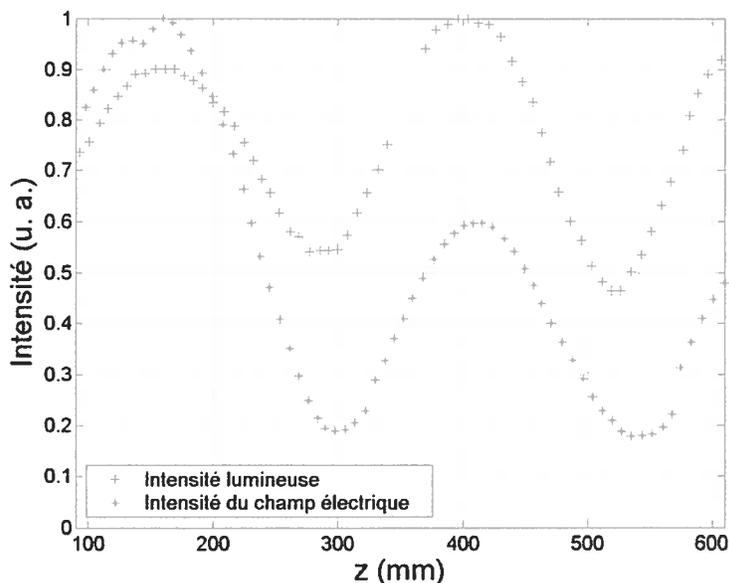


Figure 2.12 Profils axiaux d'intensité lumineuse et d'intensité du champ électrique : système triplaque (Ar, 1 Torr, 600 MHz).

En analysant les résultats de la figure 2.12, nous pouvons observer que les deux types d'enregistrements présentent des profils d'ondes partiellement stationnaires ; de plus, l'intensité du champ électrique et celle de la lumière émise par le plasma sont en phase, c'est-à-dire que leurs extrema sont situés aux mêmes abscisses. L'intensité du champ électrique décroît dans la direction du flux de puissance, tandis que l'intensité lumineuse est peu affectée par la diminution de l'intensité du champ électrique. Ainsi, l'homogénéité de la décharge est relativement bonne, car les variations de l'intensité lumineuse ne dépassent pas un facteur d'environ deux sur toute la longueur de l'applicateur.

La distance entre deux maxima est égale à une demi-longueur d'onde, soit environ $230 \text{ mm} \pm 15 \text{ mm}$. Sachant qu'à 600 MHz la demi-longueur d'onde du champ électromagnétique TEM dans le vide est égale à 250 mm, nous pouvons en déduire que l'onde se propageant le long de la ligne triplaque est peu affectée par la présence du tube et du plasma. La permittivité relative de ce dernier est donc proche de l'unité. Ce résultat est en accord avec celui obtenu par Zakrzewski et Moisan^[24] dans le cas d'un plasma sous-dense entretenu dans l'axe d'un guide d'onde rectangulaire, où la présence du plasma affecte également peu la longueur d'onde du champ électromagnétique guidé.

2.5.2 Mode d'onde stationnaire

Dans la section précédente, nous avons montré que la présence du plasma a relativement peu d'influence sur la longueur d'onde du champ électromagnétique guidé par la structure triplaque lorsque celle-ci est terminée par une charge adaptée. Qu'en est-il lorsque la ligne s'achève sur un court-circuit (figure 2.13.a)? Pour répondre à cette interrogation, nous avons enregistré le profil axial de l'intensité du champ électrique avec et sans plasma à 200 MHz (figure 2.13.b).

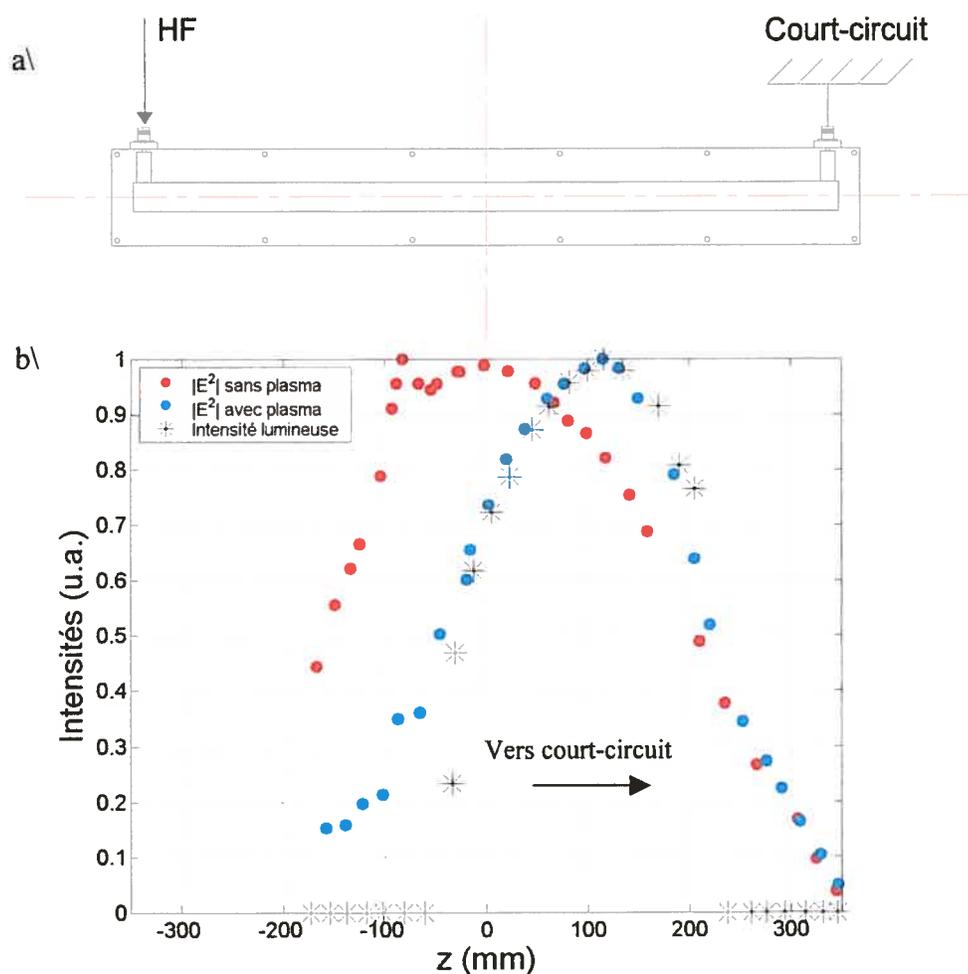


Figure 2.13 (a) Schéma d'un applicateur triplaque terminé par une jonction en court-circuit et (b) mesure des profils axiaux de l'intensité du champ électrique avec et sans plasma à 200 MHz.

Sur la figure 2.13, nous pouvons observer qu'en absence de plasma, le maximum d'intensité du champ électrique est situé en $z = 0$. Par contre, lorsque nous allumons le plasma, ce maximum se retrouve en $z = 115$ m. Le déplacement du profil axial à lieu du côté du court-circuit, et non de l'arrivée de puissance. Pour nous assurer que d'autres paramètres, tel le flux du gaz, ont peu d'effet sur la phase de l'onde, les positions respectives du court-circuit et de l'arrivée de puissance ont alors été inversées. À nouveau, le maximum de l'intensité du champ électrique s'est retrouvé déplacé du côté du court-circuit (non montré). Nous en déduisons donc que la présence du plasma a pour effet de diminuer légèrement ($\frac{\Delta\lambda_g}{\lambda_g} < 20\%$) la longueur d'onde du champ électromagnétique guidé.

2.6 Recherche de l'homogénéité des décharges à haute pression

À présent, nous allons aborder l'étude de l'homogénéité lumineuse des décharges entretenues par des lignes triplaques à haute pression (> 10 Torr). En règle générale, l'uniformité des décharges HF diminue progressivement au fur et à mesure que la pression du gaz augmente, certains gaz plasmagènes étant plus contractés que d'autres en fonction inverse de leur conductivité thermique^[35]. Des études antérieures ont démontré que les décharges d'argon sont particulièrement inhomogènes à haute pression^[34]. C'est pourquoi nous avons choisi ce gaz pour réaliser nos expériences. L'objectif ultime poursuivi est la recherche de l'homogénéité de décharges de grand volume à la pression atmosphérique. Comme nous le verrons, les décharges triplaques sont contractées à cette pression. Étant donné que ce phénomène est également présent à pression réduite, cette section est divisée en trois parties, relatives à des pressions de plus en plus élevées, afin de suivre la progression de la perte d'uniformité des décharges : 20 Torr, 150 Torr et 760 Torr (PA).

2.6.1 Pression égale à 20 Torr

Nous avons évalué la nature et le degré de contraction d'une décharge triplaque en comparant son profil latéral d'intensité lumineuse avec celui d'une DOS entretenue dans les mêmes conditions opératoires (Ar, 20 Torr, diamètre interne du tube 26 mm, 1 lsm, 600 MHz).

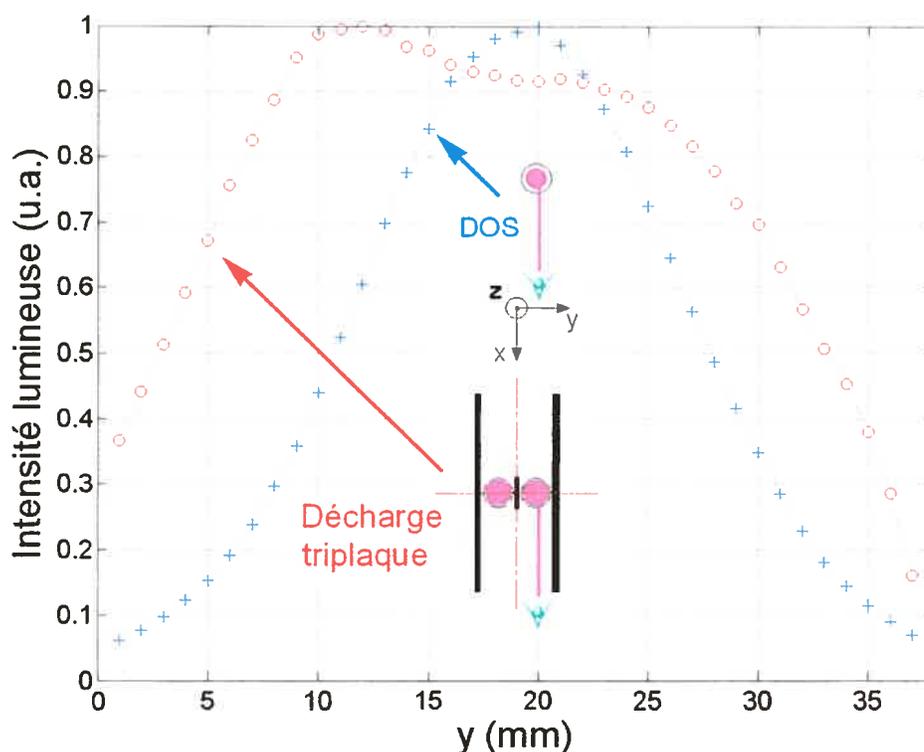


Figure 2.14 Comparaison des profils latéraux (suivant y) d'intensité lumineuse obtenus pour les mêmes conditions opératoires entre la colonne d'une DOS et celle d'une décharge triplaque.

En comparant ces deux profils (figure 2.14), nous pouvons tout d'abord observer qu'ils n'ont pas la même symétrie. La DOS présente un profil latéral symétrique par rapport à l'axe du tube à décharge, tandis que celui de la décharge triplaque est, de ce point de vue, clairement asymétrique. Ceci découle de la configuration du champ électrique entre chacune de ces décharges. La symétrie azimutale (mode $m = 0$)⁸ de la DOS nous permet d'effectuer une inversion d'Abel, technique relativement simple permettant de remonter à la connaissance du profil de luminosité radiale de la décharge. Une caractérisation complète de l'homogénéité radiale et azimutale des décharges triplaques nécessiterait, au contraire, le recours à la tomographie optique (déconvolution spatiale en deux dimensions)^[39], une méthode non seulement plus lourde que

⁸ Un des critères de stabilité requis pour qu'un mode de surface $m = 1$ puisse se propager est que le produit de la fréquence de l'onde par le rayon interne du tube soit supérieur à 2 GHz.cm (Margot-Chaker *et al.*^[38]). Dans notre cas, ce produit est égal à 1.56 GHz.cm . Par conséquent, seul le mode de symétrie azimutale ($m = 0$) peut se propager, résultat confirmé par la symétrie du profil latéral présenté.

l'inversion d'Abel mais difficilement implantable dans le cas présent par manque d'accessibilité due aux plaques de masse de la ligne triplaque.

Le fait que le profil de la décharge triplaque présente un maximum d'intensité lumineuse du côté de la bande centrale est cohérent avec la décroissance du champ électrique entre la bande centrale et les plans de masse. En effet, tout comme dans un câble coaxial où l'intensité du champ électrique décroît en allant du conducteur interne vers le conducteur externe, l'intensité du champ électrique de la structure triplaque diminue à partir de la bande centrale vers les plans de masse.

Nous pouvons également constater sur la figure 2.14 que le profil latéral de la décharge triplaque est plus large que celui de la DOS. Par conséquent, ceci confirme ce que la photo de la figure 2.6 (prise dans les mêmes conditions opératoires) suggérait : la contraction radiale des décharges triplagues est inférieure à celle des DOS.

2.6.2 Pression égale à 150 Torr

Dans des régimes de pression supérieurs à environ 20 Torr, les décharges triplagues entretenues dans des tubes de grand diamètre présentent des caractéristiques étonnantes que nous allons à présent décrire. La configuration lumineuse de ces décharges variant dans le temps, nous avons abandonné le diagnostic précédent (mesure de profils latéraux d'intensité lumineuse) et nous avons photographié ces décharges. La figure 2.15 est un exemple de cliché de deux colonnes de plasmas d'argon (situées de part et d'autre de la bande conductrice centrale) entretenues dans des tubes de 26 mm de diamètre interne comme à la section précédente, mais cette fois à 150 Torr et à 200 MHz.

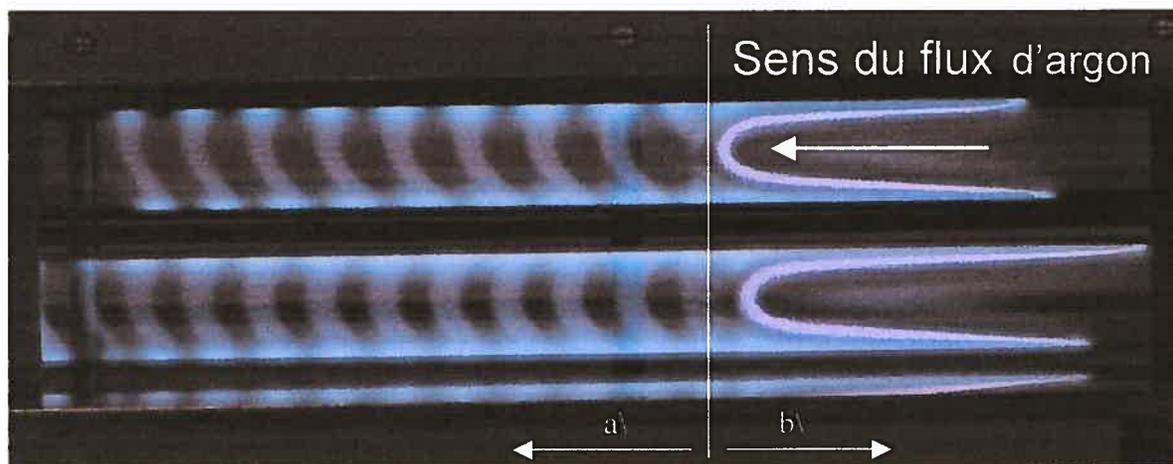


Figure 2.15 Photo d'une décharge triplaqué bi-tube d'argon à 150 Torr dans des tubes de 26 mm de diamètre interne. Le débit du gaz est égale à 2 lsm (soit 1 lsm par tube).

Sur la figure 2.15, deux régions (notées a\ et b\) peuvent être différenciées. Nous allons successivement les décrire :

- Partie a\

Dans cette région, des filaments d'orientation plutôt verticale défilent dans le sens du flux du gaz. La forme de ceux-ci est peu influencée par le débit d'argon ; en revanche, le flux du gaz agit sur leur vitesse de déplacement. En effet, plus la vitesse d'écoulement du gaz est importante, plus les filaments défilent rapidement.

- Partie b\

Le plasma situé dans cette région est également inhomogène. A l'inverse du cas précédent, il est stationnaire : un filament, dont la position ne dépend pas du temps, a été déformé sous l'action du flux du gaz. Lorsque le débit est nul, ce filament est parfaitement perpendiculaire à l'axe du tube. Par contre, si le débit augmente, celui-ci se courbe et s'étire jusqu'à atteindre plusieurs centimètres de longueur (figure 2.15) pour un débit égal à 2 lsm (soit 1 lsm par tube).

Après avoir décrit la configuration lumineuse de ces plasmas, nous allons essayer de l'analyser. Les filaments situés dans la partie a\ , dirigés perpendiculairement à l'axe du tube,

suivent en fait la direction du champ électrique. Ceci confirme la faible perturbation du plasma sur la direction des lignes de champ électrique hors-plasma. Aussi, ces décharges permettent-elles de visualiser les lignes de champ électrique dans la ligne triplaque hors-plasma.

Par ailleurs, la déformation du filament de la partie b\ est due au flux du gaz et à sa viscosité. Nous allons d'abord démontrer que l'écoulement est laminaire. Pour ce faire, nous allons utiliser une combinaison de variables (sans dimension), le nombre de Reynolds, égal à :

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (9)$$

où

- ρ est la densité du gaz à 20 Torr et 300 K : $\rho = 4.3 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$, calculée à partir de la loi des gaz parfaits.
- V est la vitesse moyenne de l'écoulement : $V = \frac{Q}{A}$ où A est l'aire d'une section transversale du tube ($A = \pi \times 0.013^2 = 5.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) et Q est le débit d'argon : 2 lsm (soit 1 lsm par tube). On en déduit $V = \frac{1 \times 10^{-3}}{60 \times 5.3 \times 10^{-4}} \approx 3.1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$
- D est le diamètre interne du tube : $D = 2.6 \times 10^{-2} \text{ m}$.
- μ est la viscosité dynamique de l'argon à 300 K : $\mu = 2.1 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$.

L'application numérique de l'équation (9) donne finalement :

$$\text{Re} = \frac{4.3 \times 10^{-2} \times 3.1 \times 10^{-2} \times 2.6 \times 10^{-2}}{2.1 \times 10^{-5}} \approx 1.7.$$

On admet généralement que si $\text{Re} < 2100$, le flux est laminaire^[40]. En conséquence, dans nos conditions opératoires, le flux est laminaire. Dans ce cas, le profil de vitesse du gaz dans chaque tube de section circulaire est parabolique^[40]. Ainsi, les deux filaments allongés de la partie b\ matérialisent qualitativement⁹ le profil de vitesse du gaz dans les tubes.

⁹ L'élongation axiale du filament n'est pas uniquement une fonction du débit du gaz. En effet, d'autres paramètres telles la nature et la pression du gaz, font varier cette longueur. Par exemple, pour le même débit que précédemment, l'élongation de ce filament est quasi nulle à la pression atmosphérique : il est plus difficile pour le flux du gaz de déformer ce filament à plus haute pression.

2.6.3 Pression atmosphérique (760 Torr)

Les plasmas entretenus à la pression atmosphérique (PA) présentent un fort potentiel d'utilisation dans plusieurs secteurs de recherche. Ceci est dû à l'absence de système de pompage à la fois encombrants et coûteux. La tendance générale du marché se situe vers des décharges de volume de plus en plus important. Cependant, ces décharges subissent les effets de la haute pression^[41], tels la contraction et la filamentation^[34], qui réduisent sensiblement l'efficacité de procédés industriels comme la détoxification de gaz à effet de serre^[35]. Nous avons étudié deux décharges d'argon simultanément générées à la PA. Nous avons d'abord travaillé avec un débit nul et, dans ce cas, les décharges sont constituées de filaments statiques dirigés suivant la direction du champ électrique. En revanche, lorsqu'un débit est appliqué au gaz, ces décharges ne sont plus stationnaires. Pour cette raison, nous les avons photographiées. La figure 2.16 met en évidence le défilement des filaments suivant l'axe des tubes (dans le sens du flux). Les deux décharges sont strictement identiques d'une photo à l'autre, seul un des paramètres de notre diagnostic (la durée "t" d'exposition de photos) étant modifié.

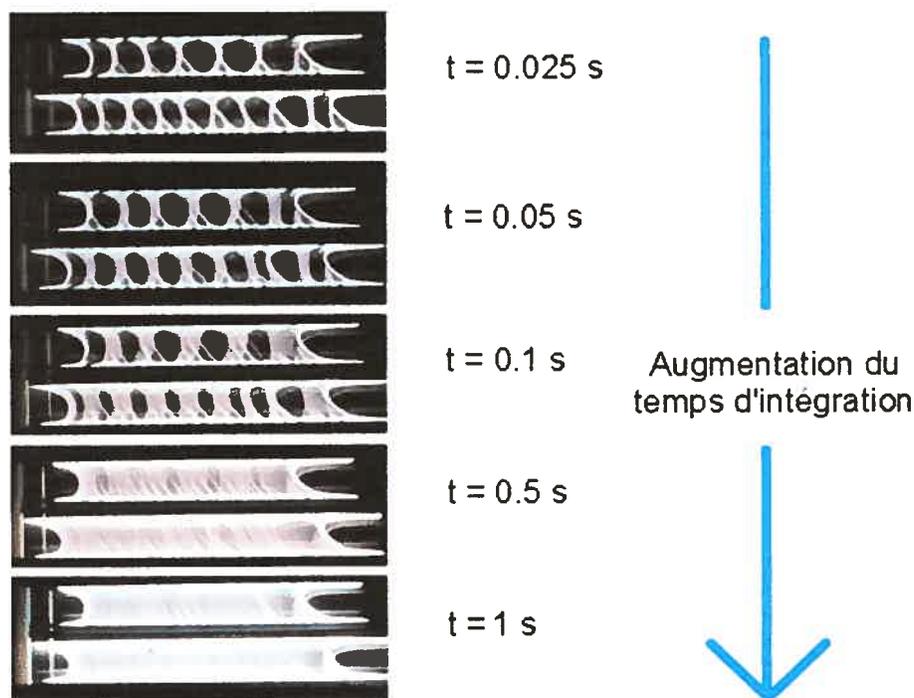


Figure 2.16 Photos de deux décharges triplaques d'argon à la pression atmosphérique dans des tubes de 26 mm de diamètre interne à différents temps d'exposition.

Nous pouvons observer sur la figure 2.16 l'inhomogénéité axiale des décharges d'argon générées à la pression atmosphérique. À un instant donné, le plasma n'est pas réparti axialement de manière uniforme. Cependant, si nous attendons assez longtemps, chaque abscisse des tubes aura été parcourue par un filament de plasma. Le défilement des filaments à la PA est causé par le flux du gaz (comme à 150 Torr). L'utilisation de l'action du flux du gaz sur la mobilité de la configuration lumineuse des décharges a déjà été utilisée dans le passé pour augmenter l'homogénéité de certaines décharges. En effet, Zakrzewski^[17] avait déjà démontré avec les applicateurs "surfarib" que le flux du gaz pouvait être exploité afin de faire déplacer des filaments. Dans notre expérience, cet effet est beaucoup plus prononcé et l'utilisation du flux permet d'obtenir statistiquement une meilleure homogénéité axiale des décharges.

2.7 Résumé et conclusion

En somme, nous avons développé un nouvel applicateur de champ de conception simple et facile à construire avec seulement trois plaques conductrices. Nous avons étudié quelques caractéristiques des colonnes de plasma ainsi créées et les avons comparées avec des DOS entretenues dans les mêmes conditions opératoires. La densité de puissance absorbée par les décharges triplaques se révèle bien inférieure à celle des DOS. Cette propriété fondamentale est le pivot de l'ensemble de ce travail : les caractéristiques électrodynamiques de cet applicateur dépendent peu de la présence du plasma. Cette faible sensibilité de l'applicateur vis-à-vis des paramètres du plasma permet de se passer de système d'adaptation d'impédance pour éviter la puissance réfléchie à son entrée dans une large bande de fréquences (50 - 2450 MHz) et, ceci, dans des conditions opératoires étendues (pression du gaz et diamètre des tubes à décharge). En outre, l'homogénéité radiale des décharges à haute pression est meilleure que celle des DOS, car la température du gaz est plus basse. De surcroît, l'homogénéité axiale des décharges est supérieure à celle des DOS, car le coefficient d'atténuation de l'onde guidée par la structure triplaque est plus faible, au prix cependant du sacrifice d'une partie de la puissance incidente dans une charge adaptée en fin d'applicateur. Une des propriétés des décharges triplaques, en l'occurrence la faible température du gaz, sera exploitée au troisième chapitre où nous utilisons le plasma triplaque pour stériliser des polymères thermosensibles.

Chapitre 3

Application à la stérilisation de tubes creux de petit diamètre et thermosensibles

Les polymères thermosensibles comme le Tygon^{MD}, le silicone ou le polyéthylène sont les principaux constituants de nombreux dispositifs médicaux tels les cathéters et les endoscopes flexibles. En conséquence, ces instruments ne peuvent être stérilisés par des méthodes à haute température sans risque d'endommagement de leur structure. Par endommagement, nous entendons que le polymère peut fondre ou que l'une de ses propriétés physiques (par exemple, sa capacité à drainer un liquide) est suffisamment dégradée pour rendre impossible sa réutilisation. Quant aux méthodes actuelles de stérilisation à basse température, elles utilisent des produits chimiques efficaces (comme l'oxyde d'éthylène), mais toxiques pour l'homme et nuisibles pour l'environnement^[42].

La stérilisation par plasma est une alternative possible à ces méthodes conventionnelles. Elle peut s'effectuer en post-décharge spatiale ou directement en décharge. Moisan *et al.*^[43] ont résumé les avantages respectifs de ces deux techniques. L'utilisation de la région de post-décharge, où il y a absence de champ électrique extérieur appliqué, permet la stérilisation d'objets métalliques au contraire de la stérilisation en décharge qui ne peut s'effectuer que sur des objets de nature diélectrique ne contenant pas ou très peu de parties métalliques (pour éviter l'échauffement que celles-ci pourraient occasionner). Nous allons néanmoins nous pencher sur la méthode d'exposition directe au plasma, celui-ci étant généré par un applicateur triplaqué et ce, pour deux raisons. Premièrement, les dispositifs de post-décharge, bien qu'efficaces sur des objets de forme simple, sont mal adaptés à la stérilisation de la surface interne de tubes de petit diamètre (< 10 mm). En effet, il est nécessaire en post-décharge d'imposer une importante vitesse d'écoulement au gaz afin d'utiliser les espèces actives (émetteurs d'UV, radicaux) créées en décharge, espèces qui ont une durée de vie limitée. Les tubes de petit diamètre possédant une

faible conductance hydrodynamique, il est, en effet, impossible d'y faire circuler un gaz à grande vitesse sans engendrer une importante élévation de pression, ce qui conduit à la destruction de ces espèces actives avant qu'elles n'aient pu jouer leur rôle. Deuxièmement, les faibles densités de puissance absorbée par le plasma généré dans la structure triplaque (section 2.4.3) permettent de fonctionner avec une température du gaz proche de la température ambiante en décharge et ce, dans une large gamme de fréquences d'entretien, ce qui n'est pas le cas avec la plupart des décharges micro-ondes. Ceci nous amène à penser qu'il serait intéressant d'exploiter ce plasma pour stériliser des tubes creux formés de polymères thermosensibles.

3.1 Problématique

Après avoir décrit les motifs stimulant notre intérêt vers ce domaine de recherche, nous allons présenter les grandes lignes de notre approche expérimentale. Nous avons testé l'efficacité de notre stérilisateur au moyen de spores bactériennes (non pathogènes) jugées représentatives des micro-organismes les plus résistants^[43]. En général, les chercheurs travaillant dans le domaine de la stérilisation déposent les spores sur des surfaces planes. Or, comme nous l'avons mentionné en introduction, une des principales applications de la stérilisation par plasma réside dans la possibilité de stériliser des objets contenant des parties creuses de petit diamètre, tels les endoscopes et les cathéters. C'est pourquoi nous nous sommes intéressé à ce sujet, en focalisant notre attention sur la problématique de la stérilisation de l'intérieur de longs tubes creux.

Avant tout, il importe de choisir quels agents bactéricides du plasma pourraient être utilisés pour stériliser ces surfaces. D'après Moisan *et al.*^[44], trois mécanismes peuvent intervenir dans l'inactivation de micro-organismes par plasma : (A) destruction du matériel génétique des micro-organismes par rayonnement UV; (B) érosion des micro-organismes, atome par atome par photo-désorption ; (C) érosion des micro-organismes, atome par atome, par oxydation pour former des composés volatils. Nous proposons d'utiliser le mécanisme (A) par l'intermédiaire des UV du vide (UVV¹) émis par une décharge d'argon. Deux raisons expliquent ces choix. Tout d'abord, l'argon étant chimiquement inactif, la méthode (A) est celle qui préserve le plus les surfaces à stériliser, contrairement à la méthode (C) où l'érosion des spores peut également s'accompagner de la gravure des polymères^[45]. Ensuite, l'argon a été choisi comme gaz plasmagène, car une

¹ UV inférieurs à 200 nm.

décharge d'argon peut émettre deux raies (à 105 nm et 107 nm), dont l'effet bactéricide a déjà été démontré^[46].

Dans un premier temps, nous allons étudier les gradients de pression de gaz existant dans des tubes de petit diamètre (< 10 mm) du fait de la nécessité de l'écoulement du gaz pour renouveler celui-ci. Puis, nous ajusterons les paramètres de la décharge afin de trouver les conditions permettant de maximiser l'intensité de l'émission d'UVV dans une gamme de conditions opératoires donnée. Par la suite, nous présenterons le protocole de stérilisation employé et nous terminerons par une discussion des résultats de stérilisation obtenus.

3.2 Étude des gradients de pression dans des tubes de petit diamètre (< 10 mm)

La pression d'un gaz en flux dans un tube n'est pas constante le long de celui-ci. Elle décroît axialement dans le sens du flux, car les parois du tube exercent une résistance au passage du gaz. Cet effet est particulièrement marqué lorsque le diamètre du tube est faible et que le débit du gaz est important (loi de Poiseuille). Nous avons étudié expérimentalement ces gradients de pression, par l'intermédiaire de l'expérience présentée à la figure 3.1. Deux jauges de pression ont été disposées de part et d'autre d'un tube de 6 mm de diamètre et de 2 m de longueur. Le flux du gaz a été contrôlé par un débitmètre massique tandis que la puissance de pompage a été réglée par l'intermédiaire d'une vanne.

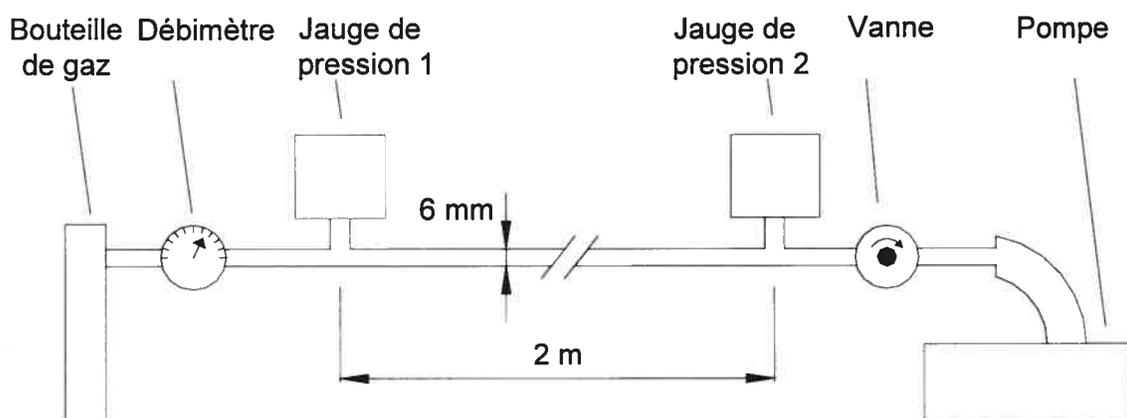


Figure 3.1 Montage expérimental permettant la mesure de la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'un tube de 6 mm de diamètre interne et de 2 m de longueur.

Nous avons étudié la différence de pression observée entre la pression à l'entrée (p_1) et celle à la sortie (p_2) du tube en fonction de la puissance de pompage et du débit du gaz. Dans un premier temps, nous nous sommes penché sur le premier paramètre. Pour cela, nous avons fait varier la puissance de pompage par l'intermédiaire de la vanne (figure 3.1) et avons mesuré p_1 et p_2 , tout en maintenant un débit constant (1 mLsm et 5 mLsm).

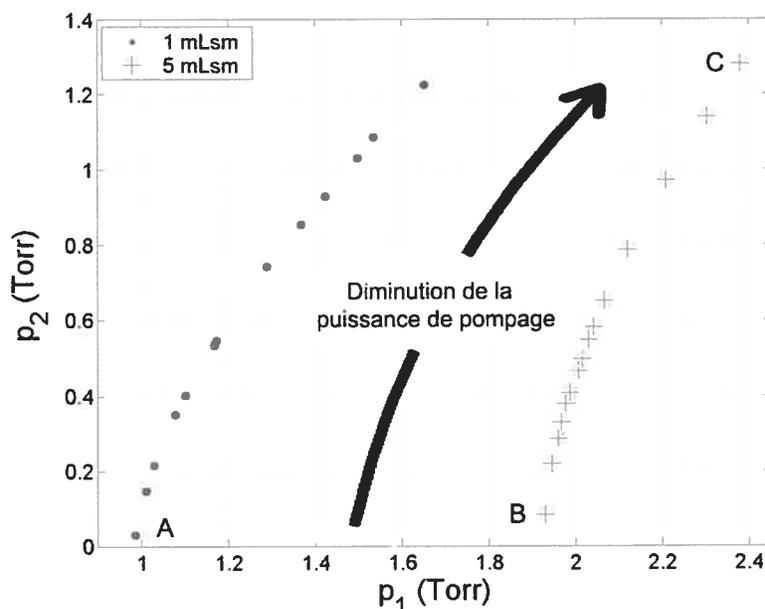


Figure 3.2 Mesures de la pression à l'entrée (p_1) et à la sortie du tube (p_2) pour différentes puissances de pompage.

Tout d'abord, nous pouvons observer sur la figure 3.2 que plus la puissance de pompage diminue, plus les pressions p_1 et p_2 augmentent. Pour les deux débits mentionnés, la plus basse pression enregistrée correspond au cas où la vanne est totalement ouverte (points A et B). Nous remarquons également que la différence de pression entre les deux jauges ($\Delta p = p_1 - p_2$) dépend de la puissance de pompage. De fait, pour un flux constant égal à 5 mLsm, la différence de pression décroît de 1.8 Torr au point B à 1.1 Torr au point C (le passage du point B au point C a été effectué en fermant progressivement la vanne). Par ailleurs, la pente des courbes (p_1 , p_2) obtenues s'élève lorsque la puissance de pompage croît et, au-dessus d'une certaine puissance de pompage, la pression mesurée du côté de la bouteille (p_1) ne diminue presque plus. De surcroît, cet effet est plus prononcé lorsque le débit du gaz augmente (entre 1 mLsm et 5 mLsm). Nous

pouvons donc en conclure que la différence de pression entre les deux jauges serait peu affectée par l'utilisation d'une pompe de plus forte puissance.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'effet du débit du gaz sur la différence de pression ($\Delta p = p_1 - p_2$). Pour cela, nous avons fait varier le débit entre 1 mLsm et 100 mLsm et avons à nouveau enregistré p_1 et p_2 , tout en gardant la vanne totalement ouverte (figure 3.3).

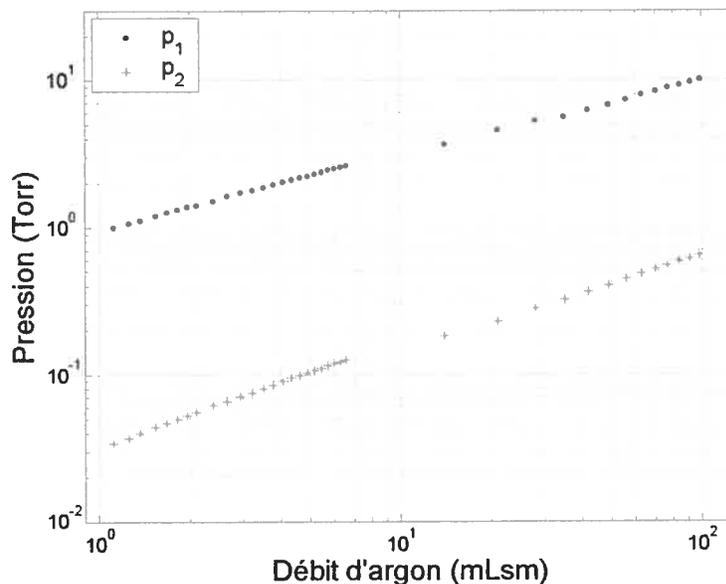


Figure 3.3 Variation (courbe d'étalonnage) de la pression à l'entrée et de celle à la sortie d'un tube de 6 mm de diamètre interne et de 2 m de longueur en fonction du débit d'argon incident.

Il apparaît que la pression mesurée du côté du système de pompage est bien inférieure à celle du côté de l'arrivée des gaz, et ce d'au moins une décade. Nous pouvons aussi observer que Δp croît fortement lorsque le débit du gaz augmente, passant approximativement de 1 Torr pour 1 mLsm à environ 9 Torr pour 100 mLsm². En utilisant la figure 3.3 et en émettant l'hypothèse que la pression décroît linéairement entre l'entrée et la sortie du tube, nous pouvons estimer la pression du gaz $p_0(z)$ en une abscisse z donnée le long du tube.

² Il est à noter que le gradient de pression mesuré serait encore bien plus important pour des tubes de plus petits diamètres. En effet, d'après Munson *et al.*^[47] la dépendance de la différence de pression en fonction du rayon r du tube est en $1/r^4$ en émettant certaines hypothèses qui sont explicitées dans cette référence.

En définitive, nous avons montré que lorsque le diamètre du tube est faible, la pression et le flux du gaz ne constituent pas deux variables indépendantes, nous obligeant à préciser systématiquement à quelle position la pression du gaz est déterminée (p_1 , p_2 ou p_0).

3.3 Optimisation de l'émission des UVV dans un plasma d'argon

L'émission des UVV de l'argon, à 105 nm et 107 nm, résulte de la désexcitation d'atomes dans les états résonnants 1P_1 et 3P_1 de la configuration orbitale électronique $3p^54s$ ^[48]. D'après Mitchell et Zemansky^[48], ces niveaux résonnants sont alimentés par suite de collisions de très faible énergie à partir des états métastables 3P_0 et 3P_2 de la même configuration $3p^54s$. Dans ce domaine spectral UVV, les photons sont absorbés à la fois par l'air et par la plupart des matériaux, telle la silice fondue. C'est pourquoi ce rayonnement ne peut pas être directement détecté par spectroscopie d'émission optique qui ne soit pas effectuée sous vide. Pour cette raison, nous avons choisi d'utiliser plutôt une méthode de spectroscopie d'absorption optique, ne nécessitant pas un spectromètre sous vide, afin de déterminer les variations de population de ces métastables en fonction des paramètres du plasma, dans le but de remonter aux variations d'intensité d'émission des UVV.

3.3.1 Expérience d'absorption optique

La figure 3.4 représente le montage expérimental utilisé lors de nos mesures spectroscopiques par absorption optique. Une lampe d'argon éclaire le plasma perpendiculairement à l'axe du tube. Le flux lumineux émis par la lampe est modulé par un secteur tournant. Rendu ensuite parallèle par une lentille, il traverse ainsi le plasma, puis est focalisé sur l'entrée d'une fibre optique qui le conduit vers un spectromètre où il est diffracté.

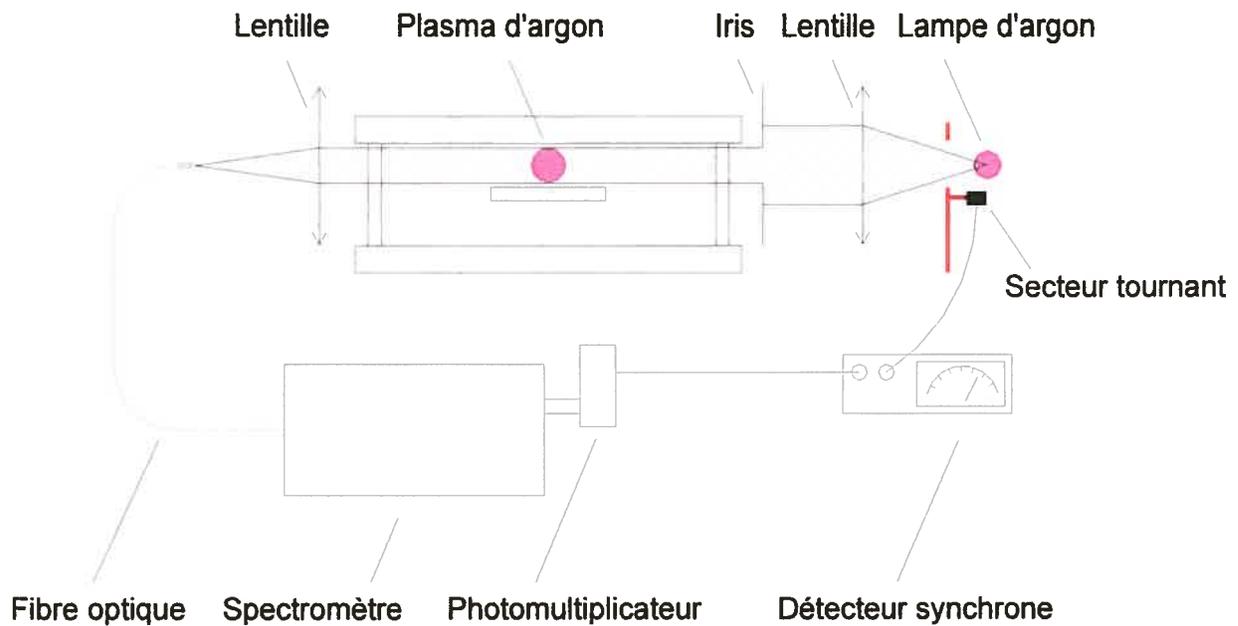


Figure 3.4 Dispositif expérimental de mesure de l'absorption optique due aux métastables d'une décharge d'argon entretenue dans la structure triplaque.

Nous enregistrons l'absorption de la transition Ar I 763.5 nm, qui mène à la population du niveau 3P_2 . Le courant sortant du photomultiplicateur est mesuré au moyen d'un détecteur synchrone qui permet de s'affranchir de l'émission spontanée du plasma, le signal de synchronisation provenant de l'alimentation du secteur tournant. En l'absence de plasma, le signal mesuré est d'intensité I_0 ; avec plasma, le signal transmis (I_t) diminue, car une partie du faisceau a été absorbée par le plasma. Nous mesurons le coefficient d'absorption totale de la raie située à 763.5 nm :

$$A_L (\%) = \left(1 - \frac{I_t}{I_0} \right) \times 100. \quad (10)$$

Afin d'alléger l'écriture, nous désignons ce coefficient par le terme "absorption".

Le circuit des gaz est identique à celui utilisé précédemment (figure 3.1). Toutes les mesures ont été effectuées à 70 cm de la jauge 1 et à 41 cm de l'arrivée de puissance (figure 3.5). Le choix de ces deux distances tire son origine de notre volonté de montrer que le système mis en place peut fonctionner à des distances relativement éloignées du système de pompage et de l'arrivée de puissance.

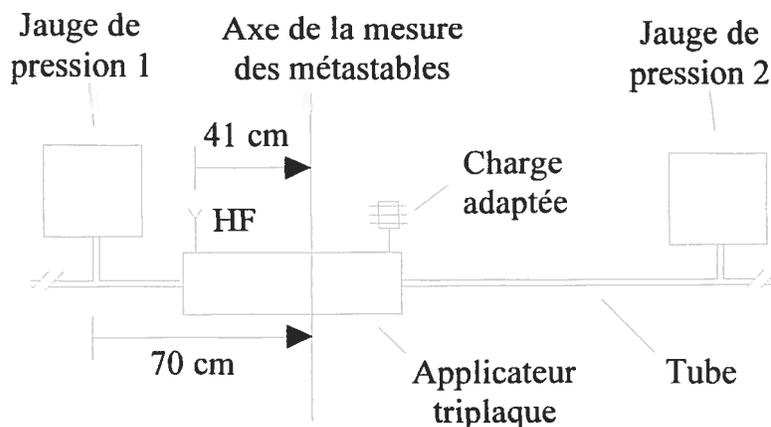


Figure 3.5 Position axiale à laquelle s'effectue la mesure des métastables.

Il est possible de remonter à la densité de population absolue des métastables^[8]. Dans le cas présent, nous souhaitons uniquement optimiser notre système afin de maximiser l'intensité d'émission d'UVV. Par conséquent, nous nous contenterons de déterminer les variations relatives de l'absorption par les métastables en fonction des paramètres du plasma.

3.3.2 Importance du degré de pureté de l'argon

Avant d'entamer l'optimisation des paramètres du plasma permettant d'obtenir la plus forte émission d'UVV, il est nécessaire d'étudier la destruction des métastables par la présence d'impuretés. En effet, dans toute expérience utilisant des gaz dans une enceinte à pression réduite, une certaine contamination ne peut être évitée. Nous cherchons à déterminer l'effet de la présence d'impuretés sur la population de métastables considérée précédemment. Afin de quantifier ce phénomène, nous avons introduit dans la décharge d'argon un pourcentage croissant d'azote. De fait, puisque l'air contient approximativement 78 % d'azote, ce gaz simule correctement une contamination éventuelle.

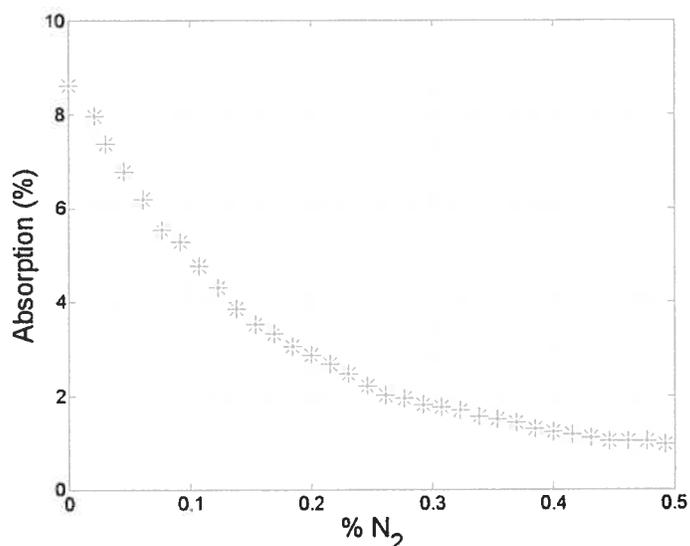


Figure 3.6 Effet de l'ajout d'azote dans la décharge d'argon sur le signal d'absorption optique.

Les résultats présentés à la figure 3.6 montrent que plus le pourcentage d'azote augmente, plus la population de métastables diminue. L'influence de la présence d'azote sur la population de métastables est considérable, puisqu'un ajout de seulement 0.5 % de ce gaz suffit à diminuer le signal d'absorption par un facteur d'environ dix. Par la suite, nous avons donc pris grand soin de vérifier systématiquement la qualité du vide obtenu. Avant d'introduire l'argon, un pré-pompage a été effectué et pour nous assurer qu'il y a peu de contamination, nous avons contrôlé la rapidité de l'élévation de pression engendrée lors de la fermeture de la vanne.

3.3.3 Pression du gaz

Moisan et Ricard^[49] ont mesuré la densité de population des atomes métastables de l'argon dans le plasma d'une colonne positive et dans un plasma d'onde de surface. Dans les deux cas, un maximum d'absorption est obtenu en fonction de la pression. Ce maximum est situé à la même valeur de pression, soit environ 120 mTorr dans un tube de 26 mm de diamètre interne. Un résultat similaire au sens d'un maximum en pression devrait donc être obtenu dans notre système. Dans un premier temps, nous avons cherché ce maximum dans une gamme de pression p_2 allant de 0.5 Torr à 40 Torr (figure 3.7). Il apparaît clairement que, dans ces conditions, le signal d'absorption ne fait que diminuer lorsque la pression augmente. Ceci peut s'expliquer par une

accentuation du phénomène d'auto-absorption³ et de la destruction collisionnelle des états métastables lorsque la pression croît. Cette expérience a été menée à débit constant (70 mLsm). La puissance incidente (80 W) et la fréquence de la source (700 MHz) sont également restées inchangées tout au long de l'expérience.

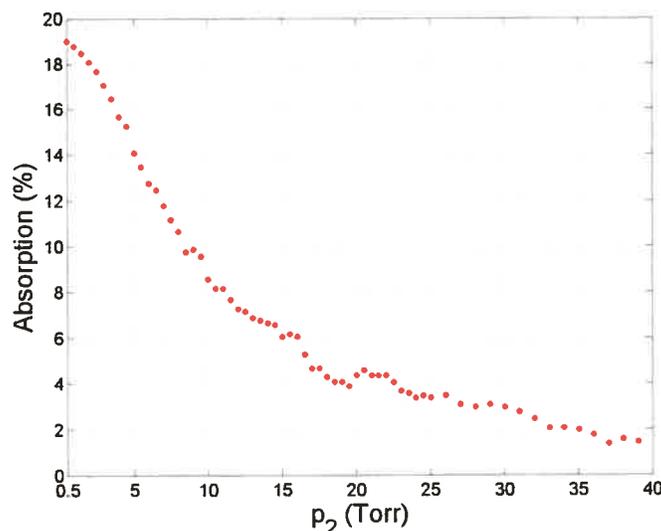


Figure 3.7 Mesure d'absorption en fonction de la pression relevée du côté du système de pompage.

Dans un deuxième temps, de manière à balayer de plus basses pressions, nous avons successivement abaissé le débit d'argon à 20 mLsm, puis 10 mLsm, 5 mLsm, et 1 mLsm. Pour chacun des débits, nous avons enregistré une diminution de l'absorption au fur et à mesure que la pression, par réduction de la vitesse de pompage, augmentait (non montré). Par conséquent, nous n'avons pas constaté l'occurrence d'un maximum d'absorption en fonction de la pression.

Nous avons ensuite mesuré la variation du signal d'absorption en fonction du débit d'argon (avec la vanne totalement ouverte). Le débit a été progressivement augmenté de 1 mLsm à 73 mLsm. Nous avons obtenu un très net maximum d'absorption, égal à 30 %, et situé à 8 mLsm (figure 3.8.a). Nous pouvons nous interroger sur l'existence d'un maximum réel d'absorption lorsque la pression est modifiée par l'intermédiaire du flux, alors qu'il n'y avait pas de tel maximum lorsque l'ouverture de la vanne avait été variée. Ces deux méthodes permettant d'accroître la pression n'ont pas, en effet, les mêmes conséquences. Lorsque le flux est supérieur à

³ Un photon émis par un atome est réabsorbé par un atome voisin en effectuant la transition inverse.

8 mLsm, l'absorption est contrôlée par la pression du gaz (plus cette dernière est faible, plus l'absorption est importante). En revanche, dans le cas où le flux est inférieur à 8 mLsm, nous pensons que le taux de contamination est le facteur ayant le plus grand impact sur la densité de population des métastables. Un élément appuyant cette hypothèse est l'observation d'un changement de couleur du plasma lorsque le débit est inférieur à 2 mLsm et que la vanne est fermée pour accroître la pression. De fait, comme nous l'avons observé à la figure 3.6, l'influence de la contamination du gaz sur le pourcentage d'absorption est très important. Ainsi, l'existence de ce maximum d'absorption en flux découle selon nous d'une compétition entre la pureté et la pression d'argon.

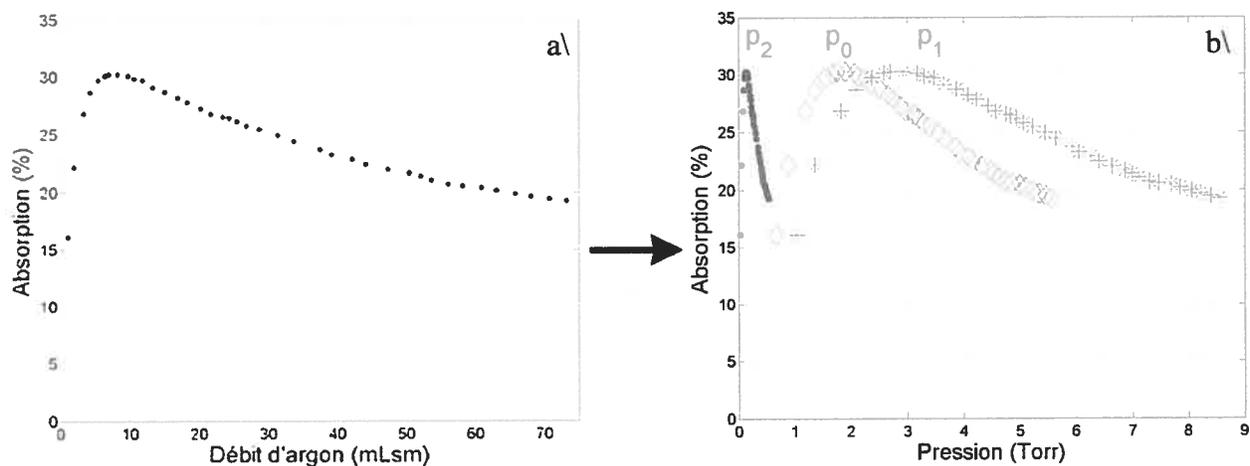


Figure 3.8 Mesure d'absorption (vanne totalement ouverte) en fonction (a) du débit et (b) de la pression déterminée à la sortie du tube (p_2), à l'abscisse de la mesure des métastables (p_0) et à l'entrée du tube (p_1).

Nous avons cherché à quelle valeur de pression correspond chacun des débits de la figure 3.8.a en utilisant la courbe d'étalonnage "débit-pression" (figure 3.3). Les résultats de la figure 3.8.b montrent que ce maximum en flux correspond à un maximum en pression situé entre 140 mTorr (sortie) et 2.8 Torr (entrée). Avec l'hypothèse d'une décroissance de pression linéaire entre p_1 et p_2 , ce maximum devrait correspondre à une pression p_0 d'environ 1.8 Torr.

3.3.4 Puissance incidente et fréquence du générateur

Comme nous l'avons vu à la section 2.4.3, l'onde entretenant la décharge est une onde progressive. Ainsi, à une abscisse fixée le long de l'applicateur, un accroissement de la puissance incidente ne mène que partiellement à une augmentation de la puissance absorbée par la décharge; la puissance restante est dissipée dans la charge adaptée ou sert à créer une nouvelle portion de plasma.

Nous avons mesuré le signal d'absorption sur ArI 763.5 nm en fonction de la puissance incidente (figure 3.9.a). Il apparaît effectivement que le signal d'absorption augmente relativement peu lorsque la puissance incidente croît entre 20 et 100 W. Quant à la fréquence du générateur, elle a peu d'influence sur le signal d'absorption entre 200 et 700 MHz (figure 3.9.b).

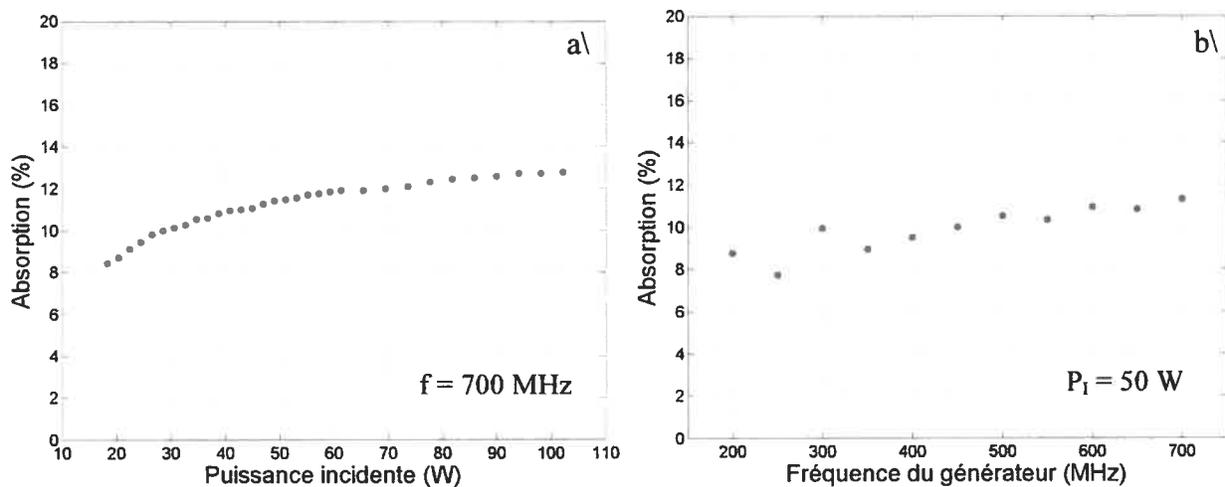


Figure 3.9 Mesure d'absorption sur Ar I 763.5 nm en fonction (a) de la puissance incidente et (b) de la fréquence du générateur.

En conclusion, nous avons observé que la densité de population des métastables 3P_0 et 3P_2 de la configuration $3p^54s$ d'un plasma d'argon créé dans la structure triplaque dépend principalement de deux paramètres, à savoir le degré de pureté de l'argon et sa pression.

3.4 Protocole expérimental de stérilisation

Après avoir ajusté les paramètres expérimentaux permettant de maximiser l'intensité d'émission d'UVV, nous allons maintenant détailler le protocole de stérilisation adopté. Nous commencerons par présenter l'aspect microbiologique de ce protocole, puis nous décrirons la manière dont chacune des expériences de stérilisation a été réalisée.

3.4.1 Dépôt et récupération de spores dans des tubulures

L'objectif poursuivi est la stérilisation de spores *Bacillus subtilis* ATCC^{MD} 9372⁴ déposées dans des tubulures de Téflon. Nous avons utilisé ce matériau pour plusieurs raisons. Premièrement, il supporte sans détérioration le passage à l'autoclave grâce à sa température de fusion élevée (270 °C) pour un polymère, ce qui permet d'assurer sa stérilité avant le dépôt des spores. Deuxièmement, il peut facilement être découpé, ce qui offre une grande souplesse d'usinage. Les tubulures utilisées ont 10 mm de longueur et un diamètre interne égal à 4 mm. Le volume maximal d'eau qu'elles peuvent contenir est donc de 125 µl. Dans un premier temps, nous avons effectué des essais avec ce volume. Les spores bactériennes étaient déposées à l'intérieur, au centre des tubulures, préalablement stérilisées deux fois à l'autoclave. Nous laissons les spores sécher dans les tubulures à température ambiante dans des boîtes de Pétri stériles. Il s'est avéré que le nombre de spores récupérées par la suite était toujours inférieur à celui déposé. Nous avons alors vérifié, après avoir récupéré les tubulures, si les boîtes de Pétri étaient encore stériles, ce qui n'était pas le cas : lors du processus de séchage, une partie du dépôt sortait de la tubulure. La réduction du volume d'eau à 50 µl a alors permis de résoudre ce problème. Le séchage de 10^4 - 10^5 - 10^6 spores dans 50 µl d'eau à l'intérieur des tubulures s'effectue à température ambiante et prend de 2 à 3 jours⁵.

De manière à récupérer les spores après traitement, chaque tubulure est déposée individuellement dans une éprouvette contenant un détergent (5 ml de Tween 80 à concentration

⁴ Nouvelle appellation : *Bacillus atrophaeus* ATCC^{MD} 9372 [50].

⁵ Afin de réduire ce temps de séchage, nous avons introduit les tubulures dans une hotte à flux laminaire (à la température ambiante) ou dans un incubateur à 37 °C. Ces tests ont également démontré un excellent taux de récupération pour chacune de ces méthodes de séchage. Néanmoins, puisque nous avons effectué les premiers tests de stérilisation en laissant sécher les spores à température ambiante, nous avons conservé cette méthode par la suite afin de ne pas modifier plusieurs paramètres à la fois.

de 0.5% dans du salin). Le contenu de celle-ci est ensuite soumis à un vortex vigoureux. Le nombre de spores récupérées est ensuite évalué selon les standards de détermination des comptes viables sur gélose, après incubation à 37 °C durant 24 heures. Le taux de récupération des spores non-exposées au plasma se situe entre 90 % et 110 %. Les expériences conduites ont démontré peu de contamination microbienne lors des diverses manipulations.

Le recyclage des tubulures s'effectue ainsi : celles-ci sont mises à tremper 24 heures dans un détergent de nettoyage (Liqui-Nox^{MD}) puis sont rincées abondamment sous l'eau courante et avec de l'eau distillée. Par la suite, elles sont introduites dans des béciers contenant de l'eau et subissent deux passages à l'autoclave, après quoi elles sont séchées à la température de la pièce. Cette procédure fonctionne bien puisque le taux de récupération des spores dans des tubulures recyclées est très semblable à celui obtenu avec des tubulures neuves. Nous allons maintenant présenter le déroulement d'une expérience de stérilisation.

3.4.2 Expérience de stérilisation

Chaque test de stérilisation est réalisé sur une tubulure à la fois. Un tube en silice fondue de 6 mm de diamètre interne contient le gaz plasmagène et accueille la tubulure contaminée. De manière à pouvoir facilement insérer et retirer les tubulures (par la seule action de la gravité), leur diamètre externe a été réduit de 6 mm à 5.7 mm. Mais, du fait de ce rétrécissement, le flux du gaz peut déplacer la tubulure dans le tube. Aussi, nous avons introduit une butée en Téflon (préalablement stérilisée) légèrement plus grosse et qui ne bouge pas lors de ces opérations (figure 3.10). La tubulure est alors placée en amont de cette butée (dans le sens du flux du gaz). De la sorte, la mise au vide, le flux d'argon et le retour à la pression atmosphérique⁶ n'ont pas d'incidence sur l'emplacement de la tubulure.

⁶ Dans le cas où ce dernier est effectué en amont du tube (dans le sens de l'écoulement du gaz plasmagène).

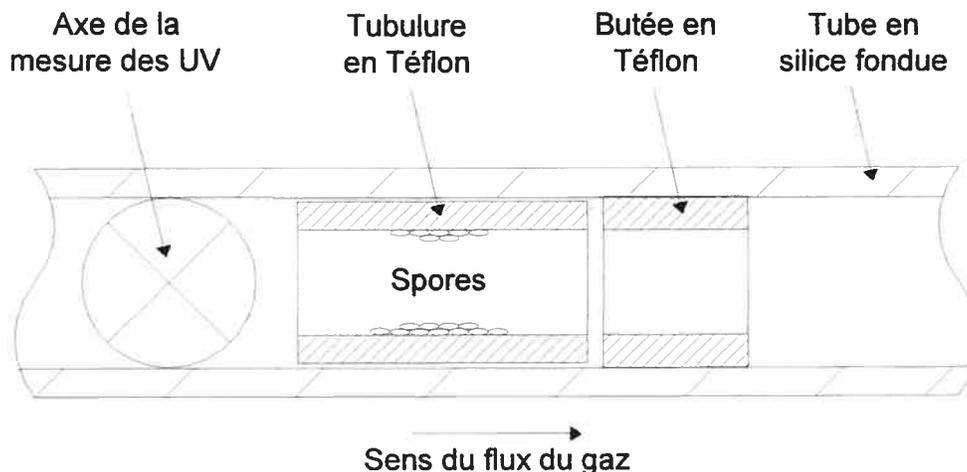


Figure 3.10 Schéma de principe d'une expérience de stérilisation de l'intérieur d'une tubulure effectuée à flux d'UVV constant.

L'intensité du champ électrique est suffisante pour créer le plasma dans le tube en silice fondue ainsi qu'à l'intérieur de la tubulure. Par conséquent, les atomes métastables (couplés aux niveaux résonnants émetteurs d'UVV) pouvant intervenir dans le processus de stérilisation sont soit créés dans le volume de gaz contenu dans la tubulure, soit en amont de celle-ci. En parallèle à chacun des tests de stérilisation, nous avons mesuré l'intensité de l'émission des UVV. L'axe de la mesure de la densité de population des métastables est situé à seulement 2 cm en amont de la tubulure. De cette manière, nous pouvons nous assurer que chaque expérience de stérilisation est effectuée à flux d'UVV constant d'une expérience à l'autre.

Au cours des expériences, le tube à décharge est fréquemment retiré et réintroduit dans la ligne triplaquée afin d'y insérer une tubulure contenant les spores. Les premiers raccords entre le tube et le circuit des gaz utilisaient un anneau de serrage avec de la graisse à vide. Ce système permettait une bonne qualité de vide, mais la graisse pouvait souiller les substrats. Nous avons alors opté pour des raccords de la marque Swagelok^{MD}. Ceux-ci permettent d'éviter la contamination des tubulures, tout en offrant également une bonne étanchéité.

Chacun des tests de stérilisation a été effectué dans des conditions opératoires identiques qui sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 3.1 Conditions opératoires adoptées et maintenues constantes lors de chacune des expériences de stérilisation.

Volume d'eau contenant les spores avant séchage	50 μ l
Fréquence des micro-ondes	700 MHz
Puissance incidente	20 W
Puissance absorbée par le plasma	5 W
Puissance réfléchie	0 W
Longueur du plasma	65 cm
Flux d'argon	8 mLsm
Pression mesurée du côté du système de pompage (p_2)	140 mTorr
Pourcentage d'absorption des métastables mesuré à 2 cm en amont de la tubulure (figure 3.10)	30 %
Abscisse de la tubulure, mesurée par rapport à la position d'arrivée de puissance (figure 3.5)	41 cm

Nous allons maintenant présenter les résultats de stérilisation obtenus.

3.5 Courbes de survie

Afin de juger de l'efficacité d'une technique de stérilisation et de comprendre les mécanismes sous-jacents à celle-ci, le recours à des courbes de survie est aujourd'hui généralisé^[44]. Une courbe de survie représente le nombre de micro-organismes encore vivants, porté sur une échelle semi-logarithmique, en fonction du temps d'exposition au plasma. Chaque expérience a été répétée trois fois. Les barres d'erreurs, qui entourent la valeur moyenne du résultat obtenu à un temps donné, représentent l'écart-type associé à ces trois mesures. Trois courbes de survie ont été effectuées dans des conditions opératoires identiques (tableau 3.1) mais avec un nombre initial de spores différent : 10^6 , 10^5 et 10^4 spores (figure 3.11). Nous avons vérifié que la mise sous vide des tubulures n'induisait aucun effet bactéricide (voir les points qui correspondent au temps zéro). Les courbes obtenues sont toutes constituées de deux phases. La première, qui possède la plus forte pente, dure environ une minute. La deuxième, correspondant à des temps supérieurs à une minute, se caractérise par une pente plus faible.

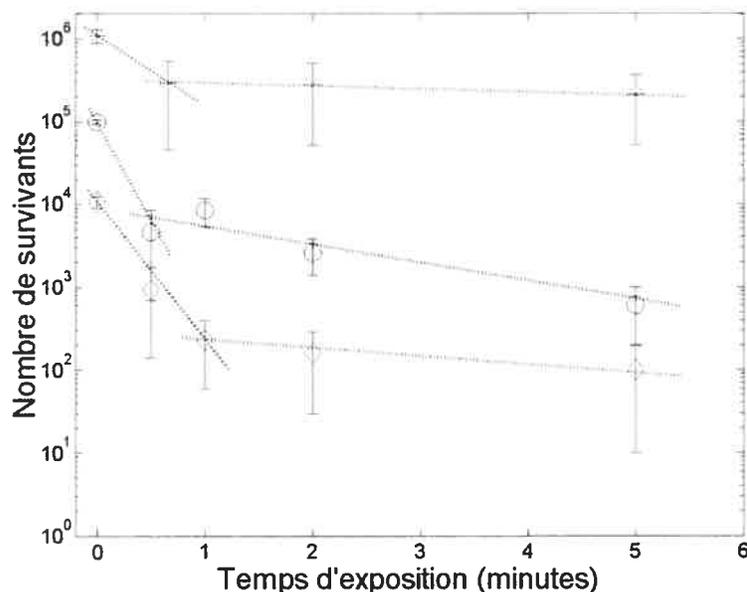


Figure 3.11 Courbes de survie obtenues dans un plasma d'argon créé au moyen de la structure triplaque à partir de trois dépôts de nombre initial différent.

Après cinq minutes de traitement, la stérilité n'a pu être atteinte pour aucun des dépôts initiaux (10^4 - 10^5 - 10^6). Nous avons vérifié qu'avec des durées de traitement supérieures (jusqu'à 40 minutes), les résultats obtenus avec 10^6 spores suivaient bien la pente de la deuxième phase.

3.6 Interprétation des résultats

L'argon pur étant chimiquement inerte, les UV sont les seuls agents bactéricides des expériences présentées^{[51], 7}. La cinétique d'inactivation à deux phases obtenue suggère un effet d'empilement des spores^[1,2]. Celui-ci tient au fait que le flux d'UV décroît de manière exponentielle lorsqu'il pénètre dans les spores. Ainsi, celles isolées ou situées dans les premières couches d'un empilement sont tuées très rapidement (durant la première phase), alors que celles qui sont cachées du flux direct des UV reçoivent un flux inférieur et sont soit tuées dans la

⁷ Il est à noter que nous ne pouvons affirmer que ce sont uniquement les UVV à 105 nm et 107 nm de l'argon qui participent à l'inactivation des spores, car des impuretés peuvent être présentes dans la décharge, pouvant également émettre des UV^[46]. Une étude à ce sujet est en cours, visant à comparer les résultats présentés avec une courbe de survie réalisée dans des conditions d'émission d'UVV négligeable.

deuxième phase, soit ne sont pas du tout inactivées. Par conséquent, dans nos conditions expérimentales, les UV seuls ne suffisent pas à stériliser les spores.

La compréhension de la cinétique d'inactivation de spores par plasma nécessite une étude de l'homogénéité des dépôts^[46]. Dans le cas où les surfaces de dépôt sont planes, la distribution des spores peut facilement être photographiée au microscope électronique à balayage (MEB).

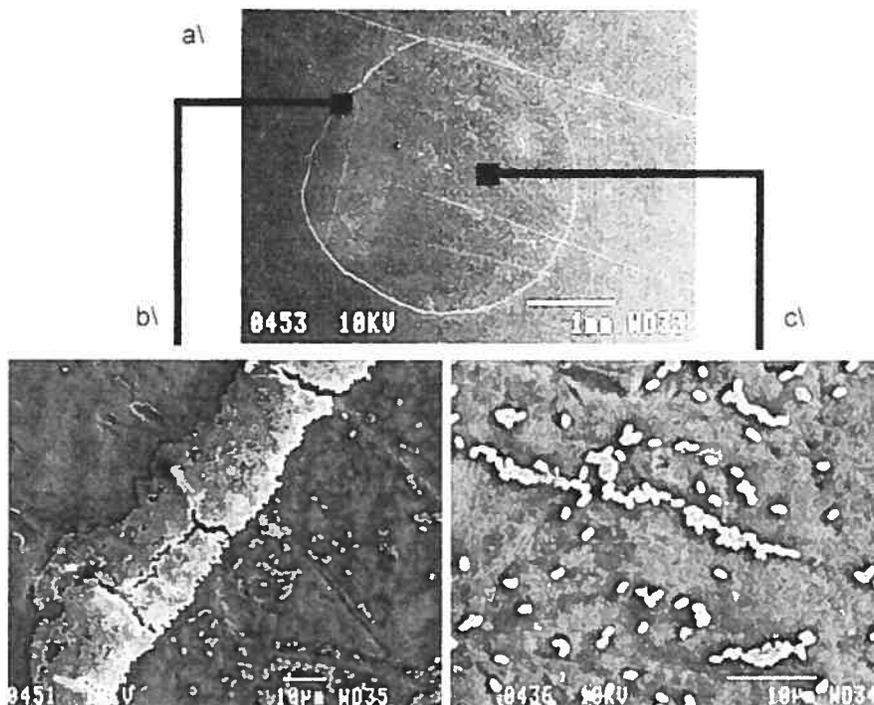


Figure 3.12 Évaluation par microscopie à balayage de la répartition de 10^6 spores dans un volume de 25 μ l d'eau déposées sur une surface plane de Téflon après séchage. Les spores sont regroupées à l'intérieur d'un cercle (a). Elles s'amassent à sa périphérie pour former une couronne (b) et se répartissent de manière plus ou moins homogène à l'intérieur du cercle (c).

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 3.12, la répartition des spores sur une surface, même plane, est complexe. Cette distribution de micro-organismes sous forme d'un "atoll" et d'un "lagon" est typique des dépôts réalisés en géométrie plane. Cet effet est connu depuis plusieurs années et a également été étudié par Crevier^[45].

Dans le cas qui nous intéresse, en l'occurrence des dépôts en géométrie cylindrique sur des surfaces de Téflon, nous disposons de peu de renseignements sur la répartition des spores. Nous n'avons pas pu visualiser directement les spores au MEB comme nous l'avons fait pour les dépôts de géométrie plane, pour deux raisons. Tout d'abord, le Téflon n'est pas un matériau transparent, d'où la nécessité de découper les tubulures afin de pouvoir observer les dépôts, ce qui constitue une procédure intrusive. Ensuite, la géométrie cylindrique ne permet pas une bonne visualisation en un seul cliché de l'ensemble du dépôt, comme nous l'avons effectué avec un dépôt plan à la figure 3.12.a.

Nous pouvons tout de même avoir une idée grossière de la configuration des dépôts en utilisant une suspension colloïdale de billes d'encre de Chine. D'après Madsen *et al.*^[52], ces billes possèdent un diamètre situé entre 0.1 μm et 1 μm . Les plus petites particules sont généralement sphériques, tandis que les grosses ont une apparence hautement irrégulière et peuvent être constituées d'agrégats de petites particules. Quant aux spores *B. subtilis*, elles peuvent être assimilées à des parallélépipèdes^[45] dont chacune des dimensions est de l'ordre du μm . Par conséquent, nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : puisque la taille des billes est du même ordre de grandeur que celle des spores *B. subtilis*, le processus de séchage devrait être similaire⁸.

Nous avons débuté notre expérience en laissant sécher les tubulures contenant les billes d'encre de Chine dans des boîtes de Pétri. Les résultats étaient complexes : la répartition des billes d'encre de Chine était différente d'une tubulure à l'autre. Nous avons alors émis l'hypothèse que l'acte de dépôt et le séchage ne s'effectuaient pas de manière statique. En effet, nous avons remarqué que les tubulures en Téflon peuvent rouler très facilement lors de toute manipulation. Afin d'obtenir des résultats reproductibles, nous avons construit des portoirs (figure 3.13), de manière à ce que les tubulures soit inoculées et qu'elles sèchent ensuite sans pouvoir se déplacer. Dans ces conditions, les dépôts de billes d'encre de Chine sont très reproductibles. Ils nous montrent que le dépôt des billes est essentiellement situé sur la face inférieure des tubulures. La gravité joue donc un rôle majeur lors du processus de séchage.

⁸ Une analogie de même type a déjà été effectuée par Crevier^[45] avec des microsphères de polystyrène (1 μm de diamètre). Comparées à ces dernières, les billes d'encre de Chine ont le désavantage de présenter une plus grande disparité quant à leurs dimensions, mais sont colorées, ce qui permet une visualisation grossière de leur répartition à l'œil nu.

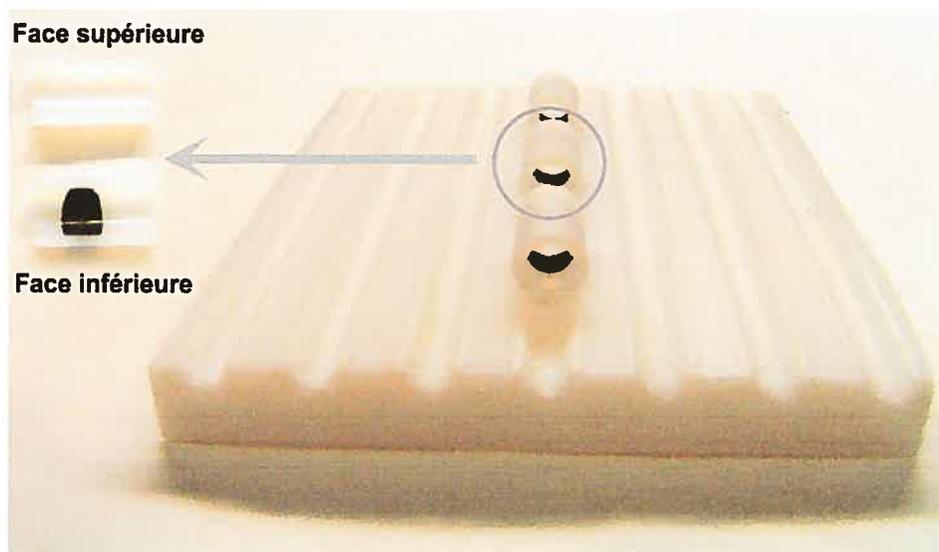


Figure 3.13 Portoir pour le séchage des tubulures : les spores sont déposées sur des tubulures et la suspension sèche sans que les tubulures (déposées sur le portoir) ne bougent. Les spores se déposent principalement sur la face inférieure des tubulures, comme nous le laisse supposer la configuration du dépôt séché des billes d'encre de Chine.

À l'instar des dépôts de billes d'encre de Chine, nous pouvons émettre l'hypothèse que les dépôts de spores sont également influencés par la gravité et qu'une plus forte concentration de spores se retrouve sur la face inférieure des tubulures. C'est pourquoi nous pensons que la faible pente des deuxièmes phases des courbes de survie obtenues (figure 3.11) est liée à la fois à un processus d'empilement des spores dans les tubulures et à la faible profondeur de pénétration des photons UV dans les dépôts.

3.7 Résumé et conclusion

Dans ce chapitre, nous avons amorcé une étude de la stérilisation de surfaces internes de tubes creux. Nous avons essayé de simuler le plus fidèlement possible une situation rencontrée en milieu hospitalier. Ceci nous a amené à étudier les gradients de pression existant dans des tubes de quelques millimètres de diamètre. Un protocole expérimental de stérilisation de la surface interne de tubulure a également été mis en place. Nous avons alors enregistré des courbes de survie à deux phases. Les UVV émis par notre décharge d'argon ne sont pas suffisants pour stériliser des surfaces sur lesquelles des spores sont empilées. C'est pourquoi nous devons à

l'avenir modifier les conditions opératoires afin d'obtenir un système plus performant. Par exemple, nous pourrions utiliser la synergie entre les UV et les radicaux oxygène d'une décharge N_2-O_2 . Il a en effet déjà été établi que ce type de plasma permet d'atteindre en post-décharge la stérilité de dépôts plans^[46].

Par la suite, nous avons démontré que pour obtenir des dépôts reproductibles en géométrie cylindrique, les tubulures doivent sécher de manière statique et qu'à cause de la gravité, les spores se déposent préférentiellement sur la face inférieure des tubulures. Une recherche plus quantitative de la configuration de ce type de dépôt pourra également être mise en œuvre, ce qui permettra d'étudier plus précisément l'effet de l'empilement des spores sur les cinétiques d'inactivation.

Conclusion

Nous avons démontré dans ce mémoire qu'il est possible d'exploiter la technologie triplaque pour créer de longues colonnes de plasma. Nous avons des objectifs spécifiques concernant, d'une part, l'applicateur de champ EM (dispositif compact et à large bande) et, d'autre part, les décharges ainsi créées (faible température du gaz à pression réduite et réduction de la contraction à haute pression). Au cours des deux premiers chapitres, nous avons exposé comment nous avons atteint ces objectifs. Le premier chapitre traite de la ligne triplaque qui correspond bien à un dispositif compact capable en outre de fonctionner efficacement dans une large gamme de fréquences. Dans le deuxième chapitre, nous avons montré que nous pouvions créer un plasma dont la température du gaz est inférieure à 40 °C, résultat difficile à obtenir dans les mêmes conditions opératoires avec les autres décharges HF. De plus, nous avons démontré que les décharges triplagues sont moins contractées à haute pression que les DOS.

Pour adapter les lignes triplaque aux spécificités liées à leur exploitation comme applicateur de champ EM (distance entre les plans de masse, longueur de la structure, transitions hors-axe), nous les avons d'abord examinées en l'absence de plasma. De fait, le recours à un analyseur de réseau a permis un diagnostic efficace et non intrusif de ces lignes dans la bande de fréquence désirée (50 - 2450 MHz). Nous avons alors démontré que la bonne utilisation de ces lignes en tant que lignes de transmission requiert la connaissance, notamment, de l'impédance d'entrée de la structure et de la fréquence de coupure du premier mode TE d'ordre supérieur. Nous avons aussi prouvé que même si ces structures sont ouvertes, elles ne rayonnent pas. Cette propriété facilite le diagnostic des colonnes de plasmas ainsi créées (introduction d'une antenne électrique, d'un collimateur relié à une photodiode, prise de photos).

Par ailleurs, grâce à la souplesse d'utilisation de cette technologie, nous avons pu comparer des décharges ainsi induites avec des décharges d'ondes de surfaces entretenues dans les mêmes conditions opératoires. Nous avons obtenu une plus faible densité de plasma, à l'origine d'une température du gaz plus basse et d'un volume de décharge plus important pour une même

puissance absorbée. Ces nouveaux applicateurs se positionnent donc de manière complémentaire dans le large éventail des applicateurs HF préexistants.

Au cours de ce travail, plusieurs questions ont été non résolues ou n'ont pu encore être abordées. Les points suivants mériteraient d'être étudiés :

- Créer des décharges de section rectangulaire pour un traitement au défilé de surfaces planes.
- Etudier l'homogénéité des décharges obtenues avec différents gaz plasmagènes.
- Utiliser la méthode de tomographie optique (déconvolution spatiale à deux dimensions) pour diagnostiquer l'homogénéité radiale et azimutale des colonnes de plasma.
- Améliorer encore l'homogénéité axiale du plasma à pression réduite (affectée par un profil d'onde partiellement stationnaire) en analysant de manière plus approfondie les profils axiaux de champ électrique et d'intensité lumineuse. À cet effet, il faudra déterminer l'influence des enceintes à décharge et du plasma sur l'impédance caractéristique de la ligne triplaque. Ainsi pourrons-nous optimiser la valeur de l'impédance en modifiant par exemple la largeur de la bande conductrice centrale.
- Obtenir un système plus efficace de stérilisation. En effet, la stérilité de tubes creux formés de matériaux thermosensibles n'a pas encore été obtenue. L'empilement des spores bactériennes est un obstacle à l'obtention de la stérilité. C'est pourquoi d'autres études visant à améliorer la stérilisation sur ce type de dépôt seront nécessaires.

Bibliographie

- [1] D.M. Pozar, "Microwave Engineering", Wiley, 1998
- [2] J.S.Rao et B.N. Das, "Analysis of asymmetric stripline by conformal mapping", IEEE Trans. on microwave theory and techniques, vol. MTT-27, no. 4, p. 209-303, 1979
- [3] D.W. Kammler, "Calculation of characteristic admittances and coupling coefficients for strip transmission lines", IEEE Trans. on microwave theory and techniques, vol. MTT-16, no. 11, p. 925-937, 1968
- [4] H. Howe Jr, "Stripline circuit design", Artech, 1974
- [5] R.N. Ghose, "Microwave circuit theory and analysis", McGraw-Hill, 1963
- [6] S.Y. Liao, "Microwave Devices and Circuits", Prentice-Hall, 1985
- [7] T.K. Ishii, "Handbook of Microwave Technology", Academic Press, 1995
- [8] Y.T. Lo et S. W. Lee, "Antenna Handbook", vol. 4, chap. 28, 1993
- [9] H. Yue, K.L. Virga, J.L. Prince, "Dielectric constant and loss tangent measurement using a stripline fixture", IEEE Electronic Components and Technology Conference, 1998
- [10] M. Caulton, J.J. Hughes, H. Sobol, "Measurements on the properties of microstrip transmission lines for microwave integrated circuits", RCA Review, 1966
- [11] P.A. Rizzi, "Microwave Engineering", Prentice-Hall, 1988
- [11] A.F. Harvey, "Microwave Engineering", Academic Press, 1963
- [13] K.C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, P. Bhartia, "Microstrip lines and slotlines", Artech, 1996
- [14] I.J. Bahl et R. Garg, "A designer's guide to stripline circuits", Microwaves, 1978
- [15],[16],[17],[18],[19] Z. Zakrzewski, rapports internes non publiés des années 1999 à 2003
- [20] J. Pelletier, A. Lacoste, T. Lagarde, M. Moisan, Y. Arnal, Z.Zakrzewski, "Diviseur de puissance pour dispositif à plasma" (demande déposée en France le 13 septembre 1999 sous le numéro FR 99/11422) par le CNRS et l'Université de Montréal. Demande PCT/WO 01/20710A1 (22 mars 2001), brevet européen EP/216493 B1 (délivrance : 23/07/2003), "Power splitter for plasma device", brevet américain 6,727,656 (27/04/2004).
- [21] J. Pelletier, A. Lacoste, T. Lagarde, M. Moisan, Y. Arnal, Z. Zakrzewski, J. Pollak, "Microwave power divider based on a waveguide to coaxial probe transition", à soumettre

- [22] M. Moisan, R. Pantel, J. Hubert, E. Bloyet, P. Leprince, J. Marec, A. Ricard, "Production and applications of microwave surface wave plasma at atmospheric pressure", *Journal of Microwave Power*, vol. 14, p. 57-61, 1979
- [23] Z. Zakrzewski et M. Moisan, "Plasma sources using long linear field applicators", *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 4, p. 379-397, 1995
- [24] Z. Zakrzewski et M. Moisan, "Linear field applicators", *J. Phys. IV France*, 8, Pr7, p. 109-118, 1998
- [25] A.M. Bilgic, U. Engel, E. Voges, M. Kuckelheim, J.A.C. Broekaert, "A new low-power microwave plasma source using microstrip technology for atomic emission spectrometry", *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 9, p. 1-4, 1999
- [26] A. Bass, C. Chevalier, M.W. Blades, "A capacitively coupled microplasma (CC μ P) formed in a quartz wafer", *The Royal Society of Chemistry*, 2001
- [27] S. Schermer, N.H. Bings, A.M. Bilgiç, R. Stonies, E. Voges, J.A.C. Broekaert, "An improved microstrip plasma for optical emission spectrometry of gaseous species", *Spectrochimica Acta Part B* 58, 2003
- [28] F. Iza et J.A. Hopwood, "Low-power microwave plasma source based on a microstrip splitting resonator", *IEEE Transactions on plasma science*, vol. 31, no. 4, p. 782-787, 2003
- [29] R. Stonies, S. Schermer, E. Voges, J.A.C. Broekaert, "A new small microwave plasma torch", *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 13, p. 604-611, 2004.
- [30] J.A.C. Broekaert, "The development of microplasmas for spectrochemical analysis", *Anal. Bioanal. Chem.*, p. 182-187, 2002
- [31] M. Moisan, Z. Zakrzewski, Y. Kabouzi, D. Kéroack, T. Fleisch, J. Pollak, "High-power surface-wave plasma sources based on parallel-plate-line technology", à soumettre
- [32] M. Moisan et Z. Zakrzewski, "Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 24, p. 1025-1048, 1991
- [33] M. Moisan et J. Pelletier, "Microwave Excited Plasmas", Elsevier, ch. 5 par M. Moisan et Z. Zakrzewski, p. 123-180, 1992
- [34] Y. Kabouzi, M.D. Calzada, M. Moisan, K.C. Tran, C. Trassy, "Radial contraction of microwave-sustained plasma columns at atmospheric pressure", *J. Phys.*, vol 91, no. 3, 2002

- [35] Y. Kabouzi, "Contraction et filamentation des décharges micro-ondes entretenues à la pression atmosphérique : application à la détoxification des gaz à effet de serre", Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2003
- [36] A. Durandet, Y. Arnal, J. Margot-chaker, M. Moisan, "Etude d'une source de plasma entretenue par une onde de surface électromagnétique à 2.45 GHz en régime de chute libre", J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 22, p. 1288-1299, 1989
- [37] G. Sauvé, M. Moisan, Z. Zakrzewski, C.A. Bishop, "sustaining long linear uniform plasmas with microwaves using a leaky-wave (throughguide) field applicator", IEEE Trans. antennas Propagat., vol. 43, no. 3, p. 248-256, 1995
- [38] J. Margot-Chaker, M. Moisan, M. Chaker, V.M.M. Glaude, P. Lauque, J. Paraszczak, G. Sauvé, "Tube diameter and wave frequency limitations when using the electromagnetic surface wave in the $m = 1$ (dipolar) mode to sustain a plasma column", J. Appl. phys., vol. 66, no. 9, 1989
- [39] J. Margot-Chaker, M. Moisan, A. Ricard, "Optical Radiation Efficiency of Surface-Wave produced Plasmas as Compared to DC Positive Columns", Journal of applied spectroscopy, vol. 45, p. 260-271, 1991
- [40] D.F. Young, B.R. Munson, T.H. Okiishi, "A brief introduction to fluid mechanics", J. Wiley & Sons, 2001
- [41] Y.P. Raizer, "Gas Discharge Physics", Springer-Verlag, 1991
- [42] D. Pittet, S. Harbarth, A. Henry, C. Ruef, "Stérilisation à l'oxyde d'éthylène : utilisation et limites", Swiss-NOSO, vol. 4, no. 1, Mars 1997
- [43] M. Moisan, J. Barbeau, J. Pelletier, B. Saoudi, "La stérilisation par plasma froid à pression très inférieure à la pression atmosphérique", Le Vide, n° 303, vol. 1/4, 2002
- [44] M. Moisan, J. Barbeau, S. Moreau, J. Pelletier, M. Tabrizian, L'H. Yahia, "Low-temperature sterilization using gas plasmas : a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms", International Journal of Pharmaceutics, vol. 226, no.1, p. 1-21, 2001
- [45] M.C. Crevier, "Effets de la stérilisation par plasma N_2-O_2 en post-décharge sur des spores de *B. Subtilis* et surfaces de biopolymères", mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Mai 2003

- [46] N. Philip, "Stérilisation à basse température et à pression réduite en post-décharge de plasma : étude et analyse du rôle des UV dans l'inactivation de spores bactériennes", mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Juin 2003
- [47] B.R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, "Fundamentals of fluid mechanics", J. Wiley & Sons, 1994
- [48] A.C.G. Mitchell et M. W. Zemansky, "Resonance radiation and excited atoms", Cambridge University Press, 1971
- [49] M. Moisan et A. Ricard, "Density of metastable atoms in an argon plasma produced by an RF surface wave", Canadian Journal of Physics, vol. 55, no. 11, p. 1010-1012, 1977
- [50] D. Fritze et R. Pukall, "Reclassification of bioindicator strains *Bacillus subtilis* DSM 2277 as *Bacillus atropheus*", International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, vol. 51, p. 35-37, 2001
- [51] M. Moisan, J. Barbeau, Marie-Charlotte Crevier, J. Pelletier, N. Philipp, B. Saoudi, "Plasma sterilization. Methods and mechanisms", Pure Appl. Chem., vol. 74, no.3, p. 349-358, 2002
- [52] S.J. Madsen, M. S. Patterson, B.C. Wilson, "The use of India ink as an optical absorber in tissue-simulating phantoms", Phys. Med. Biol., vol. 37. no. 4, 985-993, 1992
- [53] M. Moisan, Z. Zakrzewski, R. Pantel, P. Leprince, "A waveguide-based launcher to sustain long plasma columns through the propagation on an electromagnetic surface wave", IEEE Transactions on plasma science, vol. PS-12, no. 3, 1984
- [54] M. Moisan, Z. Zakrzewski, R. Pantel, "The theory and characteristics of an efficient surface wave launcher (surfatron) producing long plasma columns", J. Phys. D. : Appl. Phys., vol. 12, p. 219-237, 1979



2025年10月10日