



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



**UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES
DE SIDI-BEL-ABBÈS**

**Applications of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility Laboratory
(APELEC)**

THÈSE présentée par :

Nacéra HAMMADI

Soutenue le **14 mars 2013**

Pour obtenir le grade de : **Docteur Ès Science de l'Université de Sidi-Bel-Abbès**

Discipline/S spécialité : **Électrotechnique/Haute Tension**

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE
DE LA DÉPOLLUTION DE L'EAU
ET LA DÉSINFECTION DE L'AIR PAR
DÉCHARGE À BARRIÈRE DIÉLECTRIQUE**

THÈSE dirigée par :

M. Amar TILMATINE Professeur Université de Sidi-Bel-Abbès

JURY :

M. Karim MEDLES	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Président du jury
M. Amar TILMATINE	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Encadreur
M. Abdelber BENDAOU	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Examineur
M. Azzedine HAMID	Professeur	USTO-MB-Oran	Examineur
M. Youcef BENMIMOUN	Professeur	Université de Mascara	Examineur
M. Mohamed MESSAAD	M. C. A.	USTO-MB-Oran	Examineur
M. Smaïl KACHA	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Invité

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBÈS

**Faculté de Technologie
Département d'Électrotechnique**

Thèse présentée par

Nacéra HAMMADI

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Électrotechnique

Option :

Intitulé de la thèse

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE
DE LA DÉPOLLUTION DE L'EAU
ET LA DÉSINFECTION DE L'AIR PAR
DÉCHARGE À BARRIÈRE DIÉLECTRIQUE**

Présentée devant le jury composé de :

M. Karim MEDLES	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Président du jury
M. Amar TILMATINE	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Rapporteur
M. Abdelber BENDAOU	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Examineur
M. Azzedine HAMID	Professeur	USTO-MB-Oran	Examineur
M. Youcef BENMIMOUN	Professeur	Université de Mascara	Examineur
M. Mohamed MESSAAD	M. C. A.	USTO-MB-Oran	Examineur
M. Smaïl KACHA	Professeur	Université de Sidi-Bel-Abbès	Invité

Soutenue le : **14 mars 2013**

Table des matières
Index des figures
Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre 1	5
SYNTHÈSE SUR LA DBD VOLUMIQUE ET LA DBD SURFACIQUE. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE COMPARATIVE	
1.1. Introduction	6
1.2. Rappels sur les plasmas	6
1.3. Comment génère-t-on un plasma froid ?	8
1.4. Décharges à barrière diélectrique	9
1.4.1. Historique	9
1.4.2. Définition et caractéristique d'une DBD	9
1.4.3. Caractéristique électrique de la DBD	12
1.4.3.1. Paramètres de régulation de la DBD	13
1.4.4. Principe de la DBD	14
1.4.5. Description physique de la DBD	15
1.4.5.1. La DBD, un plasma filamentaire	16
1.4.5.2. Townsend mis en défaut	17
1.4.5.3. De l'avalanche au streamer	17
1.4.6. Effets d'une barrière diélectrique	19
1.4.6.1. Extinction d'un filament	19
1.4.6.2. Amorçage des filaments	20
1.4.6.3. Effet "mémoire" du diélectrique	20
1.5. Types de décharges à barrière diélectrique	23
1.5.1. Décharge volumique à barrière diélectrique	23
1.5.2. Décharge surfacique à barrière diélectrique	24
1.6. Étude expérimentale comparative entre la DBD en volume et la DBD de surface	25
1.6.1. Décharge en volume	26
1.6.2. Décharge de surface	26
1.6.3. Alimentation électrique de la décharge	26
1.6.4. Résultats et discussions	28
1.6.5. Commentaires	28
1.7. Décharges à barrière diélectrique dans les applications industrielles	30
1.8. Conclusion	31
Chapitre 2	32
L'OZONE ET SES APPLICATIONS	
2.1. Introduction	33
2.2. Découverte de l'ozone et les premières mesures	33
2.2.1. Découverte de l'ozone	33
2.2.2. Cycle de Chapman	34
2.3. Définition de l'ozone	34
2.4. Caractéristiques de l'ozone	35
2.5. Données physico-chimiques sur l'ozone	36
2.5.1. Propriétés physiques	36
2.5.2. Structure de l'ozone	37

2.6.	L'ozone : Bon ou mauvais	37
2.6.1.	Bon ozone	38
2.6.2.	Mauvais ozone	38
2.7.	Modes de production de l'ozone	39
2.7.1.	Production naturelle	39
	2.7.1.1. Formation de l'ozone par décharge électrique	39
	2.7.1.2. Formation de l'ozone par rayons UV	41
2.7.2.	Formation artificielle	42
	2.7.2.1. Lampes ultra-violettes	42
	2.7.2.2. Décharge à barrière diélectrique	44
2.8.	Comment l'ozone agit-il ?	45
2.8.1.	Réaction de l'ozone avec les substances oxydables	45
2.8.2.	Effet de l'ozone sur les bactéries	46
2.8.3.	Principe	47
2.9.	Puissant oxydant et excellent désinfectant	48
2.9.1.	Action microbicide	49
	2.9.1.1. Effet bactéricide	49
	2.9.1.2. Effet virulicide	50
	2.9.1.3. Effet fongicide	50
	2.9.1.4. Effet sporicide	51
2.9.2.	Action désodorisante	51
2.10.	Avantages et désavantages de l'ozone	52
2.10.1.	Désavantages	52
2.10.2.	Avantages	52
2.11.	Applications de l'ozone	53
2.12.	Conclusion	54
Chapitre 3	ÉTUDE ET RÉALISATION D'UNE ALIMENTATION HAUTE TENSION À HAUTE FRÉQUENCE POUR DBD	55
3.1.	Introduction	56
3.2.	Généralités sur les convertisseurs statiques	56
3.3.	Généralités et principe de fonctionnement des onduleurs	57
3.3.1.	Généralités	57
3.3.2.	Structure initiale de l'onduleur en pont	58
3.3.3.	Principe de fonctionnement de l'onduleur	59
	3.3.3.1. Étude des séquences de conduction	60
	3.3.3.2. Étude de fonctionnement	63
3.4.	Réalisation de l'alimentation électrique pour DBD à base du PIC 16F84A	63
3.4.1.	Source de tension sinusoïdale	63
3.4.2.	Conception de la maquette : Description de l'onduleur	67
	3.4.2.1. Bloc gérant l'étage de puissance	67
	3.4.2.2. Bloc gérant l'interface de puissance	70
	3.4.2.3. Bloc gérant la commande	76
3.4.3.	Transformateur élévateur	79
3.4.4.	Configuration initiale (avec MOSFETs)	79
3.4.5.	Configuration définitive (avec IGBTs)	79
3.5.	Utilisation de l'alimentation sinusoïdale et résultats obtenus	80
3.5.1.	Transformateurs utilisés	81
3.5.2.	Diagnostics et mesures de signaux électriques	82

3.6.	Réalisations de deux alimentations électriques à base de temporisateur NE555	87
3.7.	Conclusion	87
Chapitre 4	CARACTÉRISATION DE LA DBD SURFACIQUE ET APPLICATION POUR LA STÉRILISATION DE L'AIR	89
4.1.	Introduction	90
4.2.	Stratégie choisie : Traitement de l'air intérieur par plasma	90
4.3.	Dispositif expérimental	91
	4.3.1. Matériaux	91
	4.3.2. Électrodes	92
	4.3.3. Plaque de diélectrique	93
	4.3.4. Principe et configuration de la décharge	93
4.4.	Circuit électrique	94
4.5.	Quels paramètres tester ?	96
	4.5.1. Matériau diélectrique : Verre	96
	4.5.1.1. Influence de l'épaisseur du diélectrique	96
	4.5.1.2. Influence du nombre de fils	100
	4.5.2. Matériau diélectrique : Céramique	105
	4.5.2.1. Influence de l'épaisseur du diélectrique	105
	4.5.3. Influence de la nature du diélectrique : Étude comparative	109
4.6.	Caractéristique électrique du plasma	110
4.7.	Application pour la désinfection de l'air	112
	4.7.1. Chambres de traitement	112
	4.7.2. Description du dispositif expérimental	113
	4.7.3. Conditions opératoires	113
	4.7.4. Résultats obtenus	116
4.8.	Conclusion	119
Chapitre 5	CARACTÉRISATION DE LA DBD VOLUMIQUE ET APPLICATION POUR LA DÉPOLLUTION DE L'EAU	120
5.1.	Introduction	121
5.2.	Domaine d'application dominant : Production d'ozone	121
5.3.	Domaine de thèse : Traitement d'eau	122
5.4.	Dispositif expérimental	122
5.5.	Caractérisation de la décharge	125
	5.5.1. Caractérisation par des "expériences – un facteur à la fois"	126
	5.5.1.1. Influence de la tension appliquée	126
	5.5.1.2. Influence de la distance entre pointes	128
	5.5.1.3. Influence de l'épaisseur du diélectrique	128
	5.5.2. Modélisation expérimentale par plans d'expériences	129
	5.5.2.1. Développement de la méthode	130
	5.5.2.2. Logiciel MODDE 5.0	131
	5.5.2.3. Modélisation de la DBD pointe-plan	132
	5.5.2.4. Estimation de la puissance	133
	5.5.2.5. Résultats et discussions	133
5.6.	Description des réacteurs DBD réalisés	137
	5.6.1. Choix du réacteur	137
	5.6.2. Différentes versions du réacteur "cylindre-cylindre" réalisées	137
	5.6.2.1. Choix des matériaux	137

5.6.2.2.	Caractéristiques physiques du réacteur et des électrodes	138
5.6.3.	Caractérisations du réacteur DBD	142
5.6.3.1.	Mesure des signaux électriques	144
5.6.3.2.	Mesures de courant	145
5.6.3.3.	Physique de la décharge	147
5.6.3.4.	Influence de la fréquence de l'alimentation électrique	149
5.7.	Production d'ozone	150
5.7.1.	Description du dispositif expérimental	151
5.7.2.	Taux d'ozone	153
5.8.	Application pour la dépollution d'eau	155
5.8.1.	Système de purification de l'eau	155
5.8.2.	Conditions opératoires	156
5.8.3.	Analyses bactériologiques	159
5.8.3.1.	Résultats des analyses	159
5.8.3.2.	Notion d'indicateur	159
5.9.	Réalisation d'un SKID mobile de traitement d'eau	161
5.10.	Conclusion	164
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES		166
ANNEXES		171
ANNEXE A	ALIMENTATIONS COMPLÉMENTAIRES HAUTE TENSION À HAUTE FRÉQUENCE À BASE DU CIRCUIT INTÉGRÉ NE555	172
ANNEXE B	RÉSULTATS DES ANALYSES BACTÉRIOLOGIQUES	176
ANNEXE C	LES PRINCIPAUX DESCRIPTEURS DE LA QUALITÉ DE L'EAU	182
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		187

Six pages...

... Exprimant ma reconnaissance envers les gens qui ont contribué un peu, beaucoup, à la folie à la réalisation de cette thèse. Je ne savais pas trop comment m'y prendre pour écrire ces pages. Comme vous êtes nombreux à motiver mes remerciements, j'avais le choix entre réécrire une thèse ou commencer un roman. En fait, j'ai décidé d'en conserver au moins la présentation pour me simplifier la tâche sans pour autant enlever du plaisir à l'écrire.

Introduction

Buiaï avait fait les démarches possibles pour que je puisse travailler dans ce domaine. Nous avons tous trois, avec Prof. Amar Tilmatine, été les pionniers de la conception de la manip DBD à Taghît lors de la 7^{ème} conférence nationale sur la haute tension (CNHT '07) et c'est grâce à son enthousiasme ainsi qu'à sa volonté que, malgré son départ, j'ai consenti à continuer dans cette voie. Ses conseils scientifiques, son ouverture d'esprit ainsi que sa gentillesse m'ont beaucoup manqués, mais le plaisir de mener à bien ce projet a été une de mes motivations profondes quand à terminer proprement le travail entrepris.

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'équipe "Applied Electrostatics" de l'APELEC (Application of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility Laboratory). La disponibilité, les compétences et la passion des acteurs de mon quotidien m'ont permis de mener à bien ces travaux. Ces quelques remerciements témoignent donc de la reconnaissance que je porte à chacune de ces personnes.

Je ne puis commencer sans remercier Amar Tilmatine, Professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès, pour la qualité de son encadrement et la grande compréhension dont il a fait preuve face à l'organisation de mon temps de recherche perpétuellement remaniée. Si je connaissais déjà Amar depuis longtemps pour avoir été un de mes amis d'études, j'ai pu découvrir (ou redécouvrir) un homme aux grandes qualités humaines et scientifiques. Qu'il trouve en ce mémoire toute la reconnaissance que je lui adresse pour m'avoir aidé et notamment pour avoir initié les contacts avec de nombreuses équipes de recherche près desquelles j'ai cherché certaines compétences scientifiques disparues avec Buiaï. La grande disponibilité d'Amar et son écoute m'ont été précieuses ainsi que ses nombreux conseils qui s'avéraient très souvent (pour ne pas dire toujours !) porter leurs fruits. Travailler à son côté fut une chance peu commune, j'espère sincèrement pouvoir continuer cette collaboration dans le futur.

Je m'en voudrais d'oublier de remercier ici mon plus proche ami qui m'a supporté (et, je le sais, avec beaucoup de patience parfois !!!) tout au long de cette thèse : Sidi Mohamed Remaoun pour, entre autres, nos nombreuses discussions enrichissantes surtout durant notre trajet Oran- Sidi-Bel-Abbès, pour tout le temps et l'amitié qu'il m'a consacré.

Je souhaiterais vivement remercier le Directeur de Laboratoire "IRECOM", Youcef Ramdani, Professeur à l'Université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe de recherche pendant ces cinq années et pour la confiance et tout le soutien qu'il m'a témoigné.

Chapitre I : les "électrostaticiens"

L'électrostatique est la branche de la physique qui étudie les phénomènes créés par des charges électriques statiques pour l'observateur. L'équipe "Applied Electrostatics" d'APELEC et d'IRECOM est une équipe laborieuse qui comporte ... ! Par ordre alphabétique puisque chacun m'a autant apportée, je remercie : **Abdelber Bendaoud** pour sa sympathie et un peu de tout, **Karim Medles** et sa patience à me clarifier l'obscurité du logiciel MODDE.05, totalement nouveau pour moi, pour avoir supporté mon impatience et mon impertinence et surtout ses jolies modélisations, **Rabah ouidir** sans qui cette thèse n'aurait probablement jamais vu le jour. C'est toi, **Rabah**, qui m'a donné la chance de découvrir, en 2007, le monde fascinant à l'Université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès.

Par ailleurs, je tiens à remercier particulièrement et amicalement **Houari Sayeh** (Maître de Conférences à l'Université Djillali Liabès) pour sa gentillesse légendaire (ce n'est pas pour rien que l'on est chef de département !!!).

Je serais très ingrate si je ne mentionnais pas le rôle essentiel de notre collègue et technicien du laboratoire "IRECOM" **Djillali** qui m'a accompagné efficacement pour la mise en place et le bon fonctionnement de nos ozoniseurs, pour m'avoir usiné quelques pièces et m'avoir appris à recoller ce que les autres ou moi avions cassé.

Chapitre II : les "électroniciens"

La conception et la réalisation des alimentations haute tension-haute fréquence m'auront fait bouger !

À commencer par l'USTO dans le laboratoire Électronique de Puissance et Énergie Solaire (LEPES) où a été réalisée l'alimentation

à base de l'onduleur. Un merci particulier, donc, à **Mansour Zegrar** (Chargé de cours), grand manitou de l'électronique de puissance. J'ai passé presque une année dans son labo pour découvrir le merveilleux et mystérieux monde de l'électronique. Le bénévolat de cet amateur de l'électronique dans la réalisation de la chaîne de l'onduleur souligne l'intérêt qu'il n'a cessé d'apporter à cette thèse. Qu'il veuille bien m'excuser pour les dérangements que je lui ai causés pendant ces moments de détente et surtout pendant ces vacances de 15 jours. Ce fut une bonne initiation et nos échanges au cours de cette l'année -là ont été enthousiasmants.

Après "LEPES", toujours concernant le domaine de l'électronique mais bien plus proche géographiquement, un amical merci à **Fouad Belaïd** du laboratoire CAO (Conception Assisté par Ordinateur), non pas pour m'avoir toujours traité de "la Grande Géryvillienne" mais pour la réalisation des typons jusqu'aux circuits imprimés, et pour le temps qu'il m'a consacré à m'expliquer que la soudure des composants, ce n'était pas aussi simple que cela pouvait en avoir l'air !!!.

Je ne pourrai clore ce chapitre sans faire un tour par le fond du couloir du 2^{ème} étage du département d'Électronique où **Habib Mazari**, magasinier du même département, m'a très aimablement aidé pour la fourniture de la plupart des composants électroniques.

Chapitre III : les outils

Je ne les remercierai jamais assez. Sans eux, rien n'aurait été possible. Je nomme ici, l'acier inoxydable, le téflon, le verre, scotch aluminium, le cuivre, le logiciel MODDE5.0, la sonde HT et surtout l'oscilloscope numérique !!!

Conclusion

Comme tout a une fin, il m'a bien fallu soutenir... C'est pourquoi je remercie tous les membres du jury de s'être intéressés à mes travaux et d'avoir accepté de juger ce travail. Je citerai :

Monsieur Abdelber Bendaoud, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès,

Monsieur Youcef Benmimoun, Professeur à l'Université de Mascara,

Monsieur Azzedine Hamid, Professeur à l'USTO-Mohamed Boudiaf,

Monsieur Mohamed Messaad, Maître de Conférences à l'USTO-Mohamed Boudiaf,

Monsieur Smaïl Kacha, Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude envers Monsieur Karim Medles qui a bien voulu présider la soutenance.

Annexes

Pour avoir partagé avec moi ces cinq années pas toujours roses et m'avoir, de différentes manières souvent aidée, merci à:

... Noureddine Benouza, qui a pris la responsabilité de l'oscilloscope numérique.

... Mokhtar Bendjebbar mon ami, pour son soutien moral et son sourire.

... Hamid Bouzeboudja, à qui j'adresse un coup de cœur particulier pour sa bonne humeur.

... Mustapha Rahli, pour m'avoir rappelé à chaque fois qu'une publication est toujours la bienvenue.

... Azzedine Hamid, qui a toujours une idée.

... *Naïma Ould Saadi*, pour tellement de choses.

... *Soraya Hammadi*, pour son côté humain et sa générosité.

... *Oulfa*, la fée de Béchar, pour être ma cousine.

... toutes les personnes du laboratoire, permanents et doctorants, qui ont rendu ces cinq années agréables. Mille mercis à tous et grand merci à toi *Aïcha* : ne perdez surtout pas votre esprit de groupe.

... Et tous les autres... !

Bien qu'à chacune de mes visites je sois obligée de lui réexpliquer sur quoi je travaille, j'ai toujours reçu de la part de ma tante *Yakout* un soutien sans faille. Je l'en remercie infiniment.

Pour finir, il est impensable de ne pas remercier ma famille qui me suit et me soutien dans mes choix : soyez enfin tranquille, les études c'est terminé, je vais enfin me reposer !... Avec une mention spéciale pour mes très chers parents, ainsi qu'à toi, *Fadéla*, pour avoir été à mes côtés. Je vous dédie cette œuvre.

"Les derniers sont les premiers" et la dernière c'est toi, *DOUNIA*, la prunelle de mes yeux.... Merci d'être à mes côtés.

Quand à ma source de motivation et de confiance en soi quotidienne, elle se reconnaîtra, et nul n'est besoin de la remercier, elle connaît sa valeur.....*Nacéra HAMMADI*.

Index des figures

CHAPITRE I

- 1.1. Classification des plasmas en fonction de leur densité électronique n_e , de leur énergie kT_e et de la longueur de Debye λ_D .
- 1.2. Systèmes d'électrodes les plus couramment utilisés pour la production de :I). DBD volumique, II). DBD surfacique.
- 1.3. Représentation des différentes géométries d'électrodes pour les décharges DBD volumiques.
- 1.4. Caractéristique électrique d'une DBD à une seule barrière diélectrique.
- 1.5. Charge par micro-décharge selon la distance inter-électrodes (Verre, $e=2\text{mm}$).
- 1.6. Principe de fonctionnement d'une DBD.
- 1.7. Plusieurs micro-décharges dans la surface d'un diélectrique.
- 1.8. Quelques modèles de filaments dans une DBD.
- 1.9. Schématisation des étapes de développement d'un filament de plasma à pression atmosphérique.
- 1.10. Effet des charges adsorbées.
- 1.11. Effet des charges adsorbées lorsque la polarité de l'alimentation s'inverse.
- 1.12. Effet "mémoire" dans une DBD.
- 1.13. Photos d'une DBD en volume (gauche) et d'une DBD de surface (droite).
- 1.14. Schémas de décharge à barrière diélectrique.
- 1.15. Représentation schématique du dispositif expérimental pour l'étude de la DBD en volume.
- 1.16. Visualisation du dispositif expérimental.
- 1.17. Représentation schématique du dispositif expérimental pour l'étude de la DBD de surface.
- 1.18. Oscillogramme typique du courant, (a) DBD surfacique, (b) DBD volumique.
- 1.19. Oscillogramme du courant pour la DBD volumique. Épaisseur du diélectrique = 3mm, (a) $U = 5 \text{ kV}$, (b) $U = 6 \text{ kV}$.
- 1.20. Oscillogramme du courant pour la DBD surfacique. Épaisseur du diélectrique = 3mm, (a) $U = 5 \text{ kV}$, (b) $U = 6 \text{ kV}$.

CHAPITRE II

- 2.1. Formation naturelle de l'ozone (cycle de Chapman).
- 2.2. Destruction naturelle de l'ozone (cycle de Chapman).
- 2.3. Structure de l'ozone.
- 2.4. Mauvais ozone.
- 2.5. Formation naturelle de l'ozone par décharge électrique.
- 2.6. Formation naturelle de l'ozone par les rayons UV.
- 2.7. Étapes de formation de l'ozone par décharge électrique.
- 2.8. Étapes de formation de l'ozone par UV.
- 2.9. Spectre germicide des lampes UV.
- 2.10. Lampe Ultra-violette.

- 2.11. Cellule de la génération d'ozone par décharge DBD.
- 2.12. Comment agit l'ozone ?
- 2.13. Lien de la molécule d'ozone.
- 2.14. Réaction d'oxydation de l'ozone avec les substances oxydables.
- 2.15. Effet de l'ozone sur une bactérie.

CHAPITRE III

- 3.1. Famille des convertisseurs statiques.
- 3.2. Schéma symbolique de l'onduleur.
- 3.3. Schéma de l'onduleur en pont.
- 3.4. Fonctionnement de l'onduleur.
- 3.5. Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1^{er} demi-cycle.
- 3.6. Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2^{ème} demi-cycle.
- 3.7. Signal complet de l'onduleur.
- 3.8. Chronogrammes des courants dans chaque composant.
- 3.9. Formes d'onde du courant et de la tension de la DBD obtenues avec l'alimentation réalisée.
- 3.10. Photographie de l'alimentation.
- 3.11. Circuit électrique de l'alimentation haute tension à haute fréquence destinée à la DBD.
- 3.12. Chaîne de l'onduleur.
- 3.13. Brochage du MOSFET.
- 3.14. Photo de prototype de l'onduleur.
- 3.15. Circuit électrique de l'onduleur.
- 3.16. Pont de diode.
- 3.17. Condensateurs de filtrage.
- 3.18. Régulateurs de tension (régulateur de tension positif 7808 et régulateur de tension négative 7908).
- 3.19. Photocoupleur.
- 3.20. Brochage de l'amplificateur.
- 3.21. Montage " push-pull " à deux transistors complémentaires (NPN et PNP).
- 3.22. Photo de prototype de l'interface de puissance et son alimentation.
- 3.23. Schéma électrique de l'interface de puissance.
- 3.24. Schéma électrique de l'alimentation de l'interface de puissance.
- 3.25. Système de gestion et pilotage de l'onduleur.
- 3.26. Alimentation du PIC 16F84A.
- 3.27. Photo de prototype de l'alimentation du PIC 16F84A.
- 3.28. Transformateur élévateur dans le circuit de puissance.
- 3.29. Circuit électrique de l'alimentation sinusoïdale.
- 3.30. Transformateurs utilisés dans cette étude.
- 3.31. Formes d'onde de la tension obtenue à la sortie (en haut) et à l'entrée (en bas) du transformateur pour deux valeurs de fréquences.
- 3.32. Schéma du dispositif de mesure du courant et de la tension dans le réacteur.
- 3.33. Photo du dispositif expérimental.
- 3.34. Évolution de la haute tension à la sortie de chaque transformateur en fonction de la tension continue d'entrée de l'onduleur (Essais à vide).
- 3.35. Évolution de la haute tension à la sortie de chaque transformateur en fonction de la tension continue d'entrée de l'onduleur (Essais à charge).

CHAPITRE IV

- 4.1. Configuration de DBD surfacique avec le plasma sur une face seulement (a) ou sur les deux faces (b).
- 4.2. Vue de dessous et de dessus de la cellule pour la décharge en surface.
- 4.3. Photographie de l'électrode haute tension (à gauche) et l'électrode de masse (à droite).
- 4.4. Schéma de principe de la décharge.
- 4.5. Photos de la décharge surfacique.
- 4.6. Circuit électrique pour alimenter une DBD de surface.
- 4.7. Photo du banc expérimental de la DBD surfacique.
- 4.8. Oscillogrammes de courant pour plusieurs valeurs de la tension appliquée. Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm.
- 4.9. Oscillogrammes de courant pour plusieurs valeurs de la tension appliquée. Diélectrique : verre, épaisseur : 3 mm.
- 4.10. Caractéristique "courant - tension" pour les deux valeurs de l'épaisseur du verre.
- 4.11. Caractéristique puissance - tension pour les deux valeurs de l'épaisseur du verre.
- 4.12. Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de tension. Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm, nombre de fil : 1.
- 4.13. Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de tension. Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm, nombre de fil : 3.
- 4.14. Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de tension. Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm, nombre de fil : 5.
- 4.15. Caractéristique courant-tension pour les trois configurations de l'électrode haute tension, diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm.
- 4.16. Caractéristique "puissance - tension" pour les trois configurations de l'électrode haute tension, épaisseur : 2 mm.
- 4.17. Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de la tension. Diélectrique : céramique, épaisseur : 3 mm.
- 4.18. Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de la tension. Diélectrique : céramique, épaisseur : 2 mm.
- 4.19. Caractéristique "courant - tension" pour les deux valeurs de l'épaisseur de la céramique.
- 4.20. Caractéristique puissance-tension pour les deux valeurs de l'épaisseur de la céramique.
- 4.21. Caractéristique "courant - tension" en fonction de la nature du diélectrique : verre et céramique, épaisseur = 2mm, nombre de fils = 3.
- 4.22. Caractéristique puissance-tension en fonction de la nature du diélectrique : verre et céramique, épaisseur = 2mm, nombre de fils = 3.
- 4.23. Caractéristique du courant de la décharge.
- 4.24. Schéma descriptif du dispositif expérimental de désinfection de l'air.
- 4.25. Analyseur d'ozone.
- 4.26. Réduction du taux d'ozone en fonction du temps, pour trois durées d'application de la DBD et tension fixe.
- 4.27. Réduction du taux d'ozone en fonction du temps, pour trois valeurs de la tension appliquée et durée d'application de la DBD fixe.
- 4.28. Produits (1^{er} jour de traitement).
- 4.29. Produits (5^{ème} jour de traitement).

- 4.30. Produits (10^{ème} jour de traitement).
- 4.31. Produits (15^{ème} jour de traitement).
- 4.32. Produits (20^{ème} jour de traitement).

CHAPITRE V

- 5.1. Cellule multi-pointes pour la décharge en volume.
- 5.2. Photographie des trois plaques multi-pointes.
- 5.3. Photographie de l'électrode passive et du diélectrique.
- 5.4. Photographie de la cellule pour la décharge en volume.
- 5.5. Photographie du banc expérimental (DBD volumique).
- 5.6. Visualisation de l'amplitude de courant et l'amplitude des micro-décharges.
- 5.7. Amplitude de courant et amplitude des micro-décharges en fonction de la tension appliquée.
- 5.8. Oscillogrammes du courant : Sans DBD (à gauche), avec DBD (à droite).
- 5.9. Amplitude de courant et amplitude des micro-décharges en fonction de la distance entre pointes.
- 5.10. Amplitude de courant et amplitude des micro-décharges en fonction de l'épaisseur du diélectrique.
- 5.11. Schéma représentatif d'un plan CCF avec 3 facteurs : d_p : distance entre pointes; d_e : intervalle inter-électrodes; e : épaisseur du diélectrique.
- 5.12. Graphique pour la validation des mesures.
- 5.13. Tracé des contours iso-réponses pour la modélisation de puissance.
- 5.14. Tracés des contours iso-réponses du modèle : (a) Distance entre pointes en fonction de l'intervalle inter-électrode ; (b) Épaisseur du diélectrique en fonction de l'intervalle inter-électrode.
- 5.15. Configuration cylindre-cylindre du réacteur et son alimentation.
- 5.16. Forme cylindrique du réacteur.
- 5.17. Réacteur à électrode H. T. en cuivre (fil enroulé en hélice).
- 5.18. Schéma de la cellule de décharge en volume.
- 5.19. Réacteur à électrode H.T. en acier (grille).
- 5.20. Schéma de la cellule de décharge de surface.
- 5.21. Réacteur à électrode H.T. en aluminium (Avec les deux orifices au niveau du tube en acier).
- 5.22. Schéma de la cellule de décharge des réacteurs 3 et 4 de type DBD en volume.
- 5.23. Réacteur à électrode H.T. en aluminium (Avec les deux orifices au niveau des bouchons de téflon).
- 5.24. Schéma du dispositif de mesure du courant et de la tension dans le réacteur et zoom sur le signal de la tension appliquée.
- 5.25. Différentes composantes du courant dans le cas d'une décharge pointe-plan pour une alimentation électrique alternative.
- 5.26. Signal d'un pic de courant positif obtenu dans une DBD cylindrique, plasma d'air.
- 5.27. Formes d'ondes typiques de la tension et du courant de décharge dans la configuration cylindre-cylindre. Conditions expérimentales : Tension = 6 kV, fréquence = 22 kHz.
- 5.28. Oscillogrammes de courant et de la tension pour deux fréquences.
- 5.29. Schéma descriptif du dispositif expérimental de production d'ozone.

- 5.30. Photo du dispositif global.
- 5.31. Histogrammes de concentrations d'ozone en fonction de la haute tension appliquée pour les quatre transformateurs utilisés.
- 5.32. Réacteur pour la dépollution de l'eau.
- 5.33. Système de désinfection d'eau.
- 5.34. Photo du montage pour la purification d'eau.
- 5.35. Système de refroidissement pour le générateur d'ozone.
- 5.36. Générateur d'ozone avec circuit de refroidissement.
- 5.37. Photo du SKID.
- 5.38. Le SKID mobile avec tout le système de purification d'eau.

ANNEXE A

- A.1. L'alimentation haute tension à base du CI NE555.
- A.2. Circuit électrique de l'alimentation haute tension à base du CI NE555.
- A.3. Alimentation de la partie commande (NE555) et la partie puissance.
- A.4. Photo de l'alimentation haute tension à base des deux CI NE555.
- A.5. Schéma électrique de l'alimentation haute tension à base des deux CI NE555 (Oscillateur et temporisateur).

ANNEXE C

- C.1. Comptage de coliformes de couleur jaune-orangée sur filtre et zoom sur ces coliformes.
- C.2. Streptocoques (en chaîne).
- C.3. Clostridium perfringens.

Liste des tableaux

- Tableau 2.1. Principales constantes physiques de l'ozone.
- Tableau 3.1. Valeurs des inductances des quatre transformateurs.
- Tableau 3.2. Valeurs des fréquences de fonctionnement pour chaque transformateur.
- Tableau 3.3. Puissances consommées du générateur d'ozone pour chaque transformateur.
- Tableau 5.1. Les grandeurs variables de la cellule de décharge volumique.
- Tableau 5.2. Résultats du plan CCF double.
- Tableau 5.3. Résultats d'analyses microbiologies d'eaux usées et d'eaux contaminées avant et après traitement.

Problématique

Nous buvons 90 % de nos maladies . Cette affirmation de *Louis Pasteur* (1822 - 1895) marque le début d'une nouvelle définition de l'eau potable. En effet, bien que la relation directe entre la qualité de l'eau et la santé humaine soit identifiée depuis de nombreux siècles, l'eau n'était pas jusqu'alors considérée comme un vecteur de maladies infectieuses.

C'est grâce aux avancées de la microbiologie (découverte dans l'eau des agents responsables d'épidémies dévastatrices telles que le choléra et la fièvre typhoïde), qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, on comprend enfin qu'une eau fraîche, limpide et sans saveur ni odeur n'est pas nécessairement potable.

Dans ce contexte, d'importants efforts de recherche ont été consentis à la fois aux procédés de traitement des eaux et à la mise au point d'instruments de surveillance automatique. De nouvelles techniques, très performantes ont ainsi pu voir le jour, parmi lesquelles les procédés de désinfection à l'ozone, procédés qui marquent une nouvelle rupture technologique dans le domaine du traitement de l'eau. Vis-à-vis de l'étape de désinfection, le traitement à l'ozone apparaît comme un procédé alternatif et/ou complémentaire des techniques conventionnelles telles que la chloration. En effet, ce procédé permet l'élimination des microorganismes de l'eau brute par rétention sur une barrière, l'ozone.

En réponse à cette antinomie entre qualité et conservabilité, apparaissent actuellement des traitements alternatifs. Il s'agit, essentiellement, de techniques mettant en jeu de la lumière pulsée (principalement de l'ultraviolet), des champs électriques pulsés ou **la décharge volumique à barrière diélectrique**. Ces nouvelles technologies font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches. Parmi ces technologies, dont seules émergeront celles répondant aux souhaits de consommateurs et présentant les caractéristiques suivantes :

- Souplesse d'utilisation (facilité de mise en œuvre, capacité à traiter différents produits...
- Coûts d'investissement et d'exploitation raisonnables,
- Sécurité et reproductibilité du traitement,

on peut citer celles basées sur les plasmas réactifs hors équilibre générés par des décharges électriques dans l'air à la pression atmosphérique. Ce type de plasma (source abondante

d'espèces actives) présente actuellement beaucoup d'intérêt pas uniquement pour les applications environnementales (dépollution d'eau) qui ont motivé notre étude mais aussi pour un large éventail d'autres applications industrielles (traitement de surface, gravure, dépôt des couches minces, écrans plasmas, etc....) et biomédicales (décontamination, biomatériaux et plasma pour la médecine). Parmi ces techniques, celles mettant en jeu les décharges volumiques à barrière diélectrique font partie des préoccupations du laboratoire APELEC et nous allons en développer quelques aspects de cette technique. Cette dernière semble répondre de manière satisfaisante, et à un coût raisonnable, aux besoins évoqués précédemment.

État de l'art

La foudre a inspiré les générateurs d'ozone. Ce principe est utilisé dans les générateurs d'ozone dit à barrière diélectrique, qui représentent la quasi-totalité des générateurs d'ozone utilisés en purification de l'eau. Ces générateurs purifient et désinfectent l'eau au moyen de l'ozone qui est l'oxydant le plus efficace utilisé dans les traitements de l'eau. Il n'en reste pas moins une solution naturelle, écologique et simple à mettre en œuvre pour la purification de l'eau. Il est utilisé tout aussi efficacement pour le traitement des eaux usées. Les ozoniseurs purifient l'eau très rapidement, détruisant les bactéries et éliminant pratiquement l'usage de produits désinfectant tel le chlore. Le système ne laisse aucun résiduel dans l'eau, évitant par la même, l'irritation des yeux, des muqueuses et de la peau, ainsi que l'apparition des odeurs désagréables. Il est d'une utilisation facile et simple à installer.

Généralement les générateurs d'ozone industriels utilisent **la décharge volumique à pression atmosphérique**. À cette pression, le plasma a une forte propension à transiter vers l'arc électrique : les fréquences de collision sont très élevées, l'amplification est très rapide et si elle n'est pas bloquée, elle induit à un échauffement du gaz et la formation d'un plasma thermique dans lequel les électrons et le gaz sont à l'équilibre et où des températures de plusieurs milliers de degrés sont atteintes. La solution la plus simple et la plus robuste pour un procédé plasma à la pression atmosphérique consiste à introduire un diélectrique solide entre les deux électrodes. Cette solution qui fait ses preuves, depuis plus d'un siècle, pour les écrans plats à panneaux plasmas, est aussi celle utilisée pour la production d'ozone. La décharge ainsi obtenue est appelée

décharge contrôlée par barrière diélectrique (DBD). Cette dernière constitue un milieu chimiquement très actif où l'énergie électrique est transférée d'abord aux électrons qui excitent, dissocient et ionisent les molécules du gaz qui reste pratiquement à la température ambiante ce qui nécessite en pratique une faible consommation énergétique car les ions (gros consommateurs d'énergie et capables de chauffer le gaz jusqu'à provoquer son claquage) ne sont quasiment pas accélérés pendant le développement de la décharge couronne ou à barrière diélectrique qui génère des ions, des espèces excitées et des radicaux libres. À la pression atmosphérique, seuls les radicaux libres et les espèces excitées à longue durée de vie perdurent suffisamment longtemps pour alimenter la zone de décharge. C'est dans cette zone que se produit l'ozone.

Objectifs et organisation des chapitres

Dans le cadre de cette thèse, nous avons opté d'étudier les réacteurs plasmas générés par décharge à barrière diélectrique en raison de leurs aptitudes à traiter les petits volumes gazeux avec des séparations inter électrodes de quelques mm contrairement au cas des réacteurs-couronne.

Fort de ces connaissances, ce projet de thèse a été mis en place afin de contribuer à l'étude des DBDs et leurs applications et de maîtriser un savoir-faire technologique pour le traitement de l'eau et la désinfection de l'air par l'ozone. Le document présent montre le cheminement suivi et les expériences mises en place afin de démontrer l'efficacité et la faisabilité de l'intégration d'un réacteur plasma dans un système de traitement d'eau potable et d'épuration des eaux usées. Un autre produit, qui n'est autre que l'air que nous respirons, fait l'objet de cette technique.

Par la suite de cette thèse, il sera intéressant de valoriser nos travaux par des applications dans le domaine de traitement des eaux usées et traitement de l'air. C'est ce que nous avons commencé d'entreprendre.

Cette thèse est composée de deux parties principales. La première est une revue bibliographique qui présente l'ensemble des phénomènes physiques abordés au cours de ces travaux. La seconde décrit les expériences réalisées durant cette étude et analyse leurs résultats.

La partie bibliographique débute par un chapitre consacré à une introduction à la décharge " à barrière diélectrique " ainsi dénommée car son applicateur comporte un isolant entre les électrodes et le gaz. Nous illustrerons son intérêt et ses multiples applications. Dans un premier temps, des rappels sur les plasmas sont d'abord donnés avant de passer en revue la bibliographie concernant les deux décharges à barrière diélectrique : **décharge volumique** et **décharge surfacique**. Nous allons nous attacher principalement à une étude comparative des deux décharges considérées.

Le **second chapitre** consiste tout naturellement à faire un bref rappel sur l'ozone, ses caractéristiques, ses avantages, ses inconvénients et ses diverses applications.

La seconde partie de ce manuscrit est divisée en deux sections indépendantes. La première section est entièrement consacrée à l'étude et développement d'une alimentation haute tension-haute fréquence qui fait l'objet du **troisième chapitre**. Dans la seconde section qui est rassemblée dans le **quatrième** et le **cinquième chapitre**, nous ferons une description des réacteurs plasmas mis au point pour notre étude, en donnant leurs caractéristiques de fonctionnement. Bien que le travail de ces deux sections ait été mené parallèlement au cours de cette thèse, nous avons volontairement choisi de séparer ces travaux pour que le lecteur, qu'il soit plutôt électronicien ou plutôt électrotechnicien, puisse lire une partie sans que la lecture de l'autre partie soit nécessaire. La validation et l'étude paramétrique de la DBD surfacique et volumique dans le cadre d'une caractérisation sont présentées dans le **quatrième** et le **cinquième chapitre** respectivement. L'application principale de la DBD de surface qui a été fixée dans cette thèse est le traitement de l'air et à l'issue des aspects concernant le comportement de la DBD en volume, l'application de cette décharge au traitement des eaux usées a été étudiée. Cette voie a été désignée suite à l'engagement de notre laboratoire à un projet de recherche sur le futur.

La **conclusion** de ce document présente une synthèse des principaux résultats ainsi que les perspectives qui découlent de cette étude. Elle donnera des pistes à nos successeurs d'apporter des améliorations.

1. 1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'introduire les notions nécessaires pour appréhender ce travail de thèse. Nous commencerons par décrire les premières tentatives de compréhension des plasmas et des décharges électriques. Dans un deuxième temps, nous présenterons le principe de fonctionnement des décharges contrôlées par barrière diélectrique (DBD) puis nous insisterons sur la description physique de cette décharge qui fait l'objet de cette thèse. Nous décrirons les deux cellules plasma pour générer une DBD volumique et une DBD surfacique dans le but de faire une comparaison entre ces deux décharges.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous survolerons rapidement les applications des décharges contrôlées par barrière diélectrique.

1. 2. Rappels sur les plasmas

Les premières tentatives de compréhension des plasmas et des décharges électriques ne sont pas récentes, même si l'apparition du concept de plasma ne date que des années **1930**. Des phénomènes naturels, souvent spectaculaires, mettent en jeu des arcs et des plasmas. Ils ont intrigué les hommes et motivé des recherches qui débouchent aujourd'hui sur l'utilisation industrielle des plasmas **[1]**. Mais d'abord, définissons ce que s'est un plasma.

Définition

Le plasma est défini comme étant un gaz partiellement ou totalement ionisé. Ce terme a principalement été utilisé, à ses débuts, dans le domaine de l'astrophysique pour définir un état de la matière contenant des espèces chargées positivement ou négativement, mais présentant au global un état neutre. Cet état de la matière peut être généré en fournissant de l'énergie à un gaz, en appliquant par exemple un champ électrique intense conduisant à l'ionisation du gaz. Cette ionisation résulte du transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz. Il existe alors deux grands types de collision entre ces éléments **[2-3]**:

- ✚ Les collisions élastiques, qui ne participent pas directement à l'activation du gaz, mais qui sont responsables de la conduction et de la diffusion de la chaleur ;
- ✚ Les collisions inélastiques qui sont responsables de changements au niveau de l'énergie interne des molécules, de la nature des particules (ionisation,

dissociation, attachement électronique...), en fonction de l'énergie cinétique des électrons. Ce sont ces collisions qui nous intéressent car elles participent à la réactivité chimique des plasmas.

Il existe de nombreux types de plasmas que l'on différencie selon leur densité électronique n_e (nombre d'électrons par unité de volume), leur température électronique T_e ainsi que leur longueur de Debye λ_D . Cette grandeur définit la distance sur laquelle les effets du champ électrique dus à une charge e ne sont pas neutralisés par un ensemble de charge de signe opposé. Elle est définie par la relation suivante [2] [4]:

$$\lambda_D = \left(\frac{2\varepsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2}$$

Avec : ε_0 permittivité du vide ($8,84 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)

k constante de Boltzmann ($1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{molécule}^{-1}$)

n_e densité électronique (cm^{-3})

T_e température électronique (K).

n_e , T_e et λ_D permettent de classer les plasmas selon le schéma de la [figure 1. 1](#).

Une autre classification, basée sur les températures électronique T_e , ionique T_i et celle des neutres T_0 permet de distinguer les plasmas dits *chauds* et les plasmas dits *froids* [2-3].

- Lorsque la température des neutres et des ions est proche de la température électronique (**5000 – 50000 K**), on parle de *plasma thermique* ou de *plasma d'équilibre thermodynamique*. Ce sont des gaz fortement ionisés ;
- Lorsque la température des électrons (**1000 à 10000 K**) est très supérieure à la température des molécules du gaz (proche de la température ambiante), on parle de *plasma froid* ou de *plasma hors équilibre thermodynamique*. Ce sont des gaz faiblement ionisés.

Dans cette étude, nous nous intéresserons exclusivement aux plasmas froids.

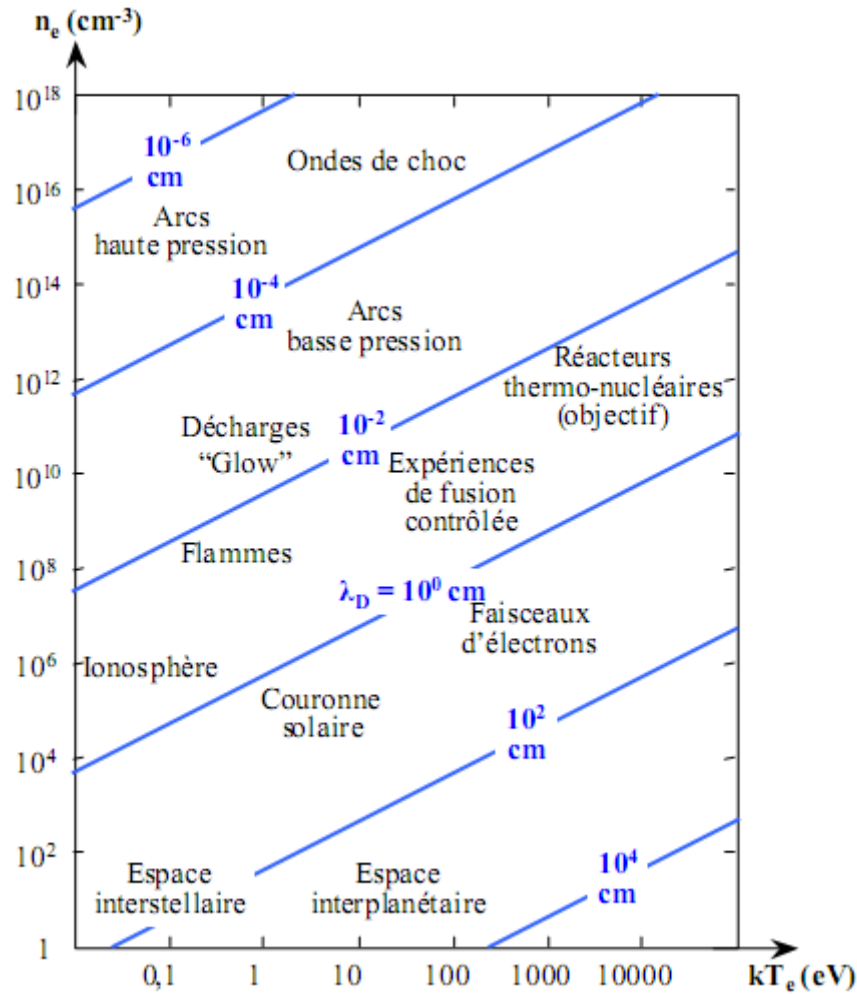


Figure 1. 1 : Classification des plasmas en fonction de leur densité électronique n_e , de leur énergie kT_e et de la longueur de Debye λ_D [5].

1. 3. Comment génère-t-on un plasma froid ?

Deux types de techniques permettent de générer un plasma froid à pression atmosphérique [6]:

- ✘ **Les techniques à faisceaux d'électrons** où les électrons sont créés puis accélérés sous vide. Ces électrons très énergétiques sont ensuite introduits dans le gaz à traiter après avoir traversé une fenêtre semi-conductrice. Dans ce gaz, qui est à pression atmosphérique, les électrons créent un plasma à mesure qu'ils provoquent des collisions avec les molécules de gaz.
- ✘ **Les techniques à décharge électrique** où les électrons sont directement créés et accélérés, à pression atmosphérique, dans le volume de gaz à traiter par l'application d'une haute tension entre les électrodes. Ces électrons entrent en collision avec les

molécules de gaz, transférant immédiatement leur énergie à mesure qu'ils circulent d'une électrode vers l'autre.

Il est à noter que l'énergie moyenne des électrons créés par décharge électrique est beaucoup plus faible que celle des électrons obtenus par faisceaux d'électrons. Pour des raisons économiques et techniques, les montages à faisceaux d'électrons restent néanmoins peu utilisés. La majorité des plasmas hors équilibre sont générés par des décharges électriques parmi lesquelles on distinguera particulièrement les décharges à barrière diélectrique, qui sont les plus couramment employées dans le domaine de traitement de l'eau et stérilisation de l'air.

1. 4. Décharges à barrière diélectrique

1. 4. 1. Historique

Les premières expérimentations connues sur ces décharges sont de *W. Siemens* en **1857**. Les applications principales étaient la production d'ozone ou d'oxyde d'azote [4] [7]. En **1932**, *K. Buss* [8-10] décrit le caractère filamentaire de cette décharge dans l'air à travers les premiers clichés photographiques et mesures à l'oscilloscope réalisés sur les DBDs. Dans les années soixante-dix, les premières simulations et recherches sur les DBDs permettent d'élargir le champ d'application de ces décharges à la modification de surface, à la déposition assistée par plasma, aux lasers puis, plus tard, aux écrans plats, aux traitements d'effluents gazeux. *R. Bartnikas*, en **1968**, observait une décharge à barrière diélectrique dans un régime différent de régime filamentaire classique. Cette décharge a été nommée décharge homogène. Il faut attendre **1988** pour découvrir l'existence d'un régime de DBD homogène à la pression atmosphérique grâce aux recherches des japonais *Kanazawa et al* [8]. Depuis de nombreuses recherches ont été menées afin de comprendre les phénomènes physiques régissant les DBDs.

1. 4. 2. Définition et caractéristique d'une DBD

Une décharge à barrière diélectrique est un plasma froid hors équilibre généré à la pression atmosphérique entre deux électrodes recouvertes de diélectrique. Ce plasma faiblement ionisé ($n_e = 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) est caractérisé par une température électronique de quelques électronvolts bien supérieure à celle des espèces neutres qui sont majoritaires [8] [11].

Cette décharge se caractérise par la présence d'un composant diélectrique sur au moins une des deux électrodes (voire les deux) [3] [11-13]. Différentes configurations d'électrodes,

ayant toutes en commun l'insertion d'une couche diélectrique couvrant au moins l'une des deux électrodes sont proposées. Ces dispositifs sont nombreux et variés avec une géométrie homogène ou hétérogène. Sur la [figure 1. 2](#) sont représentées les configurations les plus couramment utilisées. La largeur de l'espace inter-électrode varie de **0,1 mm** (voire moins) à plusieurs centimètres en fonction de l'application souhaitée.

Pour transporter un courant autre que capacitif dans l'espace de décharge, le champ électrique se doit d'être assez intense pour causer l'effondrement du gaz. Or, pour des valeurs élevées de pression (et de distance inter-électrodes : loi de Paschen), l'augmentation du courant entre deux électrodes métalliques entraîne généralement le passage vers un régime d'arc, synonyme de plasma à haute température et de dommage à la surface. La présence d'un diélectrique entre les électrodes peut être considérée comme une capacitance en série avec l'espace de gaz. Le principal rôle de ce diélectrique est d'éviter le passage à l'arc lors de l'établissement de la décharge. Ceci résulte de l'accumulation de charges sur le matériau isolant. Ces charges de même polarité que l'électrode opposée provoquent une chute du champ et une extinction de la décharge. Le diélectrique étant un isolant sa constante diélectrique et son épaisseur, en combinaison avec la dérivée dans le temps de la tension appliquée, dU/dt , détermine la quantité de courant qui peut passer à travers le diélectrique. Il ne laisse pas passer le courant DC. C'est pourquoi, lorsqu'on travaille avec de telles décharges, il est impératif qu'elles soient alimentées par une tension alternative. Dans ce cas, la présence des charges va accélérer la formation des streamers par augmentation du champ dans l'alternance suivante (§ 1. 4. 6).

Des différences de potentiel de l'ordre de dizaines de kV sont nécessaires pour allumer les décharges dans un espace inter-électrodes de quelques millimètres. Puisque à haute fréquence, la limitation du courant par la barrière diélectrique devient de moins en moins efficace, la DBD est normalement utilisée entre des fréquences de **50 Hz à 10 MHz [4-5]**.

La configuration géométrique des électrodes dans ce type de décharge volumique, qui est la plus utilisée, peut-être de nature plan-plan, pointe-plan, multipointes-plan, lame-cylindre, fil-cylindre et cylindre-cylindre comme indiqué sur la [figure 1. 3](#).

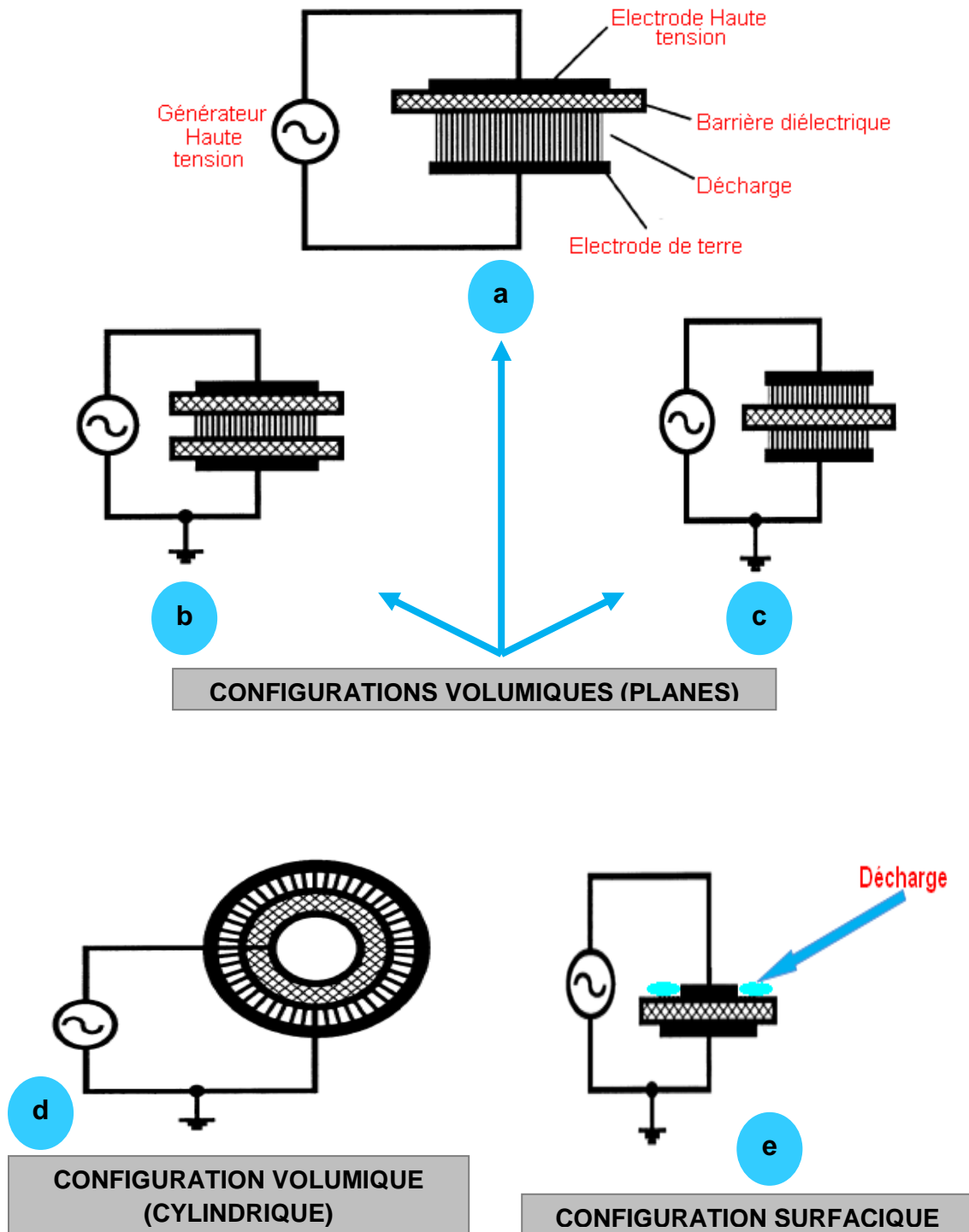


Figure 1. 2 : Systèmes d'électrodes les plus couramment utilisés pour la production de :I). DBD volumique, II). DBD surfacique [2] [4] [14].

- a) et d). DBD caractérisée par la présence du matériau diélectrique au contact d'une électrode,
- b). au contact des deux électrodes,
- c). au centre de la zone de décharge.
- e). DBD caractérisée par la présence du diélectrique de part et d'autre des deux électrodes.

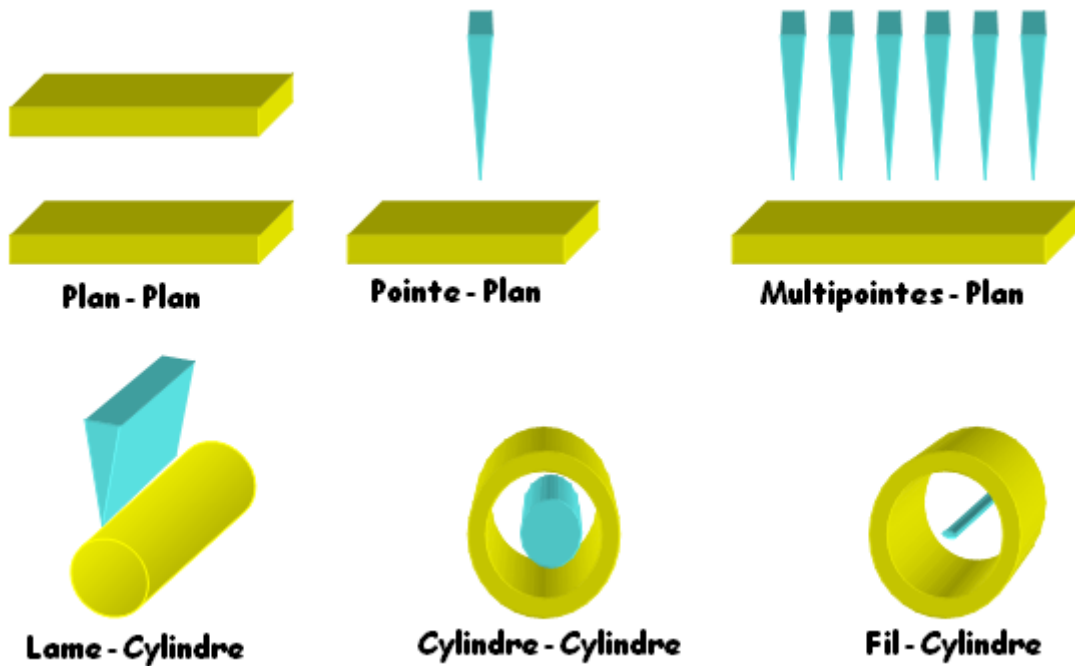


Figure 1. 3 : Représentation des différentes géométries d'électrodes pour les décharges DBD volumiques [5] [15].

1. 4. 3. Caractéristiques électriques de la DBD

Afin de schématiser électriquement la DBD, nous pouvons suivre à travers tous les matériaux physiques, le courant électrique imposé par l'alimentation. Ceci est fait pour la configuration cylindrique utilisée dans cette thèse, cependant le processus peut être généralisé à toutes les DBDs [16].

Le courant sort de la borne supérieure de l'alimentation à travers un câble qui vient se connecter à l'électrode conductrice, représentée dans le schéma électrique de la figure 1. 4 comme **conducteur 1**. Ensuite, le courant traverse le diélectrique externe, que nous représentons avec la capacité C_1 ; puis le courant passe à travers le gaz qui présente une caractéristique courant-tension. Finalement, nous trouvons le câble de retour à l'alimentation (**conducteur 2**).

Si nous négligeons les éléments résistifs des câbles et des électrodes, les caractéristiques physiques importantes qui fixent les valeurs électriques sont : la surface, l'épaisseur et la constante diélectrique de la barrière, afin de déterminer les capacités ; le type et la pression du gaz confiné, ainsi que la distance entre électrode et barrière, pour déterminer la tension de claquage et la caractéristique électrique du gaz.

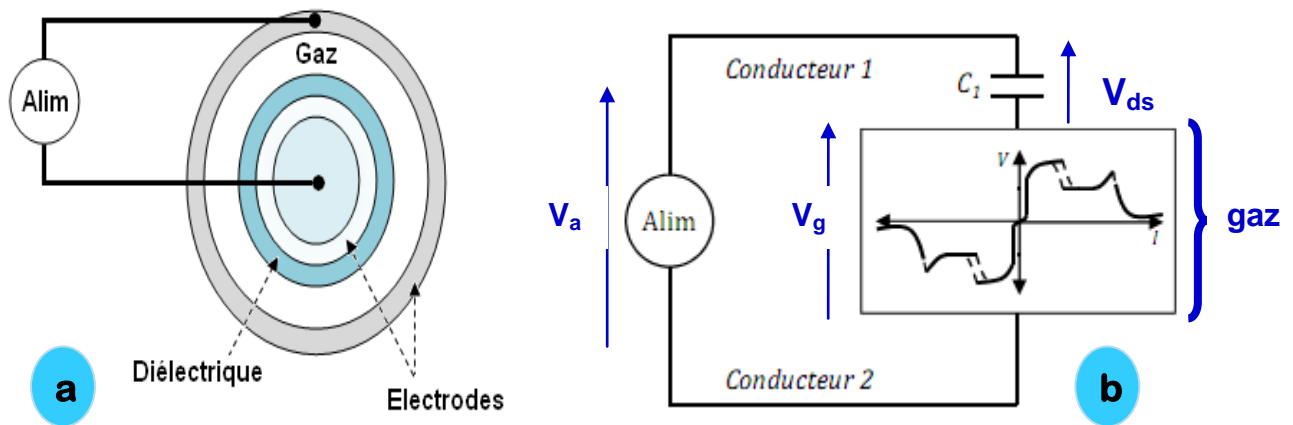


Figure 1.4 : Caractéristique électrique d'une DBD à une seule barrière diélectrique [16].
 V_a : tension appliquée sur la cellule de décharge, V_g : celle sur le gaz, V_{ds} : celle sur le diélectrique.

1. 4. 3. 1. Paramètres de régulation de la DBD

Nous allons désormais étudier l'influence des différents paramètres de la DBD sur les caractéristiques de la décharge.

I. Influence de la tension

La tension régule le nombre de micro-décharges par cm^2 pendant une demi-alternance. Lorsque la tension augmente, le nombre de micro-décharges par demi-alternance augmente également [15].

II. Fréquence

Le nombre de décharges par unité de temps et le courant de décharge augmentent avec la fréquence d'alimentation. Plus la fréquence est élevée et plus le temps entre la dernière décharge d'une demi-alternance et la première de la demi-alternance suivante est court. Les charges ont moins de temps pour se neutraliser et renforcent le champ [15].

III. Distance inter-électrodes

La charge moyenne par micro-décharge en fonction de la distance inter-électrodes (figure 1.5) est calculée à partir d'une valeur moyenne de 100 micro-décharges [15].

La figure 1.5 montre que la distance inter-électrodes régule la quantité de charge par impulsion, qui définit l'énergie d'un filament et celle-ci augmente avec la distance inter-électrodes.

Pour résumer, l'énergie d'un filament est définie par la distance inter-électrodes, le nombre de micro-décharges par seconde est défini par la fréquence, et le nombre de micro-décharges par unité de surface est corrélé à la tension appliquée au système.

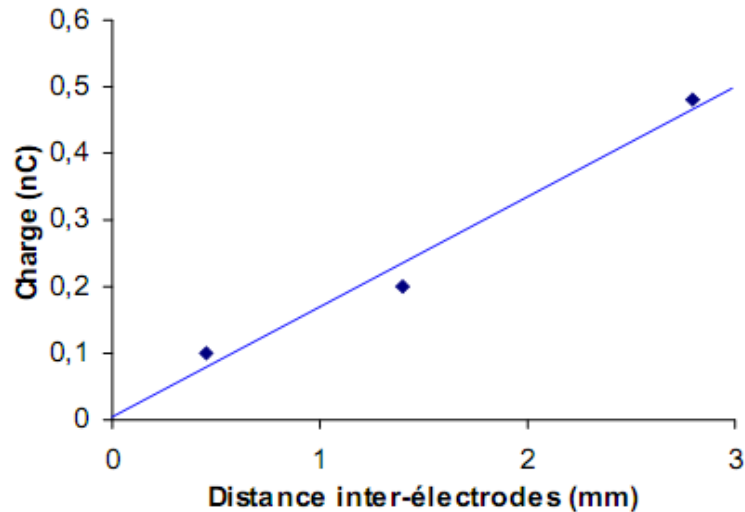


Figure 1. 5 : Charge par micro-décharge selon la distance inter-électrodes (Verre, $e=2\text{mm}$) [15].

1.4. 4. Principe de la DBD

Suite à l'application d'une tension suffisamment élevée sur les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur appelé micro-décharge (figure 1. 6-a). cette micro-décharge peut-etre représentée par le schéma équivalent de la figure 1. 4-b. Le diélectrique en vis-à-vis de la micro-décharge se comporte comme l'isolant d'un condensateur, C_1 , dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre côté l'électrode. Notons que ce schéma équivalent n'a de sens que si l'on considère uniquement une seule micro-décharge ou une décharge homogène sur toute la surface des électrodes [10] [17].

Le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface du diélectrique solide en vis-à-vis du canal de décharge qui se traduit par une augmentation de la tension V_{ds} . Si l'augmentation de cette tension au fur et à mesure du développement de la décharge est plus rapide que l'augmentation de la tension, V_a , elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz, V_g , ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est bloquée bien avant d'avoir atteint un degré d'ionisation suffisant pour transiter en régime d'arc.

Tant que la tension appliquée augmente, des micro-décharges s'initient à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique appliqué sur le gaz aux positions où des micro-décharges se sont déjà développées (figure 1. 6-b). Au changement de polarité (figure 1. 6-c), les charges précédemment déposées sur le diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ plus faible que lors de la

première alternance : $V_g = V_a - V_{ds}$ (avec V_a et V_{ds} de signes contraires lors du changement de polarité).

La fonction première du diélectrique est de limiter la charge déposée sur les électrodes et par voie de fait le courant transitant dans le canal afin que la décharge ne devienne par un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. De plus, l'utilisation du diélectrique a également pour conséquence de tendre vers une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques [14].

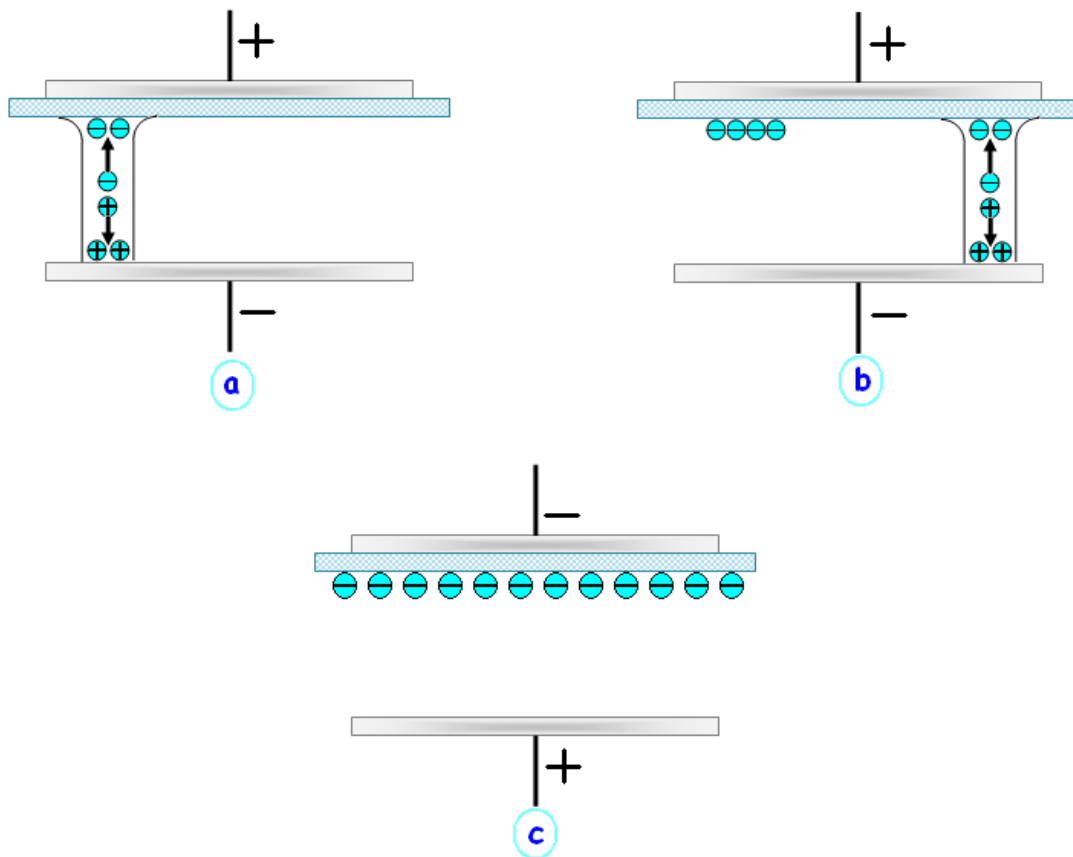


Figure 1. 6 : Principe de fonctionnement d'une DBD :

(a) établissement d'une première micro-décharge, (b) extinction de la première micro-décharge et amorçage d'une nouvelle, (c) changement de la polarité appliquée sur les électrodes [17].

1. 4. 5. Description physique d'une DBD

De nombreuses études théoriques, expérimentales et numériques ont été menées au cours des dernières décennies [6], permettant une meilleure compréhension des nombreux phénomènes physiques et chimiques intervenant dans une décharge à barrière diélectrique.

1. 4. 5. 1. La DBD, un plasma filamentaire

Dans la plupart des cas, les décharges à barrière diélectrique ne sont pas uniformes mais constituées de nombreuses micro-décharges [6] [8] comme le montre la [figure 1. 7](#). Cette tendance s'explique par la nature du gaz et la pression de travail égale à la pression atmosphérique. En effet, plus la pression augmente, plus le coefficient de diffusion des espèces chargées diminue. La barrière diélectrique oblige chacun de ces filaments, à s'éteindre très rapidement. En effet, les charges transférées par un filament sont bloquées à la surface du diélectrique. Leur accumulation entraîne la formation d'un champ électrique local inverse, ce qui stoppe les avalanches électroniques et le flux de courant après quelques nano secondes. À l'endroit où un filament de plasma est déjà passé, le champ est quasi nul et donc aucun filament ne peut se réamorcer. Les autres filaments de plasma s'amorcent donc nécessairement à côté, ce qui permet une répartition spatiale spontanée des filaments de plasma. Ces filaments forment souvent des modèles intéressants comme illustré sur la [figure 1. 8](#).

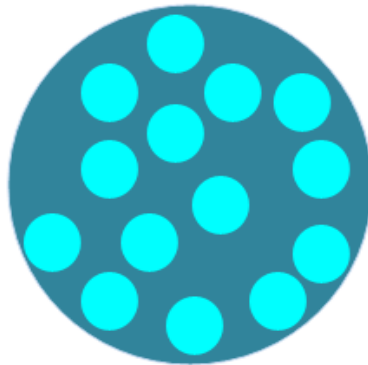


Figure 1. 7 : Plusieurs micro-décharges dans la surface d'un diélectrique [16].

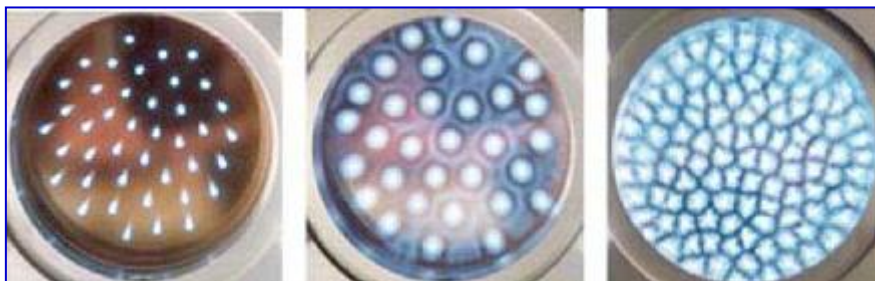


Figure 1. 8 : Quelques modèles de filaments dans une DBD [18].

1. 4. 5. 2. Townsend mis en défaut

La théorie de Townsend sur les décharges auto-entretenues pose les bases de la physique des décharges plasma. Une décharge est qualifiée d'auto-entretenu si elle se poursuit lorsque la source extérieure d'électrons germes a été coupée [6]. Le courant électronique i à une distance x de la cathode est alors lié au courant i_0 à la cathode par la relation [8]:

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha x}}{1 - \gamma(e^{\alpha x} - 1)} \quad (3. 1)$$

où α est le premier coefficient de Townsend correspondant aux taux d'ionisation par impact électronique sur les molécules de gaz et γ est le second coefficient de Townsend correspondant aux taux d'extraction d'un électron de la surface. Cette formule montre que la décharge est dépendante du bombardement ionique sur la cathode et du matériau constituant la cathode via le coefficient γ . La formule (3. 1) traduit le fait que les électrons créés par une avalanche sur la distance inter-électrode doivent permettre, une fois collectés à l'anode, de générer un bombardement suffisant pour extraire au moins un électron de la surface afin de recréer une avalanche. Ce mécanisme ne se vérifie que pour des valeurs du produit de la pression par la distance caractéristique (produit P.d) de la décharge suffisamment petit [19]. Cependant, les observations faites à pression et espace inter électrodes élevés (P.d > 200 torr.cm) montrent que les vitesses de propagation observées sont bien trop grandes pour reposer sur le processus de Townsend. Pour expliquer ce comportement, les travaux de Loeb sur des décharges couronnes et de Rather sur une décharge plan/plan ont été essentiels. Ils parvinrent à mettre en évidence l'existence de séries d'impulsions de courants (de **1 à 100 mA** durant environ **100 ns**) peu lumineuses juste avant le passage à l'arc électrique. Dans des décharges couronnes, ces filaments ont par la suite été observés se propageant y compris dans la zone de faible champ, où le taux d'ionisation est en principe trop faible pour qu'un plasma puisse exister. Le seul moyen d'expliquer ce fait était de concevoir que le champ entretenant ces filaments n'était pas le champ extérieur, mais un champ créé de l'intérieur par une charge d'espace.

1. 4. 5. 3. De l'avalanche au « streamer »

À pression atmosphérique, les streamers se propagent en quelques dizaines de nanosecondes. Un streamer est une charge d'espace qui se propage de proche en proche, c'est une onde d'ionisation.

Les avalanches électroniques

Considérons un système de deux électrodes planes et parallèles plongées dans un gaz isolant et entre lesquelles il y a un électron libre. Lorsqu'on applique une tension, l'électron est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique (étape 1 : a). Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons (étape 1 : b). Ce phénomène est caractérisé par le coefficient α (coefficient d'ionisation). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collision au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une avalanche électronique (étape 1 : c, figure 1. 9) [20].

Théorie du canal (Streamer) :

Dans la théorie de Streamer, la présence d'une seule avalanche de taille suffisamment importante peut provoquer le claquage par l'intermédiaire d'un canal de plasma appelé streamer. Les mécanismes de base de cette théorie sont [6] [8] [20]:

- ❖ La création d'une avalanche primaire de type Townsend engendrée par un électron germe ;
- ❖ Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la première avalanche ;
- ❖ La photo ionisation du gaz à la tête de l'avalanche ;
- ❖ La transition avalanche-Streamer lorsque le champ de charge devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

L'avalanche primaire peut prendre naissance en un point quelconque de l'intervalle inter-électrodes pour une valeur critique du champ électrique. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode (électrode positive) alors que de l'autre côté, les ions positifs restent immobiles (la mobilité des électrons est **100** à **1000** fois supérieure à celle des ions : étape 2). Le champ devient alors non uniforme et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice. Le champ électrique sur les flancs de l'avalanche quant à lui, diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ **10⁸** électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur les pôles. Le champ induit devient du même ordre de grandeur que le champ

appliqué. Une fois ce champ établi, la zone de séparation de charge va pouvoir se propager en sens inverse des électrons, créant un filament appelé « Streamer » [21]. En effet, la zone de séparation de charge qui devient dès lors « la tête du Streamer » constitue un dipôle électrique (étape 3 : figure 1. 9). Les lignes de champs de ce dipôle renforcent localement le champ électrique appliqué au voisinage immédiat de la tête. Les électrons présents entre la tête du streamer et la cathode, sont alors fortement accélérés. Ces avalanches secondaires en amont du streamer permettent de créer de nouvelles charges qui à leur tour vont générer la charge d'espace un peu plus près de la cathode. Les électrons des avalanches secondaires dérivent et viennent neutraliser les charges positives à l'emplacement initial de la charge d'espace (étape 4: figure 1. 9).

Par conséquent la tête du streamer a progressé vers la cathode et un canal globalement neutre mais constitué d'électrons et d'ions subsiste en aval de la tête. Ce canal conducteur permet finalement de rapprocher le potentiel de l'anode de plus en plus près de la cathode.

Dans une décharge couronne, si le canal conducteur parvient à relier les deux électrodes alors il y a court-circuit et plus rien n'empêche le passage à l'arc électrique.

Dans une DBD, le canal conducteur se propage jusqu'à la surface du diélectrique de sorte que la totalité du champ extérieur se retrouve appliqué simplement aux bornes du diélectrique. Le champ dans le gaz devient alors nul et le filament s'éteint.

1. 4. 6. Effets d'une barrière diélectrique sur les filaments

Si le mécanisme de propagation d'un streamer peut dans certaines conditions être le même dans une décharge couronne que dans une DBD, la barrière diélectrique joue un rôle essentiel dans le processus d'extinction puis d'amorçage des filaments dans une DBD.

1. 4. 6. 1. Extinction d'un filament

Une DBD est nécessairement alimentée par une alimentation périodique sinon, elle s'éteint. Ceci est dû au fait que lorsque les filaments parviennent à la surface du diélectrique, les charges qu'ils transportent se déposent en surface et écrantent le champ extérieur (étape 5 : figure 1. 10). Ce dépôt de charge annihilant le champ dans l'espace gazeux, éteint rapidement les filaments ce qui explique leur temps de vie très court dans une DBD. Ce temps de vie correspond en effet simplement au temps d'arrivée des électrons sur le diélectrique. Une fois adsorbées, les charges ne diffusent pas sur la surface du diélectrique et peuvent rester

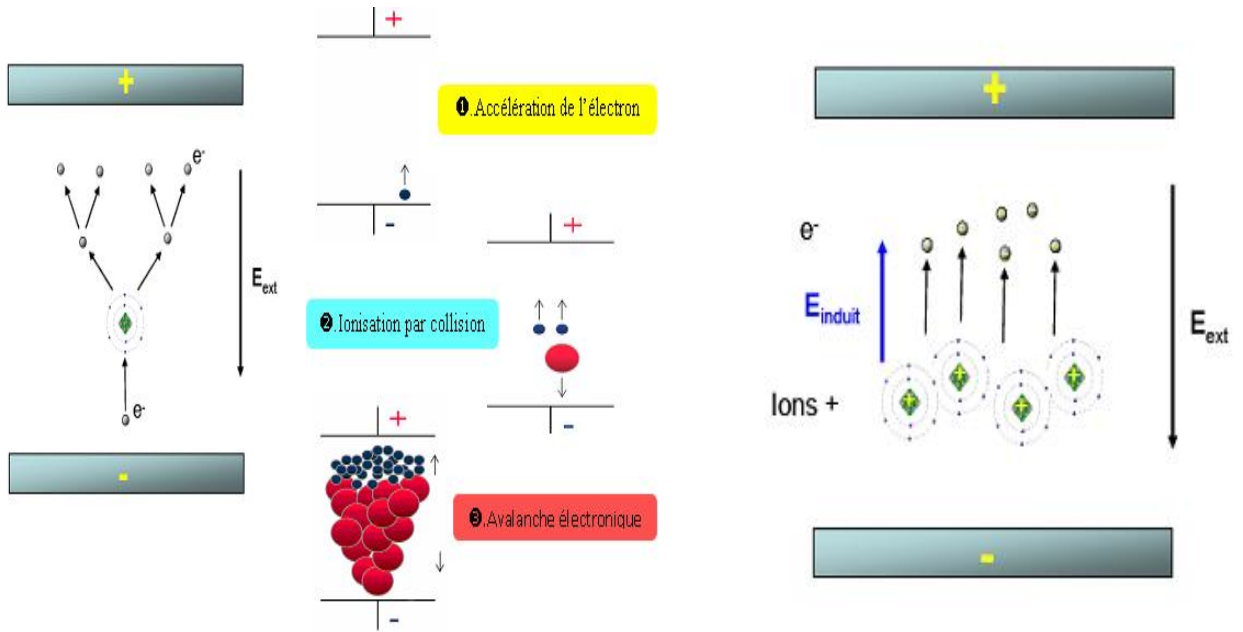
plusieurs minutes, voire plusieurs heures sur le diélectrique, tant que rien ne vient les recombinaison. La présence d'eau dans le gaz diminue par exemple le temps de vie des charges adsorbées mais malgré cela, les charges peuvent être observées simplement en saupoudrant la surface du diélectrique de fines particules après avoir pris le temps de démonter le réacteur ce qui prouve la relative stabilité des charges en surface [6].

1. 4. 6. 2. Amorçage des filaments

Le rôle des charges adsorbées ne s'arrête pas à l'extinction des filaments. Quelle que soit l'alimentation utilisée, les charges restent suffisamment longtemps sur la surface isolante pour être encore présentes lorsque l'alimentation change de polarité. Le champ qu'elles induisent vient alors renforcer le champ extérieur appliqué (figure 1. 11).

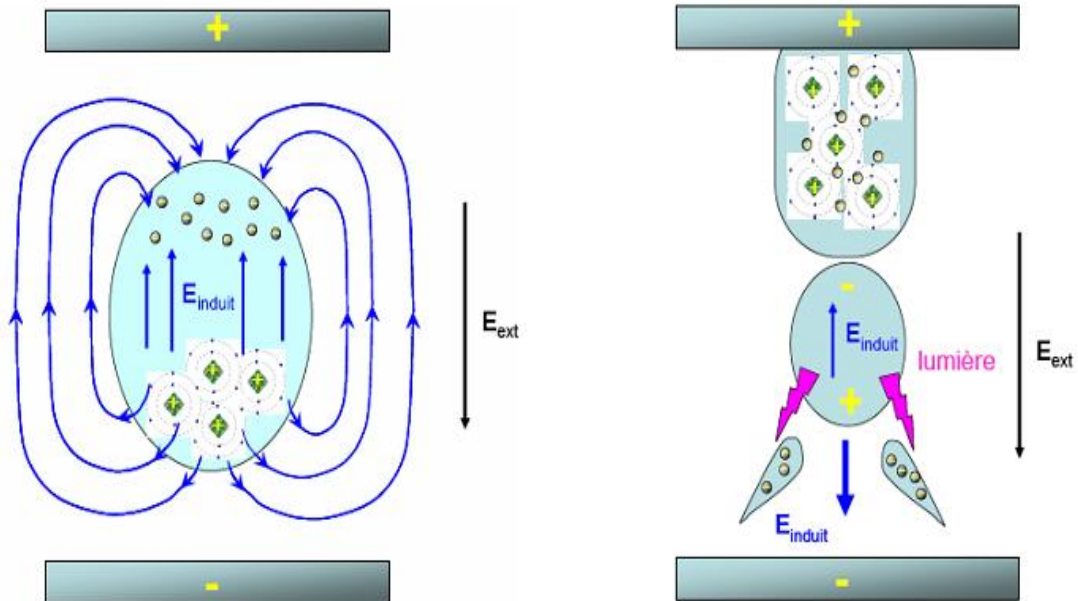
1. 4. 6. 3. Effet "mémoire " du diélectrique

La présence du diélectrique devient importante lorsque la micro-décharge a franchi l'espace inter-électrodes. Lors de la montée de la tension, les micro-décharges additionnelles sont initiées à de nouveaux endroits sur le diélectrique dû à la présence des charges résiduelles sur le diélectrique qui réduisent le champ électrique aux positions où les micro-décharges sont déjà apparues. Toutefois, lorsque la tension est inversée, les prochaines micro-décharges auront tendance à se former exactement aux endroits des micro-décharges du cycle précédents (figure 1. 12). Étant donné que la tension a chuté à ces endroits, l'atteinte du claquage dans la demi-période suivante nécessite un taux de variation de la tension externe plus faible. Conséquemment, l'opération de DBD à faible fréquence a tendance à distribuer les micro-décharges sur la surface disponible du diélectrique tandis que les hautes fréquences tendent à « rallumer » les anciennes micro-décharges exactement aux mêmes endroits à chaque demi-période [4]. Cet effet "mémoire " due à l'accumulation des charges sur le diélectrique est une caractéristique dominante pour les décharges filamenteuses qui peut avoir un effet important sur l'uniformité et l'homogénéité de la génération d'ozone pour le traitement de l'eau [21-22].



Étape ① : Avalanche électronique et zoom sur cette avalanche.

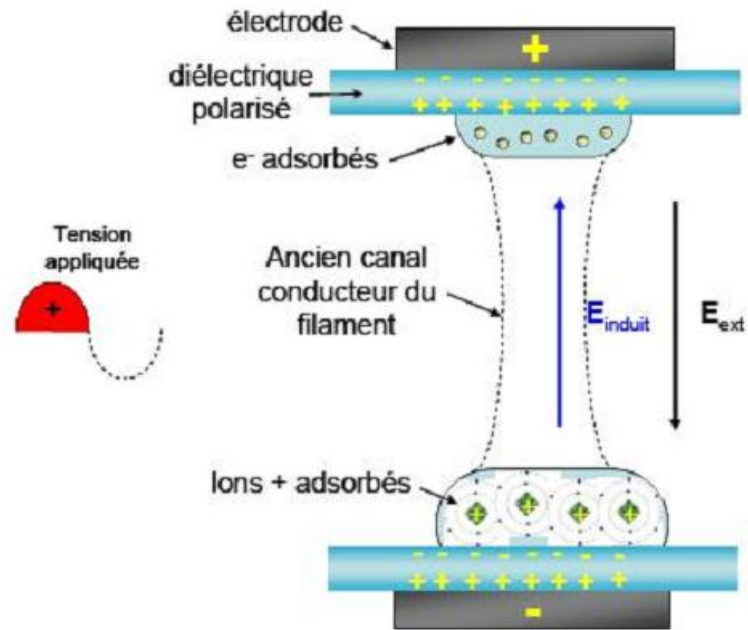
Étape ② : les électrons sont plus mobiles que les ions



Étape ③ : le champ créé par la zone de séparation de charge est égal au champ extérieur.

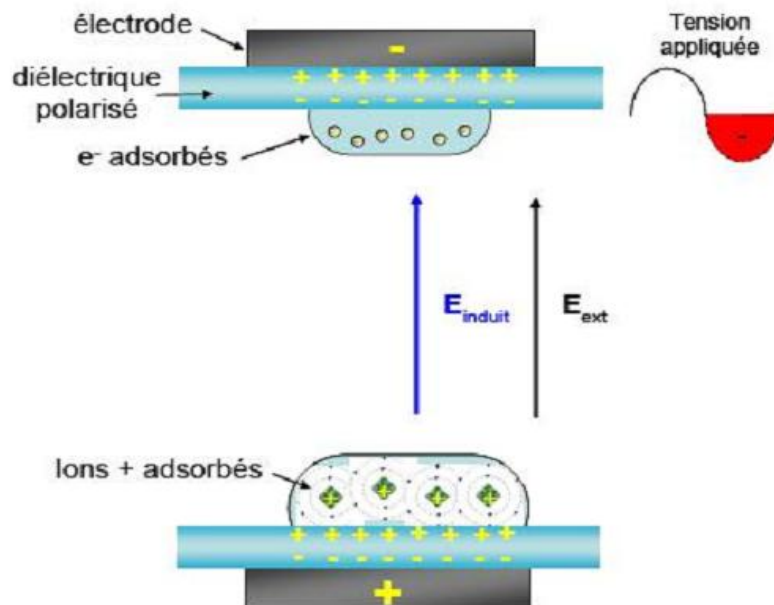
Étape ④ : le champ induit renforce les avalanches en amont. La photoionisation ensemence en électrons.

Figure 1. 9 : Schématisation des étapes de développement d'un filament de plasma à pression atmosphérique [6] [20].



Étape ⑤ : les charges déposées par un filament restent à la surface du diélectrique.

Figure 1. 10 : Effet des charges adsorbées [6].



Étape ⑥ : les charges déposées renforcent le champ extérieur à l'alternance suivante.

Figure 1. 11 : Effet des charges adsorbées lorsque la polarité de l'alimentation s'inverse [6].

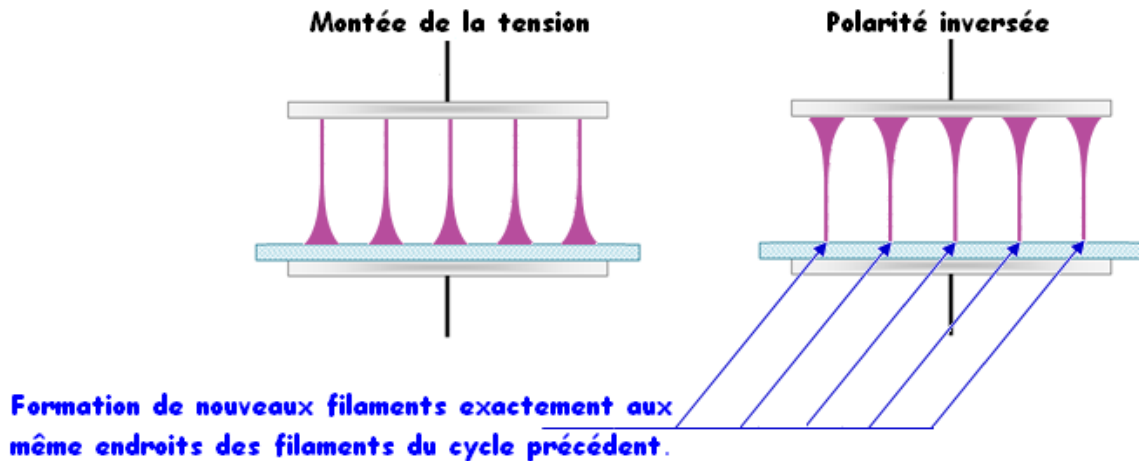


Figure 1. 12 : Effet "mémoire " dans une DBD [22].

1. 5. Types de décharges à barrière diélectrique

Les décharges fonctionnant en présence d'un diélectrique s'établissent en général selon un mode de décharge filamentaire ou micro-décharge [2] [23-24]. Parfois, dans des conditions très particulières, la décharge s'établit de façon homogène dite " *glow discharge*".

Dans les réacteurs que nous avons mis au point et qui sont décrits dans le quatrième et cinquième chapitre, il s'agit du premier type de décharge. Dans les décharges filamenteuses, du fait de la polarisation du diélectrique et de la persistance d'une charge de surface, il va y avoir une répartition aléatoire des filaments de décharge sur la surface du diélectrique.

L'utilisation d'un isolant permet également de générer des décharges soit *en volume* soit *de surface* [21]. Des photos de la décharge (en volume et de surface) en fonctionnement montrent quand à elles, des différences visuelles (figure 1. 13).

1. 5. 1. Décharge volumique à barrière diélectrique

La DBD volumique s'établit entre deux électrodes séparées l'une d'elle par un isolant, le diélectrique. La décharge se développe principalement dans le volume gazeux. Lorsqu'un espace gazeux sépare les électrodes, les filaments se propagent dans le volume de gaz et s'étalent sur la surface. Dans le cas des trois premiers montages de la figure 1. 14 (a à c), la décharge est obtenue dans le volume séparant les deux électrodes [2].

1. 5. 2. Décharge à barrière diélectrique surfacique

Cette décharge est établit entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre du diélectrique et est dite surfacique car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupant tout l'espace inter-électrodes). L'électrode active est directement en contact avec le diélectrique, et la décharge va se propager à la surface de l'isolant [2] [21] [25]. Dans une telle décharge, il est clair que la surface du diélectrique joue un rôle dans la propagation du plasma en particulier quand la cathode est au-dessous du diélectrique. La quatrième configuration de la [figure 1. 14 \(d à g\)](#) voit la décharge s'instaurer à la surface du diélectrique.

Créer le plasma près de la surface du diélectrique présente de nombreux intérêts. La proximité avec la surface permet d'abaisser la tension de claquage, parce que l'on supprime le gap inter-électrodes. Une telle décharge peut être facilement dupliquée et appliquée à la surface d'objets variés : cylindres, plaques...L'utilisation de cette décharge pour la dépollution de l'air est actuellement en pleine expansion.

Les DBDs de surface sont similaires aux DBDs en volume. Cependant, l'interaction avec le diélectrique est plus forte dans le cas de décharge surfacique, la capacité de celui-ci dépend très fortement de la longueur sur laquelle s'étale la décharge. Lorsque la tension est augmentée, le nombre de microdécharges augmente pour une DBD volumique alors que c'est la longueur de ces microdécharges qui augmente dans le cas d'une décharge surfacique [14].

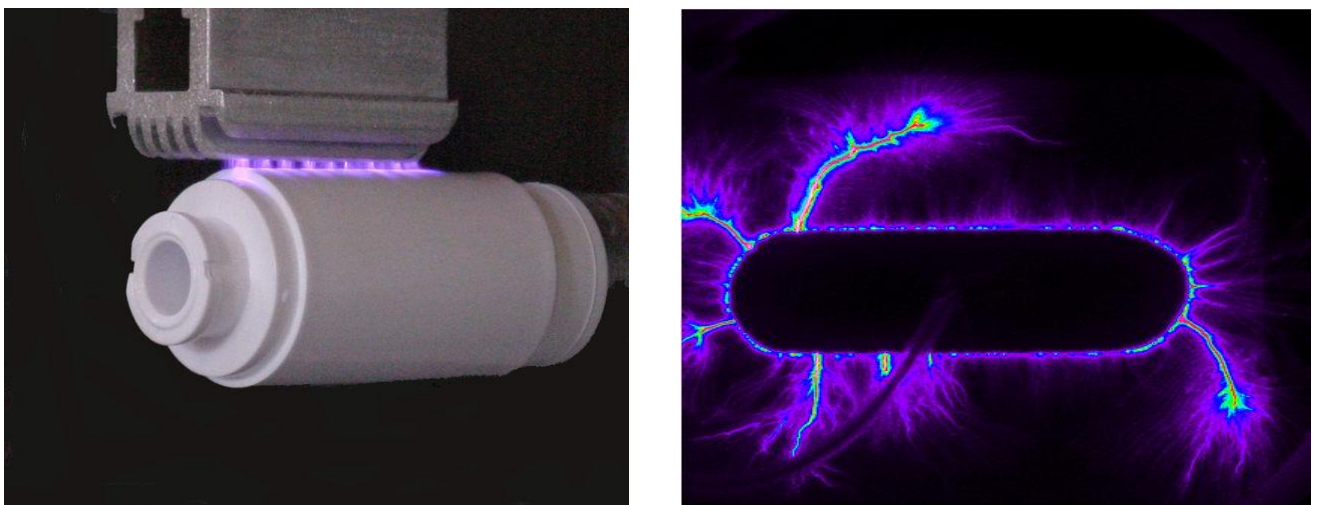


Figure 1. 13 : Photos d'une DBD en volume (gauche) et d'une DBD de surface (droite) [21].

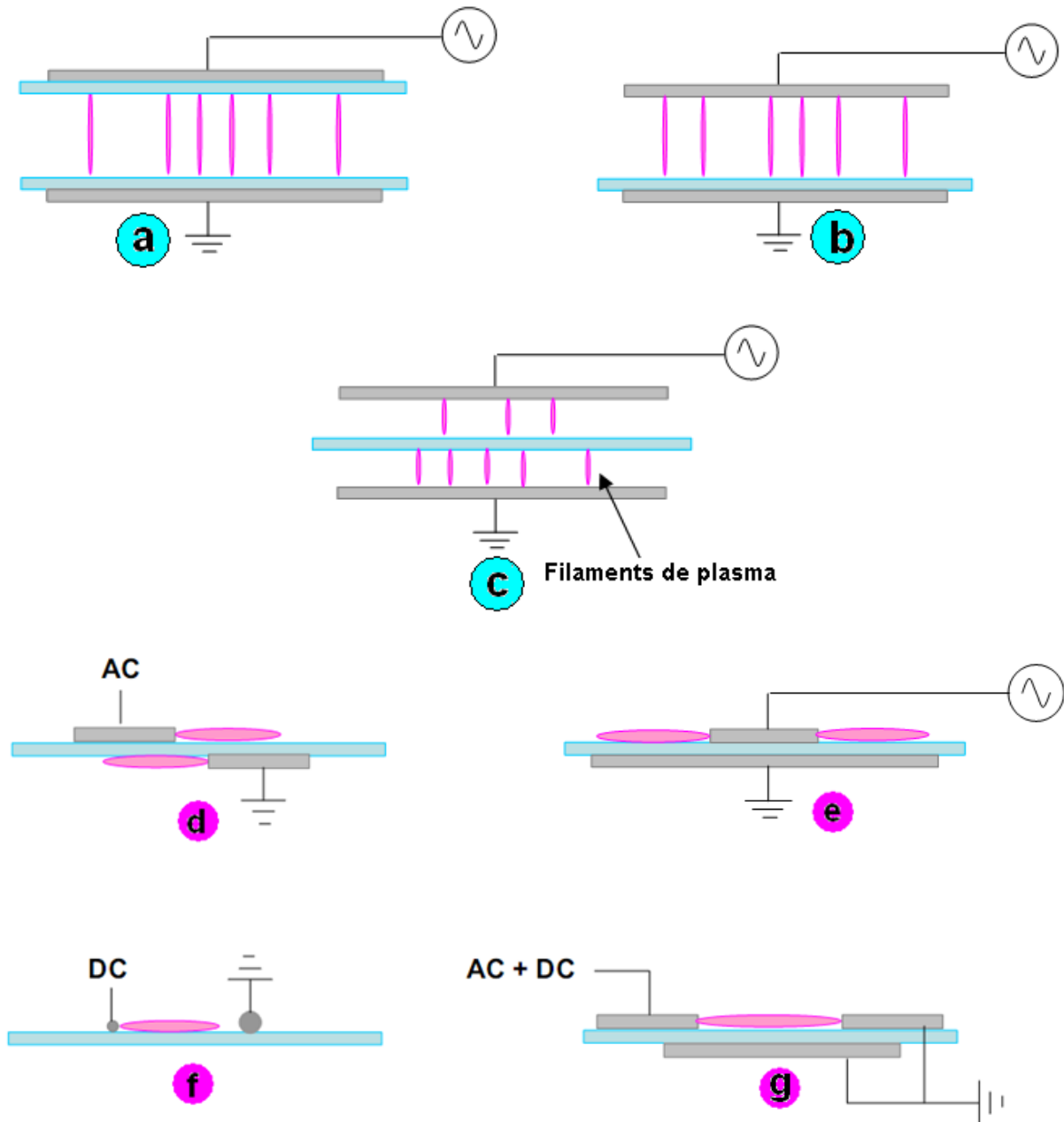


Figure 1. 14 : Schémas de décharge à barrière diélectrique [21],
 avec un gap gazeux (a à c), ou en surface (d à g).
 (d) DBD de surface à électrodes décalées, (e) DBD de surface à électrodes non décalées, (f)
 décharge couronne de surface, (g) décharge rampante.

1. 6. Étude expérimentale comparative entre la DBD en volume et la DBD de surface

Le but de l'étude étant de faire une comparaison entre la DBD volumique et la DBD surfacique, nous avons choisi d'utiliser une technologie déjà présente dans le laboratoire pour générer ce plasma. Nous avons testé deux géométries de décharges à barrière diélectrique. Il s'agit d'une part d'une décharge en *volume* de type pointe-plan et d'autre part d'une décharge de *surface*.

1. 6. 1. Décharge en volume

La cellule pour la décharge en volume est schématisée sur la [figure 1. 15](#). Elle est constituée de deux électrodes pointe-plan dont l'une des électrodes est recouverte d'un diélectrique solide. L'électrode plane dont le matériau constitutif est l'aluminium, étant reliée à la masse par l'intermédiaire d'une résistance de valeur ohmique $R = 100\Omega$. L'électrode active est une pointe en tungstène, de rayon de courbure $\rho = 150 \mu\text{m}$ et est placée au dessus de la barrière diélectrique à une distance de **1 mm**. Une plaque en verre rectangulaire de **30 cm** de longueur, **20 cm** de largeur et d'épaisseur fixe $e = 3 \text{ mm}$ constitue la barrière diélectrique. La tension est relevée à l'aide d'un voltmètre électrostatique.

La photo de la [figure 1. 16](#) illustre l'ensemble de l'équipement électrique ainsi que la cellule-plasma dont nous disposons au laboratoire pour effectuer cette expérience.

1. 6. 2. Décharge de surface

La cellule pour la décharge de surface est différente de celle en volume. Elle est obtenue en utilisant deux électrodes sous forme de deux bandes d'aluminium adhésif, de **2 cm** de largeur et **10 cm** de longueur, placées chacune sur un côté différent du diélectrique. La barrière diélectrique est en verre ayant une épaisseur fixe $e = 3 \text{ mm}$. La configuration est schématisée sur la [figure 1. 17](#).

Pour obtenir la décharge, on applique une haute tension alternative (généralement sinusoïdale) entre les deux électrodes, l'une d'entre elles étant reliée à la terre. Par la suite, nous considérons la configuration classique suivante : sur la face supérieure, l'électrode active désigne l'électrode reliée au signal HT et sur la face inférieure, l'électrode de masse désigne l'électrode reliée à la terre. Lorsque la haute tension est appliquée, un plasma de couleur bleutée se forme à la surface du diélectrique sur les deux faces. Il s'étend à l'extrémité d'une électrode vers l'extrémité la plus éloignée de l'électrode opposée et est réparti de façon assez homogène le long des électrodes.

1. 6. 3. Alimentation électrique de la décharge

Du fait de l'utilisation de décharge à barrière diélectrique dans le cadre de notre travail afin d'éviter le passage à l'arc, il faut générer une tension alternative. C'est donc à partir d'une alimentation variable (HAMPDER ENGINEERING CORPORATION, 0-220V) traditionnel qu'un signal sinusoïdal de fréquence **50 Hz** est délivré. La tension ainsi générée

est ensuite élevée entre **0** et **6 kV** par un transformateur haute tension haute fréquence (fréquence **22 kHz**). Une résistance de mesure de **100Ω** est insérée en série entre une électrode et la masse pour effectuer la mesure du courant généré par la DBD.

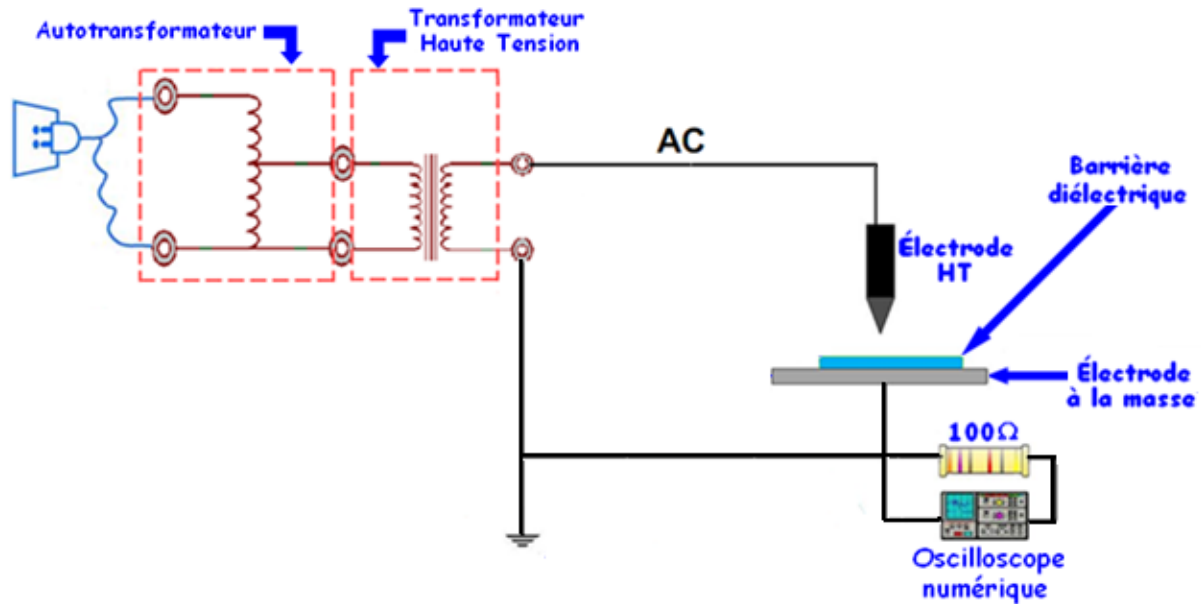


Figure 1. 15 : Représentation schématique du dispositif expérimental pour l'étude de la DBD en volume.

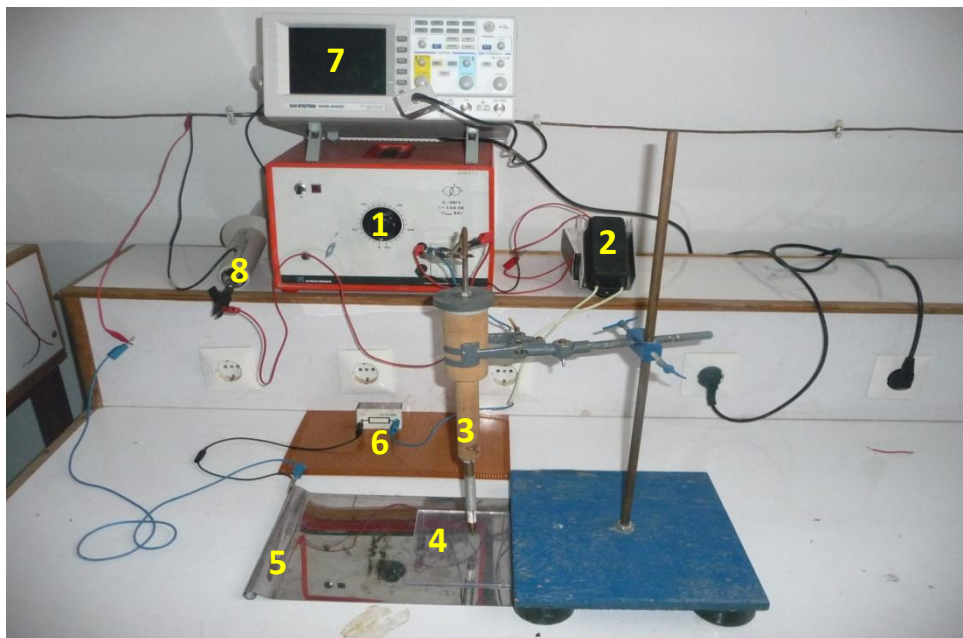


Figure 1. 16 : Visualisation du dispositif expérimental.

1- Autotransformateur ; 2- Transformateur HT ; 3- Électrode HT (pointe) ; 4- Diélectrique ; 5- Électrode à la masse ; 6- Résistance de mesure ; 7- Oscilloscope numérique ; 8- Sonde HT.

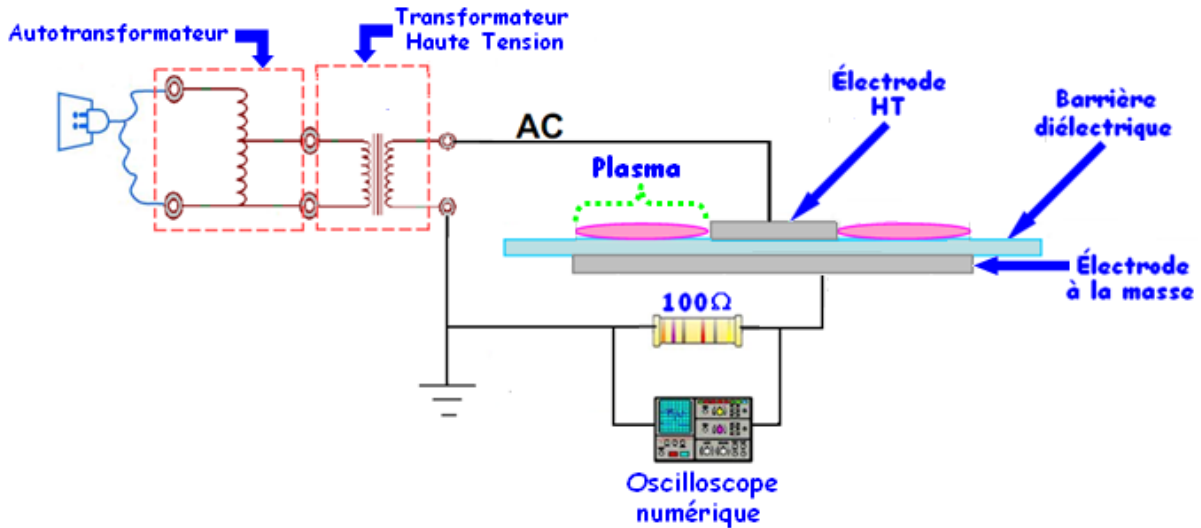


Figure 1. 17 : Représentation schématique du dispositif expérimental pour l'étude de la DBD de surface.

1. 6. 4. Résultats et discussions

Le courant est constitué de séries d'impulsions apparaissant à chaque demi-période, s'éteignant après que la tension atteint sa valeur maximale. Cette forme de courant est typique des séries de micro-décharges qui apparaissent dans une décharge à barrière diélectrique surfacique. Sur la [figure 1. 18-a](#) apparaissent simultanément les contributions de la décharge de chaque côté de l'électrode HT. Pour la DBD volumique, la génération de micro-décharges est limitée. On obtient alors un courant dont la forme est représentée à la [figure 1. 18-b](#). Dans ce cas, les impulsions de courant sont pratiquement inexistantes lors de l'alternance négative. L'amplitude des impulsions est nettement supérieure par rapport à celle dans la DBD de surface et les pics de courant peuvent atteindre des valeurs de **80 mA** mais pour des durées relativement courtes (de l'ordre de la ns).

Les [figures 1. 19](#) et [1. 20](#) représentent le comportement du courant de décharge en fonction du temps pour une tension appliquée de **5 kV** (a) et une tension de **6 kV** (b) pour la DBD volumique et la DBD surfacique respectivement.

1. 6. 5. Commentaires

Pour achever cette partie, il est intéressant de comparer – brièvement – la DBD volumique et la DBD surfacique. Cette simple expérience met en évidence que, pour la configuration classique de la [figure 1. 17](#) (électrode active à la face supérieure et électrode de

masse à la face inférieure), les impulsions positives et les impulsions négatives sont majoritairement liées au plasma de part et d'autre de l'électrode active. Comparativement à la DBD volumique, la décharge de surface à barrière diélectrique se caractérise par une plus grande stabilité dans le temps et une meilleure homogénéité le long des électrodes. Par contre, de forts pics de courant apparaissent dans la décharge de volume à barrière diélectrique.

Ces résultats constituent une première approche de l'étude de la décharge à barrière diélectrique et ouvre la voie à des travaux complémentaires afin d'optimiser une cellule pour le traitement de l'air et la dépollution de l'eau. Néanmoins, ces études préliminaires ont permis d'utiliser, pour la première fois au laboratoire, la DBD surfacique (pour le traitement de l'air et des odeurs) et la DBD volumique (pour la dépollution de l'eau). Ces travaux sont présentés en détail au quatrième et cinquième chapitre.

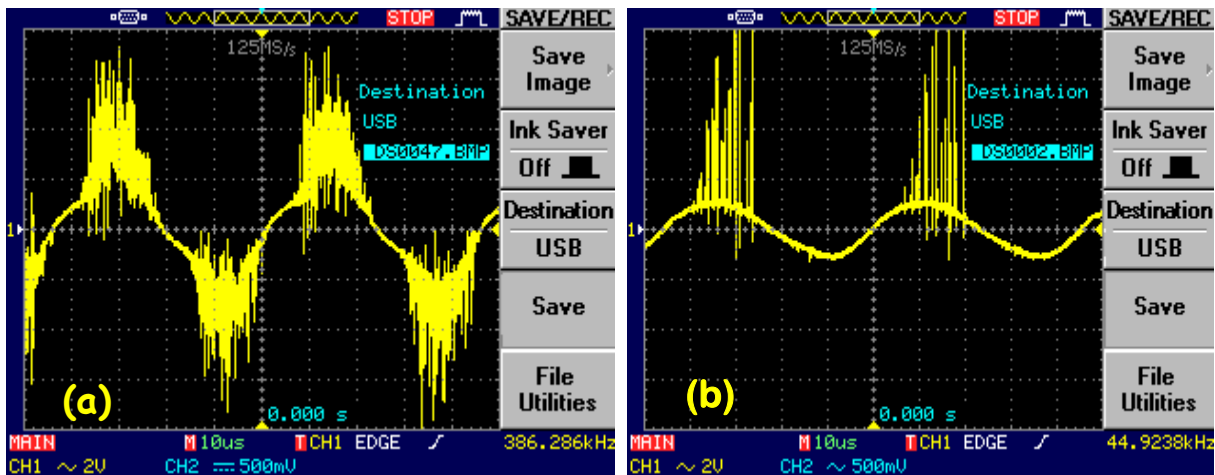


Figure 1. 18 : Oscillogramme typique du courant.
(a) DBD surfacique, (b) DBD volumique.

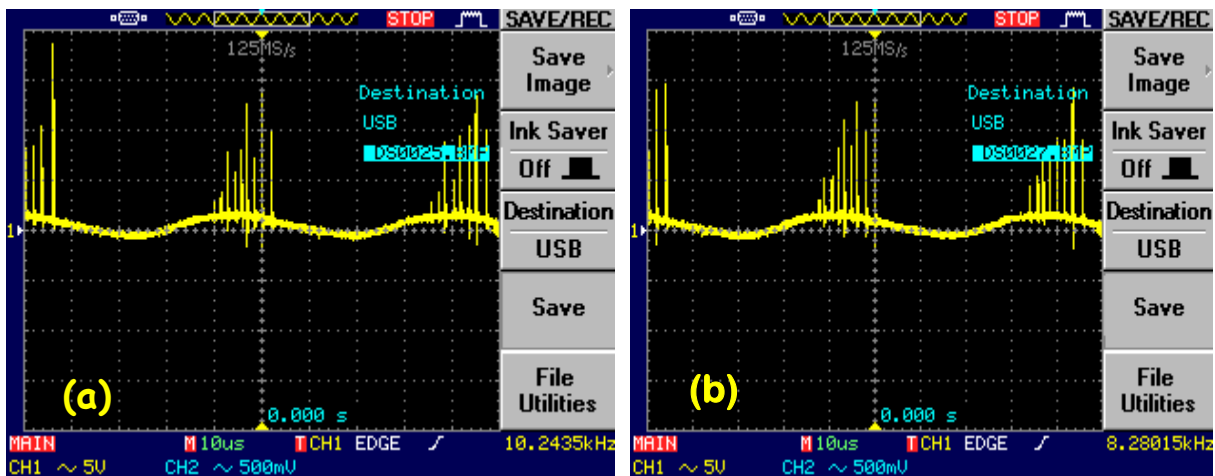


Figure 1. 19 : Oscillogramme du courant pour la DBD volumique.
Épaisseur du diélectrique = 3mm,
(a) $U = 5 \text{ kV}$, (b) $U = 6 \text{ kV}$.

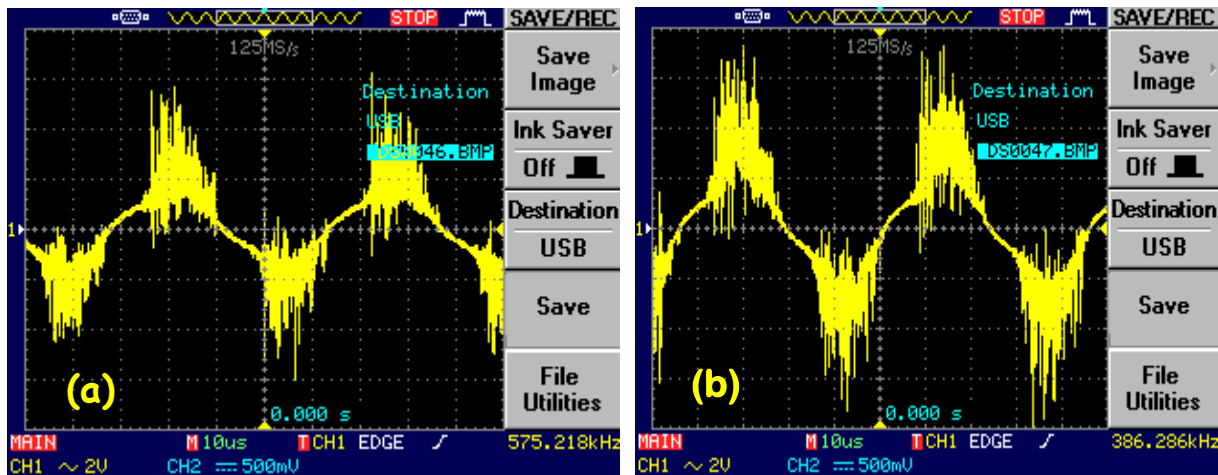


Figure 1. 20 : Oscillogramme du courant pour la DBD surfacique.
 Épaisseur du diélectrique = 3mm.
 (a) $U = 5 \text{ kV}$, (b) $U = 6 \text{ kV}$.





1. 7. Décharges à barrière diélectrique dans les applications industrielles

Les premières expériences utilisant des décharges à barrières diélectriques à pression atmosphérique furent réalisées par Siemens, en **1857**, qui obtint la première synthèse de l’ozone dans l’air à partir d’une DBD [26]. La production d’ozone fut l’objet de nombreuses recherches finalisées qui aboutirent à la réalisation de réacteurs industriels largement utilisés de nos jours. L’ozone est principalement utilisé dans le traitement de l’eau pour la rendre potable ainsi que dans l’industrie du papier ou en association avec de l’oxygène et de l’hydroxyde d’hydrogène, il permet de traiter la pâte à papier sans intervention de chlore.

Au cours de ces dernières décennies, les applications des décharges à barrières diélectriques ont été diversifiées. Selon l’objectif recherché soit la décharge filamentaire, soit la décharge luminescente est privilégiée. Il est apparu très tôt que ces décharges à barrières diélectriques constituaient un moyen privilégié afin de créer des excimères de gaz rares [10] [16]. En effet, en plus d’un fonctionnement à haute pression, une condition supplémentaire doit être réunie pour former les excimères. Des électrons très rapides (entre **8** et **20 eV**) sont nécessaires pour former les états atomiques précurseurs de ces excimères. La DBD est un candidat idéal pour réaliser la lampe à excimères, car ce sont des décharges fonctionnant à haute pression, et dont les électrons très énergétiques évoluent dans un champ électrique élevé, proche de la tension d’amorçage.

Les applications développées utilisent le rayonnement ultraviolet lointain (U. V. L.) émis par ces milieux gazeux. Pour des pressions de quelques centaines de Torr, voire de plusieurs atmosphères, l’essentiel de la luminescence U. V. L. est constitué par le second

continuum des gaz rares, situé respectivement à **172 nm**, **145 nm** et **130 nm** pour le xénon, le krypton et l'argon. Ces lampes à excimères sont des sources intenses de rayonnement incohérent U. V et U. V. L., et sont dotées d'une bonne efficacité. Ces rayonnements, de faibles largeurs spectrales (environ **10 à 15 nm**), sont émis dans des gammes de longueurs d'ondes intéressantes pour des applications industrielles qui sont principalement :

-  Le dépôt des couches minces en micro-électronique,
-  Le traitement de surface,
-  La photo-oxydation du silicium à basse température,
-  La photo-dégradation de micropolluants ou le traitement de l'eau et des gaz d'échappement.

Les écrans à plasmas utilisent le rayonnement des excimères pour exciter différents luminophores pour produire les trois couleurs fondamentales (rouge, vert et bleu).

Une application visée pour un proche futur, concerne le pompage des lasers à excimères par des DBD afin de minimiser le coût du système laser.

Enfin, les décharges à barrières diélectriques intéressent également les "éclairagistes" qui, pour des considérations environnementales (l'économie d'énergie et l'élimination du mercure), souhaiteraient remplacer les lampes à décharge d'arc à mercure par des lampes à excimères.

1. 8. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur les plasmas en général, pour bien situer en particulier les plasmas non-thermiques générés par les décharges à barrière diélectrique qui sont étudiés dans ce travail. Au cours de ce chapitre, nous avons introduit le concept de décharge à barrière diélectrique et les éléments physiques qui la caractérisent.

Nous allons nous intéresser plus particulièrement à la configuration de DBD surfacique à électrodes non décalées avec le plasma sur une face seulement (chapitre IV) et à la configuration cylindre-cylindre mono-diélectrique pour générer une DBD en volume (chapitre V).

Puisqu'il est possible de produire l'ozone dans certains gaz et plus spécialement dans l'air par les décharges électriques, nous allons faire le point sur ce dernier dans le chapitre suivant. nous allons présenter aussi des généralités sur les propriétés physicochimiques de l'ozone, les différentes méthodes de sa production et ses applications.

2.1. Introduction

Nous avons besoin d'un apport d'oxygène (O_2) pour respirer et vivre. Sur terre, cet oxygène est produit naturellement par le processus de la photosynthèse des plantes et des algues. Les plantes absorbent le gaz carbonique généralement pendant la nuit, l'utilisant pour leur croissance et libèrent de l'oxygène utile aux hommes et aux animaux.

Quand une molécule d'oxygène est exposée aux rayons ultra-violet (UV), l'activité individuelle des atomes est accrue grâce à l'absorption d'énergie. Si le niveau des UV est assez élevé, l'oxygène O_2 sera divisé en deux atomes d' O_1 . La plupart des atomes d'oxygène O_1 se recombinent pour reformer de l'oxygène O_2 , mais certains en se recombinant produisent de l' O_3 , 3 atomes d'oxygène, appelé **ozone**.

2.2. Découverte de l'ozone et les premières mesures

2. 2. 1. Découverte de l'ozone

Cela fait déjà assez longtemps que l'ozone est le sujet de recherches. En **1840**, le chimiste *Christian Friedrich Schönbein* découvrit que ce gaz se formait pendant les décharges électriques, et le baptisa ozone (ce qui signifie "sentir" en grec). On découvrit rapidement que l'ozone était un composant de l'air. *Schönbein* lui-même développa les techniques de mesure de l'ozone, qui furent améliorées à l'observatoire Montsouris à Paris. Ces premières données de concentrations d'ozone, entre **1876** et **1910**, sont aujourd'hui le témoin des teneurs en ozone de l'atmosphère avant la révolution industrielle [28-29].

En **1879**, on découvrit que seule une très faible partie des UV-B du soleil atteignait la surface terrestre. L'année suivante, les scientifiques montrèrent que l'ozone absorbait énormément ces rayons et qu'il pouvait être responsable de la filtration de ces UV-B. Cependant la quantité d'ozone présente dans la basse troposphère était trop faible pour jouer ce rôle, et on supposa avec raison que l'ozone devait se trouver essentiellement dans la haute atmosphère.

Au début du 20^{ème} siècle, des travaux très importants ont été réalisés par *Gordon Dobson*. Ce chercheur a développé un spectromètre Dobson qui est utilisé depuis **1929** pour mesurer l'ozone dans toute l'atmosphère, et est utilisé de nos jours, même s'il est progressivement remplacé par des méthodes plus modernes [30].

2. 2. 2. Cycle de Chapman

En 1930, le britannique *Sydney Chapman* exposa ses théories sur la formation et la destruction chimique de l'ozone [30]. Ces hypothèses, qui se révélèrent correctes, sont appelées le cycle de Chapman ou les réactions de Chapman. L'atome d'oxygène et l'ozone se transforment alternativement l'un en l'autre. Les liaisons qui unissent les atomes au sein des molécules sont cassées à cause des rayons solaires. Pour briser la molécule d'O₂ il faut plus d'énergie solaire que pour briser la molécule d'ozone (dans le premier cas, il faut une longueur d'onde de 240 nm contre 320 nm dans le second cas). La formation (figure 2.1) et la destruction (figure 2.2) de l'ozone sont en équilibre et la réaction dont le bilan est nul est la suivante :



La quantité d'ozone résulte donc d'un équilibre entre formation et destruction naturelles.

2. 3. Définition de l'ozone

L'ozone est un gaz de couleur bleu pâle voisin de l'oxygène qui peut avoir sur les êtres vivants des conséquences bénéfiques ou dangereuses. Il est naturellement détruit et régénéré dans l'atmosphère suivant un processus faisant intervenir le rayonnement solaire ultraviolet et l'oxygène. Il est présent dans la haute atmosphère (stratosphère) sous la forme d'une couche d'une quarantaine de kilomètres d'épaisseur surmontant la troposphère. Cette couche, connue sous le nom de « couche d'ozone », fait l'objet d'une surveillance constante. Elle constitue en effet un écran aux rayonnements ultraviolets émis par le soleil, rayonnements dont les effets nocifs affectent non seulement l'être humain (cancers, cataractes, ulcères, maladies du sang, etc.) mais également d'autres êtres vivants [28-29] [32-33].

Mais l'ozone est également présent dans la basse atmosphère grâce aux courants atmosphériques descendants en provenance de couche d'ozone. Lorsqu'il est inhalé, il provoque des irritations du nez et de la gorge. C'est donc un gaz toxique. L'accroissement de sa concentration dans l'air que nous respirons, notamment lors de situations météorologiques empêchant sa dispersion, représente un danger pour notre santé. Dans la basse atmosphère, l'ozone peut, entre autres, résulter de l'action sur l'air de décharges électriques (orages). Mais il provient surtout de la pollution urbaine émanant de certaines activités humaines. Il est essentiellement produit dans les régions tropicales et est transporté vers les hautes latitudes au cours de l'hiver par les grands courants aériens [33].

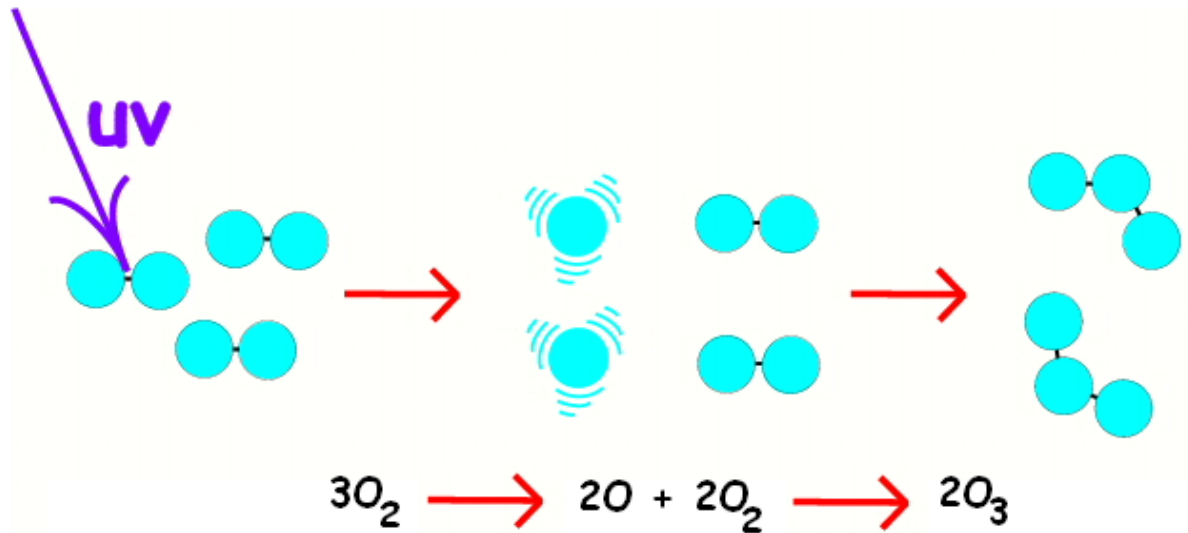


Figure 2.1 : Formation naturelle de l'ozone (cycle de Chapman) [31].

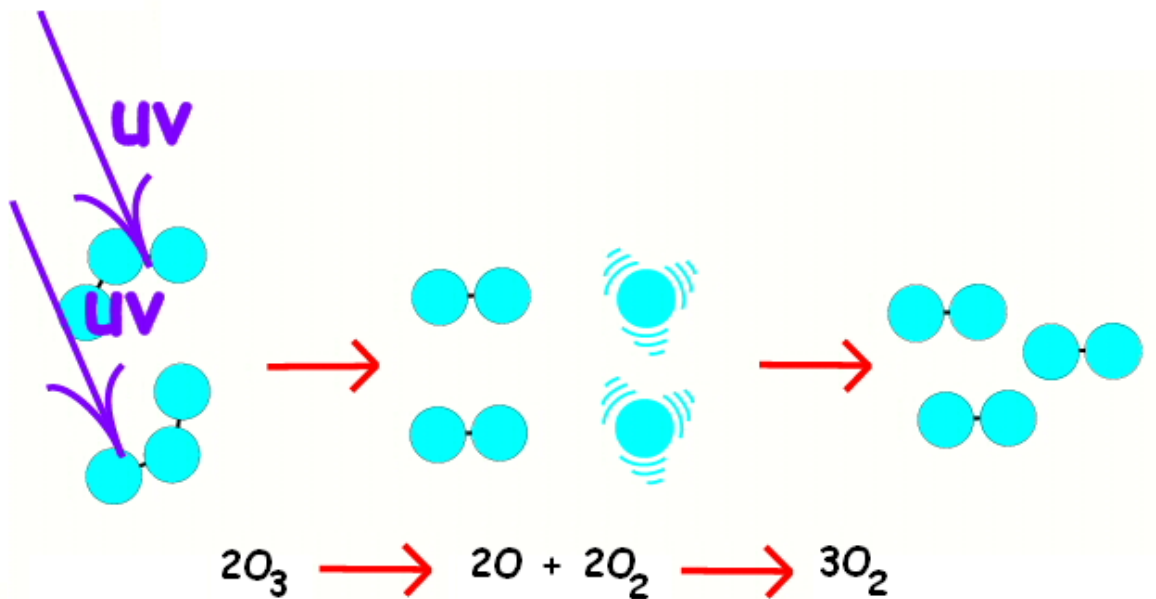


Figure 2.2 : Destruction naturelle de l'ozone (cycle de Chapman) [31].

2.4. Caractéristiques de l'ozone

L'ozone (O_3) est une forme très instable et réactive de l'oxygène. C'est un gaz bleuté et odorant, qui se forme naturellement dans la stratosphère sous l'action du rayonnement ultraviolet, émis par le soleil, sur les molécules d'oxygène. Il est généré artificiellement par

décharge électrique dans de l'air, de l'oxygène, ou un mélange des deux.

L'ozone est un oxydant très puissant utilisé notamment dans le traitement de l'eau. On parle alors d'ozonation. Celle-ci résulte de deux types d'oxydation bien distincts qu'il convient de définir. L'oxydation dite moléculaire est reliée directement à la molécule d'ozone O_3 . L'autre forme d'oxydation, dite radicalaire, est à relier à une forme non commune de l'ozone, où la molécule a perdu un électron apparié (normalement, les électrons sont présents par paires, mais dans le cycle de réactions en chaîne de l'ozone, des dissociations de paires d'électrons peuvent avoir lieu), conduisant à la formation du radical hydroxyle OH^\bullet . L'ozone moléculaire est responsable des réactions dites directes, à actions spécifiques ; les radicaux, quant à eux, sont responsables des réactions dites indirectes, beaucoup plus rapides, mais nettement moins ciblées que les premières, les radicaux oxydant un grand nombre de molécules. Il est à noter que certains composés tendent à stabiliser l'ozone dans l'eau, et donc à limiter la formation de ces radicaux. C'est notamment le cas des ions carbonates et bicarbonates.

L'ozone est peu soluble dans l'eau. Sa solubilité augmente avec la température de l'eau et avec sa concentration dans la phase gazeuse. Inflammable et explosif, l'ozone est aussi plus lourd que l'air (densité par rapport à l'air : **1,657**) ; il peut donc s'accumuler près du sol. L'odeur piquante de l'ozone est détectée à un seuil de perception d'environ **0,01 ppm**, et l'on considère qu'un taux de **0,25 ppm** est préjudiciable à la santé. L'ozone étant un gaz instable, il est produit sur le lieu de son utilisation par décharge électrique dans un gaz contenant de l'oxygène. Il est généralement utilisé de l'air, qui doit être propre (pour éviter des problèmes de répartition de courant) et sec : son point de rosée devant se situer à **- 60°C**, afin d'éviter tout problème de corrosion à l'intérieur du générateur d'ozone [34].

2. 5. Données physico-chimiques sur l'ozone

2. 5. 1. Propriétés physiques

L'ozone est un composé naturel présent dans toute l'atmosphère à faible concentration [35]. À température ordinaire l'ozone est un gaz instable de couleur bleue lorsqu'il est observé sous une épaisseur suffisante, d'odeur caractéristique et pénétrante (décelable à des teneurs de l'ordre de **0,01 à 0,05 ppm**).

Les principales constantes physiques, thermodynamiques et toxicologiques de l'ozone sont reprises dans le [Tableau 2.1](#).

Tableau 2.1 : Principales constantes physiques de l'ozone [28] [35-36].

Masse molaire	47,9982 g/mol
Point de fusion	-192,7°C
Point d'ébullition	-111,9 °C (1 atm.)
Masse volumique (gaz) 0°C, 1 atm.	2,15 g/l
Enthalpie de formation	142,12 KJ/mol
Énergie de dissociation	-144,8 KJ/mol
Potentiel d'oxydation à 25°C	+2,076 V
Angle de liaison	116°

2.5.2. Structure de l'ozone

L'ozone se présente sous la forme d'un triangle isocèle d'un angle au sommet égal à $116^{\circ}45'$ et de deux liaisons interatomiques de $1,278 \cdot 10^{-10}$ m. La structure de l'ozone est comme suit ([figure 2.3](#)) [35] [37]:

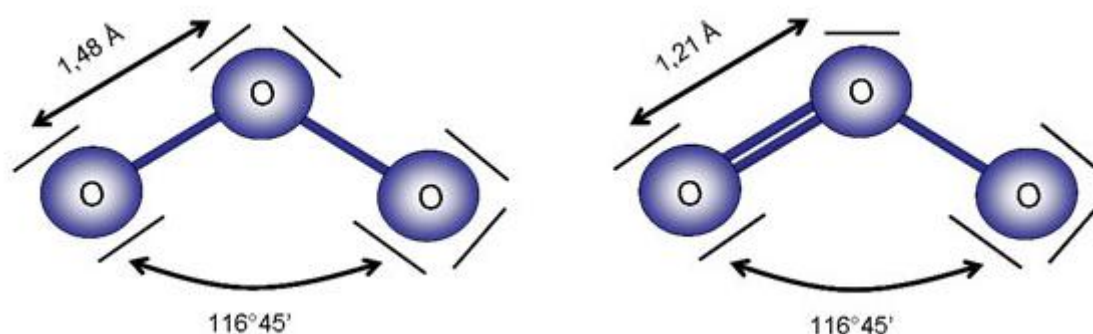


Figure 2.3 : Structure de l'ozone [28].

2.6. L'ozone : bon ou mauvais

L'ozone se produit aussi bien dans la haute atmosphère et au niveau du sol. Il peut être bon ou mauvais, selon l'endroit où il se trouve.

2. 6. 1. Bon ozone

L'ozone est en quelque sorte le grand frère de l'oxygène. Il se produit naturellement dans la haute atmosphère terrestre où il forme une couche protectrice qui nous protège des rayons ultraviolets nocifs. Les produits chimiques d'origine humaine sont connus pour détruire ce bénéfique ozone.

De nos jours, le bon ozone est généré in-situ avec des générateurs d'ozone [38]. Bien que l'ozone soit un composé puissant, son cycle de vie est très court. Lorsque celui-ci entre en contact avec des bactéries, virus ou odeurs, ceux-ci sont oxydés par un des 3 atomes d'oxygène qu'il possède. Le seul produit résultant de cette oxydation est... le dioxygène !

Outre cette efficacité redoutable, nous savons également que l'ozone est sain à utiliser. Ces expositions n'ont pas d'effets sur la santé humaine, excepté cette odeur relativement déplaisante d'air "sale". C'est cette odeur déplaisante qui permet de concevoir des moyens de productions sûrs [39].

2. 6. 2. Mauvais ozone

Dans la basse atmosphère terrestre, près du niveau du sol, l'ozone se forme lorsque les polluants émis par les voitures, des centrales électriques, des chaudières industrielles, des raffineries, des usines chimiques et d'autres sources réagissent chimiquement en présence de la lumière solaire (figure 2. 4). L'ozone au niveau du sol est un polluant atmosphérique nocif [38-39].

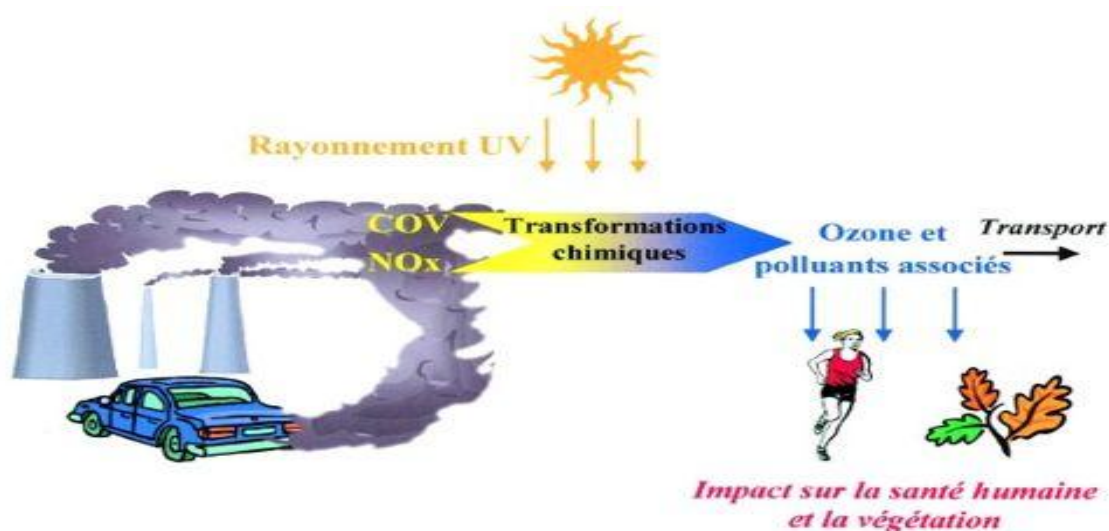


Figure 2. 4 : Mauvais ozone [40].

2. 7. Modes de production de l'ozone

2. 7. 1. Production naturelle

L'ozone, composé dérivé de l'oxygène, se trouve dans l'atmosphère en petites proportions. Sa formation naturelle est due à l'action des décharges électriques (figure 2. 5) se produisant dans l'atmosphère, ainsi que du fait des rayons ultra-violetts provenant du soleil (figure 2. 6), face à l'oxygène existant dans l'atmosphère.

Ces phénomènes atmosphériques sont chargés d'apporter de l'énergie nécessaire à la formation de l'ozone, d'après la réaction endothermique :



Il se trouve dans la nature en plus ou moins grande quantité, ceci dépend du degré de purification de l'environnement. C'est ainsi que nous pouvons sentir son odeur pénétrante dans les espaces libres, s'accroissant surtout après les orages violents. Dans l'atmosphère qui entoure les villes surtout dans les environnements confinés, l'absence d'ozone est presque totale. Ceci dit, l'ozone est un constituant vital de la haute atmosphère, ou une couche d'ozone appelée "OZONOSPHERE" agit comme un véritable filtre afin que les radiations ultra-violettes irradiées par le soleil atteignent la terre avec seulement le millionième de leur action, car dans le cas contraire ça serait fatal pour les êtres vivants sur la terre [38] [41].

Actuellement, la valeur de **0,1 ppm (0,2 mg/m³** d'air) est considérée comme la limite la plus sûre, ce chiffre étant celui qui est accepté par les chercheurs et les associations scientifiques américaines, depuis 15 ans ; cette valeur est celle maximum prise pour calculer nos installations.

2.7. 1. 1. Formation de l'ozone par décharge électrique

La formation de l'ozone par décharge électrique passe par trois étapes (figure 2. 7) :

- **1^{ère} étape :** Les molécules d'oxygène (**O₂**) sont scindées par une forte tension électrique résultant en deux individuels atomes d'oxygène (**O₁**).
- **2^{ème} étape :** Les deux atomes d'oxygène (**O₁**) s'unissent avec d'autres molécules d'oxygène (**O₂**) pour produire l'ozone (**O₃**).
- **3^{ème} étape :** Ainsi
$$\text{O}_1 + \text{O}_2 = \text{O}_3$$

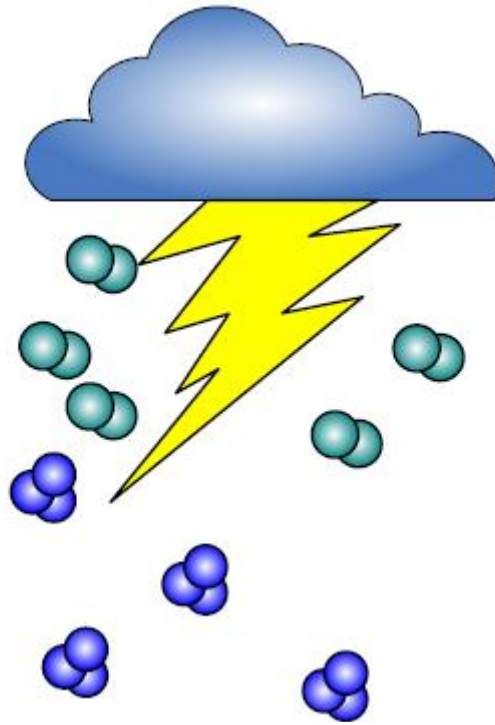


Figure 2. 5 : Formation naturelle de l'ozone par décharge électrique [29].

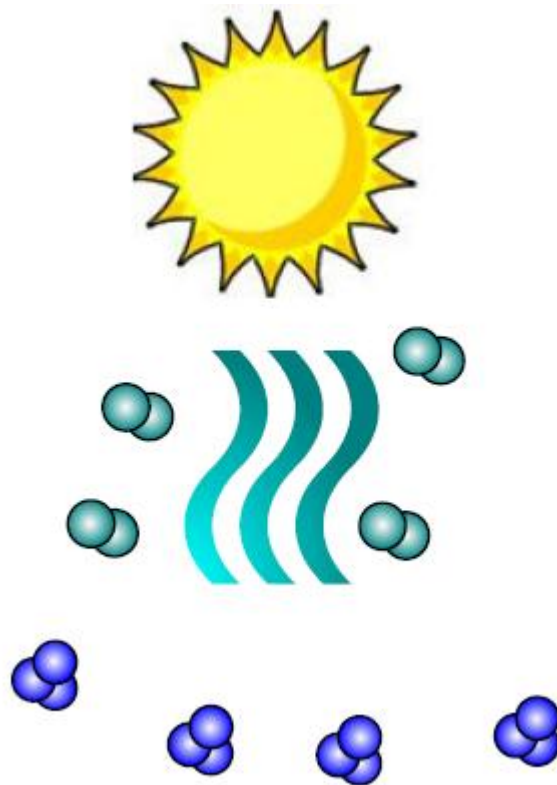


Figure 2. 6 : Formation naturelle de l'ozone par les rayons UV [29].

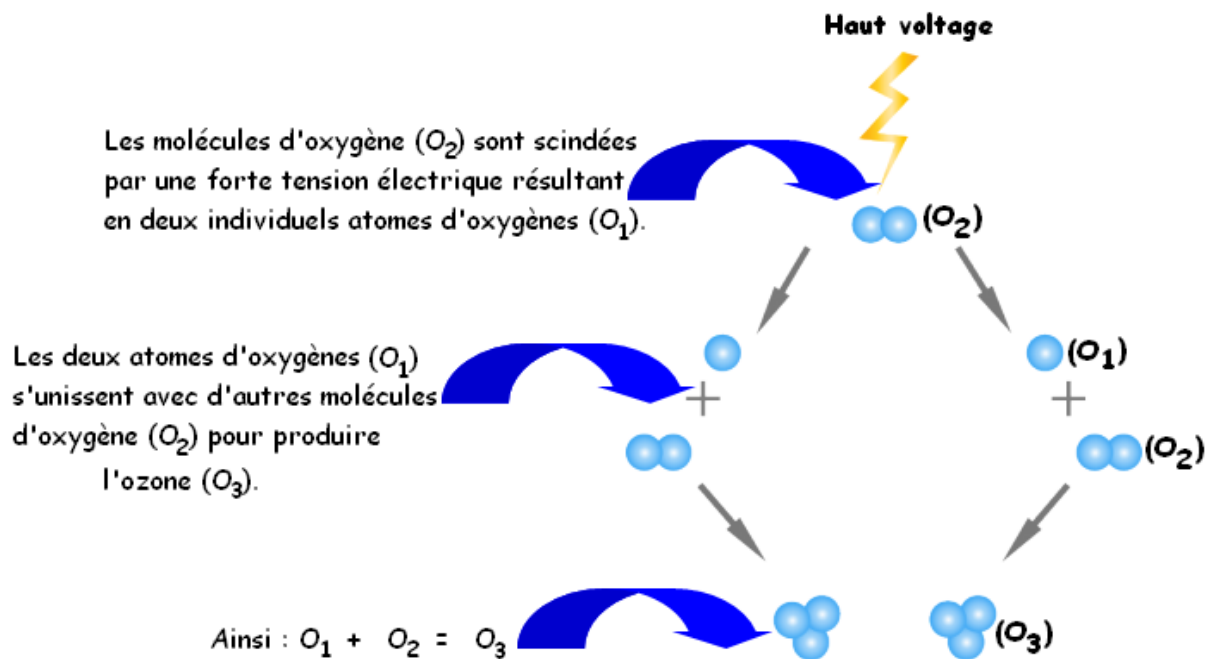


Figure 2. 7 : Étapes de formation de l'ozone par décharge électrique [29] [42].

Une très grande quantité d'ozone peut être créé avec l'éclairage de chaque foudre. L'ozone est responsable de l' "air frais" que nous respirons après un tonnerre d'orage.

2.7. 1. 2. Formation de l'ozone par rayons UV

La formation de l'ozone par les rayons UV passe par quatre étapes (figure 2. 8) :

- **1^{ère} étape** : Une radiation UV de haute énergie atteint une molécule O_2 .
- **2^{ème} étape** : Deux atomes d'oxygène sont alors libérés.
- **3^{ème} étape** : Ces radicaux oxygènes entrent en collision avec des molécules de dioxygène.
- **4^{ème} étape** : formant ainsi une molécule d'ozone.

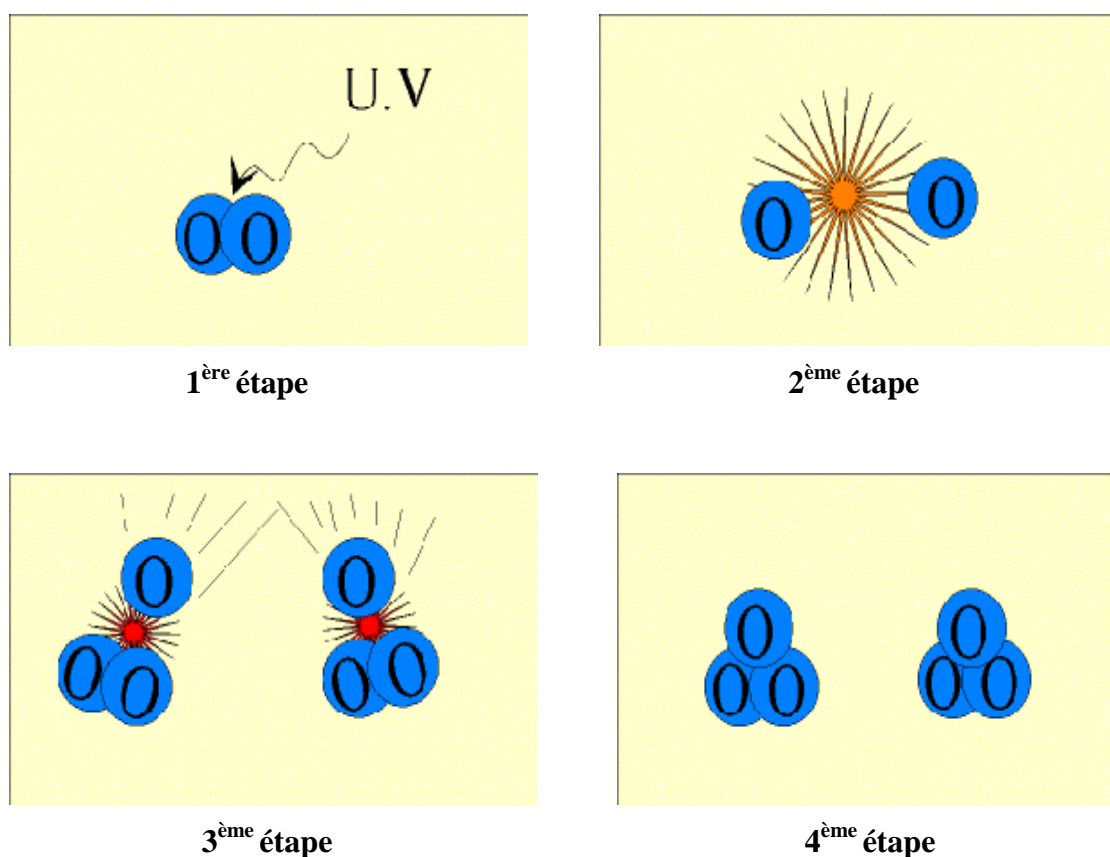


Figure 2. 8 : Étapes de formation de l'ozone par UV [30].

2. 7. 2. Formation artificielle

L'obtention de l'ozone peut-être réalisée par des procédés physico-chimique, à savoir [38]:

- ✿ Par des lampes ultra-violettes. Ce système est utilisé pour les applications qui demandent une basse concentration d'ozone.
- ✿ Par décharges électriques silencieuses (décharge DBD). Ce système est utilisé pour de fortes concentrations d'ozone.

2. 7. 2. 1. Lampes Ultra-violettes

Le système UV désinfecte par l'inactivation des micro-organismes pathogènes comme les virus, bactéries et parasites qui sont présents dans l'eau et causent de nombreuses maladies. Dans le vaste spectre lumineux, il a été prouvé que les UV-C de longueur d'ondes comprises

entre **200** et **280 nm** (figure 2. 9) sont les plus efficaces longueurs d'onde pour inactiver les micro-organismes en endommageant les acides nucléiques (ADN ou ARN), qui à son tour, l'organisme a la capacité de les reproduire. L'efficacité germicide d'un système UV dépend de diverses propriétés des eaux telles que la transmission UV, en taux et en dose appliquée des UV, qui est une fonction de l'intensité UV délivrée par les lampes et la durée d'exposition dans le réacteur [43-45].

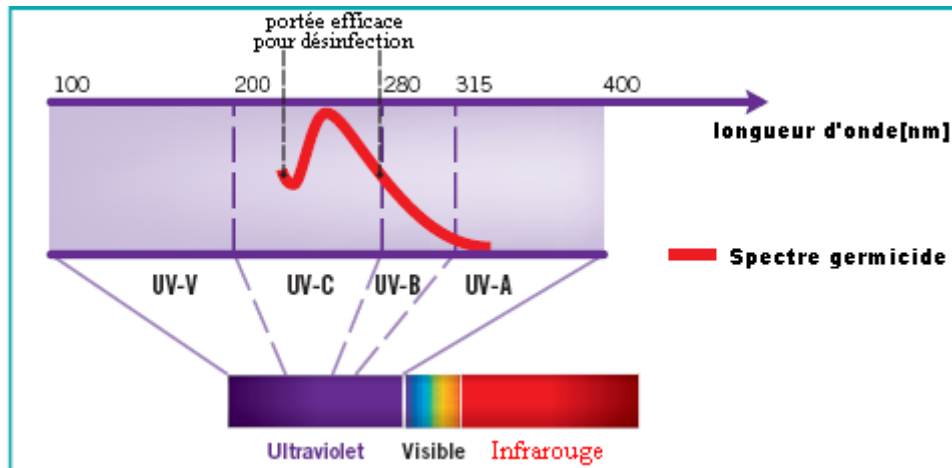


Figure 2. 9 : Spectre germicide des lampes UV [44].

Comment ça marche?

La lumière UV-C est créée par une lampe (figure 2. 10) contenant un gaz inerte et du mercure. L'énergie électrique est appliquée aux électrodes au sein de cette lampe qui crée un arc électrique à travers la vapeur métallique pour générer le rayonnement UV.

Deux principales technologies de lampes UV sont disponibles pour la désinfection de l'eau :

- ➡ Lampes à basse pression ont la capacité de créer un rayonnement monochromatique à **254 nm**, à proximité du pic germicide (**264 nm**).
- ➡ Lampes à moyenne pression créent un large spectre de longueurs d'ondes UV de **200 à 300 nm**.

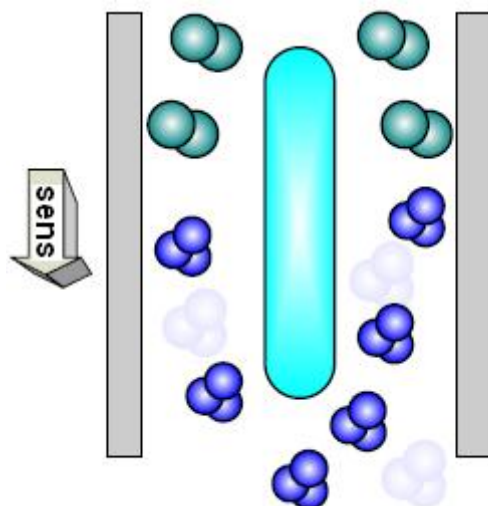


Figure 2. 10 : Lampe Ultra-violette [29].

2. 7. 2. 2. Décharge à barrière diélectrique

L'ozone est produit sur une échelle commerciale par le biais de décharge électrique silencieuse dans des générateurs tubulaires [44]. Cette production est due à un générateur d'ozone, qui est essentiellement composée de deux électrodes conductrices maintenues en regard l'une de l'autre. L'air ou l'oxygène est comprimé, puis séché, et passe entre ces deux électrodes où il est soumis à un effluve électrique dans un champ de courant alternatif à une haute tension (figure 2. 11). Une partie de l'oxygène se transforme en ozone [45].

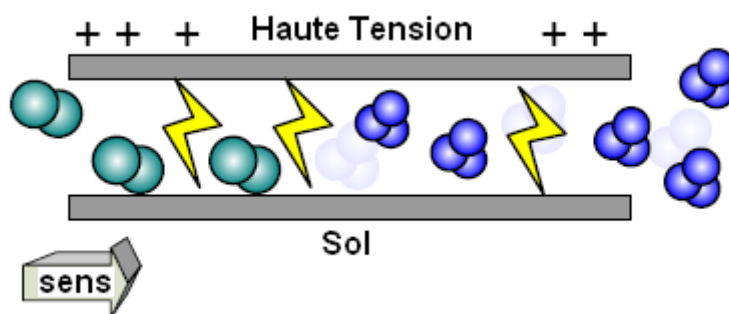


Figure 2. 11 : Cellule de la génération d'ozone par décharge DBD [29].

L'ozone se forme en scindant la molécule d'oxygène (O₂) en deux atomes d'oxygène (O₁). Ces 2 atomes d'oxygène instables combinent avec d'autres molécules d'oxygène pour former l'ozone (figure 2. 7).

2.8. Comment l'ozone agit-il ?

2.8.1. Réaction de l'ozone avec les substances oxydables

L'ozone agit de la manière suivante (figure 2. 12) [46]:

- ❶. La molécule d'oxygène comprend 2 atomes d'oxygène (O_2).
- ❷. Le haut voltage casse ces 2 atomes en 2 atomes d'oxygène (O_1).
- ❸. Les atomes d'oxygènes libres (O_1) s'unissent aux molécules d'oxygène (O_2).
- ❹. Le résultat est une nouvelle molécule avec 3 atomes d'oxygène : Ozone (O_3).
- ❺. La combinaison des 3 atomes d'oxygène forme l'ozone, molécule instable au contact des substances oxydables et cette combinaison libère de l'oxygène libre.
- ❻. Le résultat de cette réaction entre l'oxygène et les substances oxydables permet aux molécules organiques d'être transformées.

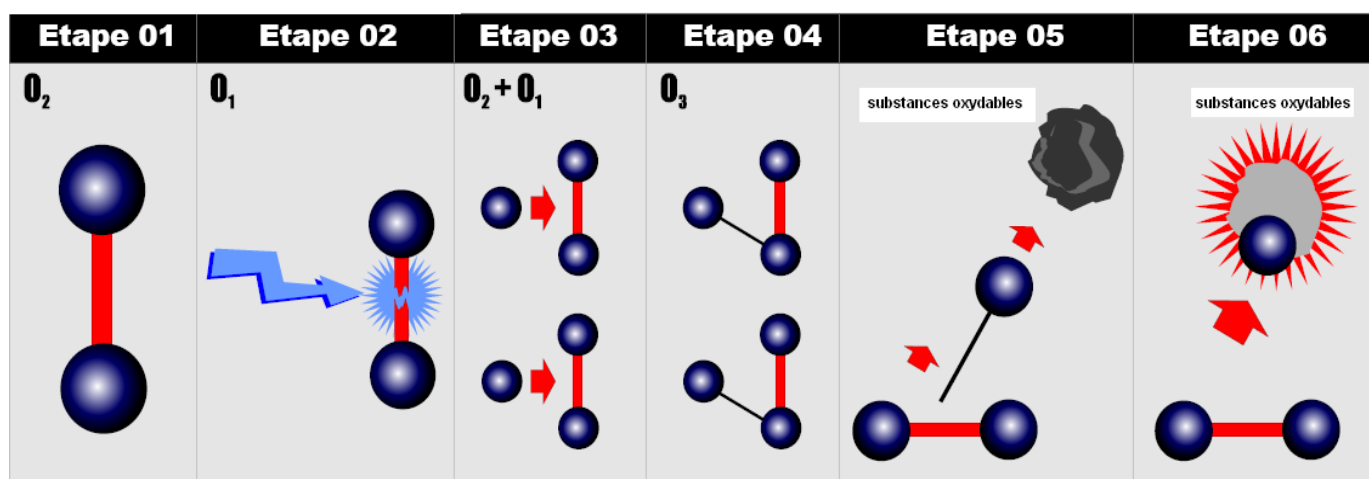


Figure 2. 12 : Comment agit l'ozone ? [46].

Le faible lien de l'ozone tenu du troisième atome d'oxygène fait que la molécule soit instable et donc, très efficace comme le montre la figure 2. 13. C'est le troisième atome d'oxygène de l'ozone qui est extrêmement réactif. Cet atome se fixe facilement à d'autres molécules.

La réaction d'oxydation se produit sur une collision entre la molécule d'ozone et la molécule d'une substance oxydable (c'est-à-dire bactéries, champignons, virus, fer & manganèse...). Au cours de cette réaction d'oxydation, les molécules organiques sont transformées et dissoutes (figure 2. 14).

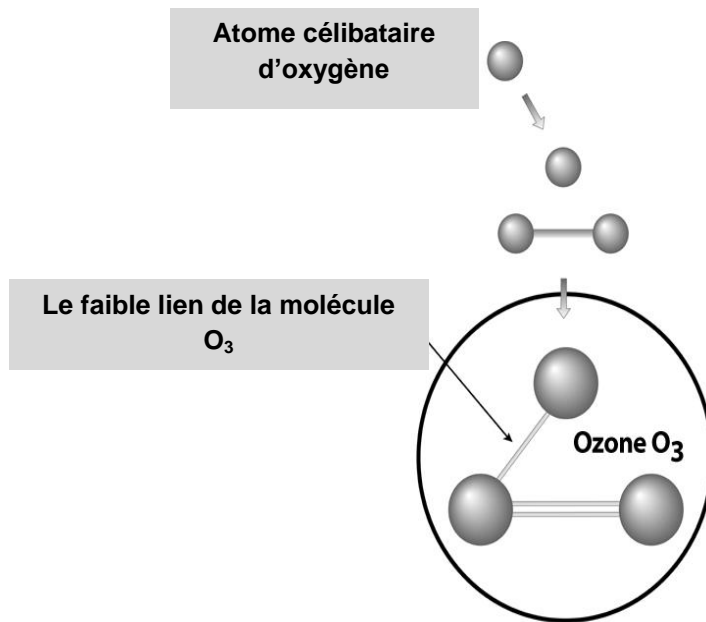


Figure 2. 13 : Lien de la molécule d'ozone [42].

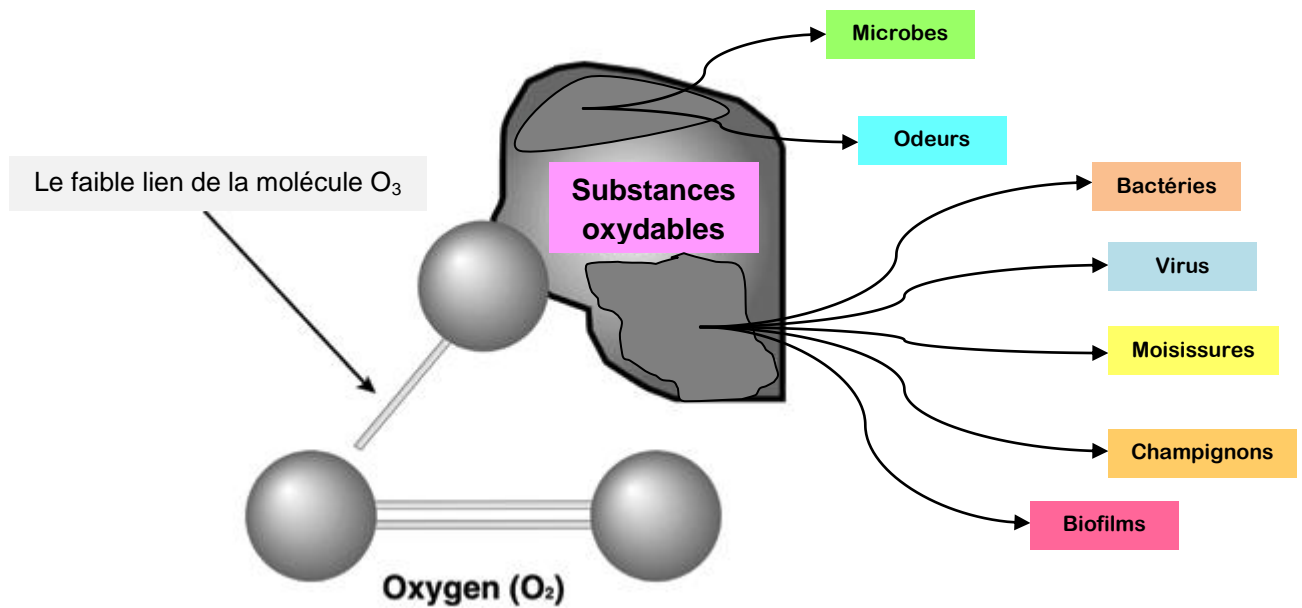


Figure 2. 14 : Réaction d'oxydation de l'ozone avec les substances oxydables [42].

2.8.2. Effet de l'ozone sur les bactéries

L'ozone agit de la manière suivante, en contact avec une bactérie comme le montre la figure 2. 15 [29]:

1. Une cellule saine bactérienne (figure 2. 15 (1)).
2. Zoom sur une molécule d'ozone qui entre en contact avec la paroi cellulaire. Cette dernière est vitale pour les bactéries car elle garantit le maintien de la forme de l'organisme de la bactérie (figure 2. 15 (2)).
3. La molécule d'ozone étant en contact avec la paroi cellulaire, une réaction appelée "burst oxydative" se produit et crée littéralement un petit trou dans la paroi cellulaire.
4. Un trou nouvellement créé dans la paroi cellulaire de la bactérie a brisé, à son tour, la paroi.
5. La bactérie commence à perdre sa forme en même temps que la molécule d'ozone continue de créer d'autres trous dans la paroi cellulaire.
6. Après des milliers de collisions ozone-paroi cellulaire et au bout de quelques secondes, la paroi bactérienne ne peut plus maintenir sa forme et la cellule meurt.

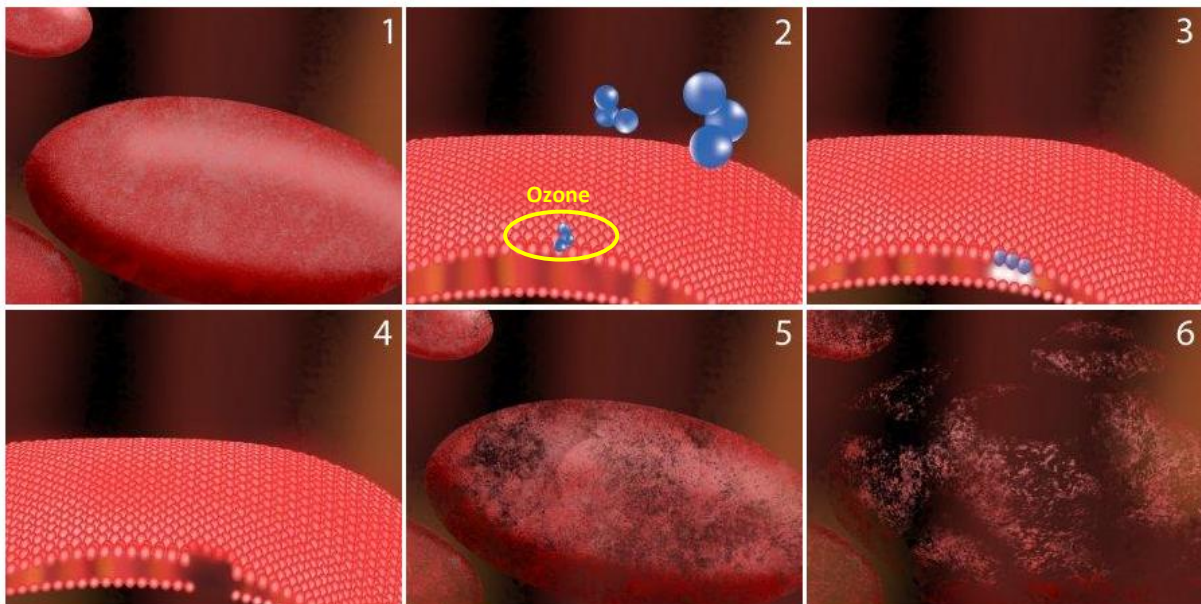


Figure 2. 15 : Effet de l'ozone sur une bactérie [29].

2.8.3. Principe

L'ozone réalise son action destructrice de trois manières [38]:

- ✘ Action oxydante dans laquelle intervient un seul atome d'oxygène (potentiel d'oxydation $E_0 = 1,5 \text{ V}$)
- ✘ Par ozonolyse, avec formation d'ozonures (HO_3). Dans ce cas, c'est la molécule entière d'ozone qui intervient sur les substances organiques. Ces ozonures sont très

instables et sont détruits en des composés différents à celui de la molécule organique qui est intervenue dans sa formation.

- ✘ En catalysant l'effet oxydant de l'oxygène qui n'est pas intervenu dans la formation d'ozone. Dans ce cas, l'oxygène joue le rôle le plus important.

2.9. Puissant oxydant et excellent désinfectant

L'ozone est un composé naturel qui a des propriétés d'oxydation très puissantes. Il oxyde et inactive toutes les substances organiques, les pesticides et les organismes pathogènes (virus, bactéries, protozoaires, etc.). De même, il va oxyder des éléments physico-chimiques désagréables qui laissent des traces tels que le fer, le manganèse, le soufre (odeur d'œuf pourri), les arrière goûts qui peuvent être causés par des algues, champignons et moisissures, certains types de tannins qui donnent une couleur ressemblant à celle du thé.

Contrairement aux autres désinfectants, tel le chlore, l'ozone disparaît sans laisser de trace après son utilisation. En effet, l'ozone est composé d'oxygène pur qui se recompose en dioxygène quelques temps après sa fabrication.

Dans le domaine de l'eau potable, la purification de l'eau par l'ozone est un procédé qui représente un avantage en particulier, dans le contexte environnemental actuel qui soutient le développement et fait la promotion de technologies non-polluantes ; il permet d'abaisser et même d'éliminer complètement les "trihalométhanes". Il s'agit d'un sous-produit de la chloration de l'eau. En effet, lorsque le chlore est ajouté à l'eau brute pour éliminer les bactéries, il arrive qu'il y ait réaction avec les micro-organismes présents dans l'eau pour produire différents sous-produits, dont les THM "trihalométhanes".

Et que dire dans le domaine des piscines qui sont fréquentées par de nombreuses personnes à travers le monde, pour y nager ou pour s'y délasser. Cependant, l'atmosphère chlorée des piscines pourrait être responsable de problèmes de santé. En effet, la majorité des piscines sont désinfectées par des produits à base de chlore menant à la formation de dérivés potentiellement toxiques. Des études ont récemment attiré l'attention sur les risques pour la santé liés à la fréquentation des piscines. Il a entre autres été suggéré que l'exposition croissante et plus précoce des enfants aux produits de chloration des piscines pourrait, en association avec d'autres facteurs, être impliquée dans l'incidence croissante de l'asthme et des allergies. La croyance que l'environnement d'une piscine ne présente pas de risques pour la santé de ceux qui la fréquentent est profondément ancrée dans les esprits et le manque de

considération à l'égard du problème potentiel de toxicité de ces produits issus de la chloration de l'eau est reflétée par les règlements de la plupart des pays, axés sur la qualité micro biologique de l'eau des piscines, ignorant en grande partie la qualité de l'air.

2.9. 1. Action microbicide

C'est peut être la propriété la plus importante de l'ozone et celle dont on a le plus attribué d'applications [47-48]. Comme chacun sait, le concept de microbe est très ample. Tout d'abord, le microbe est toute forme de vie qui ne peut pas être vue par l'œil humain et qui nécessite l'emploi du microscope pour être observé. Ces êtres vivants restent souvent sur toute superficie, en tout fluide, ou bien ils flottent dans l'air comme de petites poussières, minuscules gouttes d'eau en suspension de tout genre de maladies contagieuses, spécialement dans des endroits renfermés où se trouve un grand nombre de personnes, et où l'air se renouvelle très lentement. Le contrôle de certains de ces microorganismes, appelés pathogènes par leur capacité de créer des maladies contagieuses, a été une grande préoccupation de l'homme depuis qu'ils ont été découverts. Des centaines de méthodes et de substances chimiques ont été élaborés et utilisés pour ce but, en donnant des résultats en plus grande ou plus petite partie positifs et en essayant de diminuer la quantité de ces pathogènes, en des termes tels la désinfection, l'hygiène, l'asepsie, l'antisepsie. L'ozone peut être considéré comme un des agents microbicides des plus rapides et efficaces qu'il existe par ses propriétés oxydantes. Son action possède un large spectre qui englobe l'élimination de:

2.9.1.1. Bactéries (effet bactéricide)

Il est bien connu depuis le début du siècle, lorsque l'on a commencé à l'utiliser pour le traitement d'eau. Actuellement, nous l'utilisons autant pour le traitement de tout genre d'eau que pour traiter l'air de l'environnement voire de façon directe sur l'organisme humain avec des buts thérapeutiques. Un des plus grands avantages de l'ozone, par rapport à d'autres bactéricides, est que cet effet se manifeste à de petites concentrations (de l'ordre de 0,01 p.p.m ou moins) et pendant des périodes d'exposition très courtes, voire des infimes concentrations d'ozone (de l'ordre de 0,01 p.p.m) où l'on peut déjà remarquer un effet bactériostatique. La différence entre un effet bactéricide et un effet bactériostatique est simple: Un agent bactéricide est celui qui est capable d'éliminer les bactéries. Néanmoins un agent

bactériostatique n'arrive pas à les tuer mais il les empêche de se reproduire en freinant rapidement la croissance de leurs populations. Bien qu'il s'agisse théoriquement de deux effets très différents, en réalité, une population de bactéries sans la capacité de se reproduire ou avec une capacité diminuée pour cette reproduction, est une population condamnée à disparaître. De fait, des agents antimicrobiens aussi importants que certains antibiotiques fondent leur pouvoir sur une action bactériostatique [47].

2.9.1.2. Virus (effet virulicide)

Les virus sont de petites particules, considérées de nos jours comme une frontière entre les êtres humains et la matière inerte, qui ne sont pas capables de vivre ni de se reproduire si ce n'est en parasitant des cellules et en les détruisant. Contrairement aux bactéries, les virus sont toujours nocifs et provoquent des maladies à tout l'organisme qu'ils attaquent. Des maladies aussi courantes comme la grippe, le catarrhe, la rougeole, la variole, la varicelle, la rubéole, la poliomyélite, et beaucoup d'autres sont dues à des virus.

L'ozone agit sur elles en oxydant les protéines de leur enveloppe et en modifiant leur structure tridimensionnelle. Lorsque ceci a lieu, le virus ne peut se rattacher à aucune cellule qui puisse l'accepter car il ne reconnaît pas son point de rattachement, et lorsque le virus non protégé est incapable de se reproduire, il finit par mourir. L'action virucide peut être observée à des concentrations d'ozone inférieures à celle de l'action bactéricide. C'est dû à ce que la complexité de l'enveloppe virale est inférieure à celle de la paroi bactérienne [47].

2.9.1.3. Champignons (effet fongicide)

Il existe certains genres de champignons qui ont le pouvoir de provoquer des maladies à l'être humain. Beaucoup d'autres sont capables de provoquer des altérations en nos aliments, de façon à ce qu'ils soient inacceptables pour notre ingestion, comme c'est le cas entre autres des moisissures. Il en résulte qu'il est intéressant de contrôler et d'éliminer ces formes pathogéniques, dont les spores polluent en tout environnement. L'ozone nous offre la possibilité de les éliminer grâce à son action oxydante qui provoque un dommage cellulaire irréversible [47].

2.9.1.4. Spores (effet sporicide)

Il existe certains champignons et certaines bactéries qui créent une épaisse enveloppe autour d'eux lorsque les conditions sont adverses à leur développement. Leur activité métabolique est paralysée et ils restent en état d'éveil. Lorsque les conditions de survie sont de nouveau favorables, elles retournent à leur forme normale et leur métabolisme récupère son activité. Ces formes de résistance sont connues comme les spores et sont typiques des bactéries pathogènes comme le tétanos, la gangrène, la gazeuse, le botulisme et l'anthrax. Ce genre de mécanisme de résistance les rend difficile à combattre et des traitements aussi utiles en d'autres cas comme les hautes températures et la multitude d'antimicrobiens deviennent inefficaces. L'ozone a le pouvoir d'éliminer la résistance des spores à des concentrations légèrement supérieures à celles que l'on utilise pour les autres bactéries [47].

2.9. 2. Action désodorisante

L'action désodorisante de l'ozone n'est pas due à un simple effet de camouflage de l'odeur, mais il s'agit bien d'une véritable destruction chimique de celle-ci [48].

WITHERIDGE & YAGLOU, en 1939, manifestaient que " l'odeur se dégageant de 95 personnes, dans sa majorité des adultes, réunies dans une petite pièce, était neutralisée par 0,15 ppm d'ozone, ce qui permettait une diminution de 50% de l'introduction d'air extérieur".

BISBINI, en 1964, affirmait que " l'ozone agit aussi comme un désodorisant pour de faibles concentrations (0,1 – 0,5 mg/m³) et son action est particulièrement appréciable dans la neutralisation des odeurs dues à des substances organiques".

SAVAZZINI, en 1930, dit : " Une installation ozonisée fonctionnant dans une écurie, en plus de la rendre sans odeur, facilite un excellent état de santé aux bêtes".

HAINES, en 1939, affirme : " La fonction principale de l'ozone est la désodorisation".

DEROBERT, en 1954, dit que : " L'ozone est utilisé comme un désodorisant efficace dans l'industrie fromagère, hôpitaux, usines de cuirs".

L'ozone, en somme, du fait de son grand pouvoir oxydant, détruit toutes sortes d'odeurs désagréables, son action la plus importante est vis-à-vis des odeurs de provenance organique.

2.10. Avantages et désavantages de l'ozone

L'ozone est un produit chimique utile en raison de sa capacité d'oxyder et de stériliser. Il a, cependant, des caractéristiques qui le rendent inapproprié pour certaines applications. Voici une liste des avantages et des inconvénients de l'ozone [49-51].

2.10. 1. Désavantages

- ✚ Investissement plus élevé : l'expression *usine à gaz* est certainement appropriée dans le cas de l'ozonisation, puisque ce gaz est produit sur place : il en résulte que le coût d'exploitation est réduit par rapport à des systèmes où l'on doit acheter le désinfectant, par contre l'installation est inévitablement plus coûteuse.
- ✚ Système plus complexe : l'ozone doit être produit, puis dissous dans l'eau, le gaz résiduel doit être extrait de l'eau, etc. le système résultant est inévitablement plus complexe à installer et à utiliser qu'une pompe à injection de chlore, par exemple.
- ✚ Il n'y a pas de membranes résistantes à l'ozone : cela pose un problème à certaines industries particulières, comme l'agro-alimentaire, qui veulent en général désinfecter l'ensemble de la chaîne de traitement : si un osmoseur est prévu, cela est possible avec le chlore en choisissant une membrane en acétate de cellulose par exemple, alors que c'est effectivement impossible avec l'ozone.
- ✚ Consommation en énergie plus élevée, puisque l'ozone est produit par décharge électrique.

2.10 2. Avantages

Ces désavantages sont compensés par une série d'avantages qui rendent l'ozone très intéressant dans nombre d'applications industrielles :

- En comparaison, l'efficacité de la désinfection de l'ozone est **2500** fois plus efficace que l'hypochlorite (**CHL**) et **5000** fois plus que les Chloramines (**NH₂CL**), il détruit les bactéries, les virus, et les moisissures.
- L'ozone ne laisse pas de résidus chimiques ni d'odeurs dans l'eau.
- L'ozone ne brûle pas les yeux, ne les rougit pas comme les autres produits chimiques ont tendance à le faire.

- L'ozone n'irrite pas la peau et ne la dessèche pas.
- L'ozone est sécurisant car il ne peut exploser et n'est pas combustible.
- L'utilisation de l'ozone limite au maximum l'achat des produits chimiques oxydants.
- Quand le système est installé, il fait un apport constant d'ozone dans l'eau.
- Parce que l'ozone réagit très vite, il est possible que certaines substances persistent.
L'utilisation de chlore ou de brome avec l'ozonateur réduit cette possibilité.
- Pas de dérivés dangereux, contrairement au chlore.
- Ne reste pas dans l'eau, redevient de l'oxygène : il est donc utilisable par exemple pour le traitement d'eau ultra-pure, ce qui n'est pas le cas du chlore.
- Pas de stockage de produits dangereux.
- Oxydation très complète.
- Se décompose ou s'enlève facilement.

2.11. Applications de l'ozone

Outre le "bon" et le "mauvais" ozone, il existe aussi l'ozone "technique", généré par l'homme, volontairement, dans des endroits bien précis, pour être utilisé pour ses propriétés oxydantes. Il est risqué de faire une liste complète des applications qu'à l'ozone car, jour après jour, sont trouvés de nouveaux domaines où son utilisation résout des problèmes que les différentes industries se posaient depuis des années.

Les applications de l'ozone sont multiples, citons [29] [38] [49] [52-55]:

① Eaux résiduaires :

- Domestiques / Municipales
- Pâte et papier
- Mines
- Pharmaceutique
- Cuir
- Pétrole / pétrochimique
- Électro-plaquage
- Précipitation des métaux lourds.

② Industrie / Agriculture :

- Tours de refroidissement
- Eau d'échange de chaleur
- Eau de refroidissement
- Eau potable
- Recyclage des liquides de découpage
- Désinfection de grange (air, eau)
- Hydroponique
- Effluents d'animaux
- Traitement "water dripping"

③ Industrie agro-alimentaire :

- Tours de stockage de grains
- Eau embouteillée
- Entrepôts de fruits et légumes
- Entreposage de viandes
- Lavage d'œufs
- Désinfection des abattoirs
- Hydroponique
- Lavage de fruits et légumes
- Stérilisation des contenus bière/vin

④ Autres :

- Odeurs
- Semi-conducteurs
- Buanderies
- Aquaculture
- Blanchissement
- Recyclage de caoutchouc
- Désulfuration
- Stérilisation médicale
- Stérilisation d'hôpitaux
- Traitement thérapeutique

2.12. Conclusion

L'ozone est une solution miraculeuse pour tous les pays en voie de développement, lesquels manquent de la manutention chimique adéquate, de l'infrastructure de transport et des usines de production. L'ozone exige seulement l'électricité qui est aisément fournie par des générateurs hydrauliques, solaires, éoliens ou à l'essence. Pour les pays développés, O_3 permettra la décentralisation des services ce qui amènera une plus grande flexibilité et une meilleure gestion de coût.

Ce composé naturel est artificiellement produit par l'action des décharges à haute tension haute fréquence. Plus la fréquence de ces décharges est élevée, plus la concentration d'ozone produit sera élevée. Dans le chapitre suivant, l'attention sera concentrée sur la réalisation d'une alimentation HT à haute fréquence qui n'est qu'une partie du système d'ozonisation.

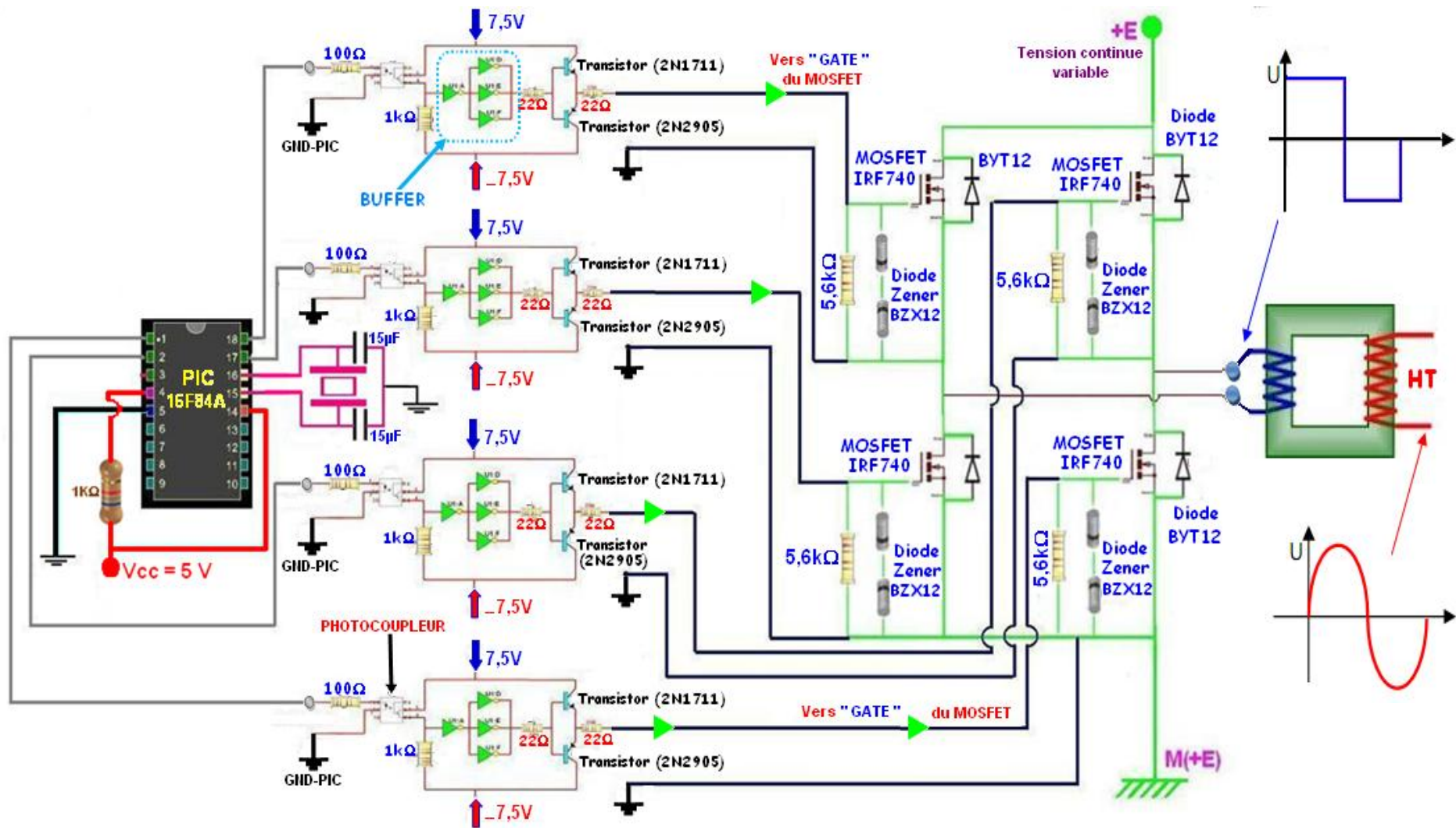


Figure 3. 11 : Circuit électrique de l'alimentation haute tension à haute fréquence destinée à la DBD.

3. 1. Introduction

Les alimentations électriques sont étudiées dans les laboratoires d'électronique et de génie électrique afin de caractériser leur comportement électrique et de réaliser leur conception. Lorsqu'on connecte un dispositif de décharge à une alimentation électrique, ce sont donc deux mondes, qui n'ont pas les mêmes habitudes, les mêmes échelles de temps ni les mêmes préoccupations qui se rencontrent. Ce n'est pas la première fois que des études sont menées sur les décharges électriques et leur alimentations, mais il ya toujours une certaine méconnaissance du comportement électrique des plasmas par les électroniciens de puissance qui traitent et contrôlent l'énergie électrique ainsi que sa conversion en d'autres formes d'énergie afin de fournir des tensions et des courants aux différents types de charges selon les applications.

Le principe de l'alimentation proposée associe une interface de puissance et un convertisseur statique. Une possibilité pour construire le convertisseur a été développée : elle est inspirée d'un onduleur monophasé en pont.

3. 2. Généralités sur les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension (ou le courant) et/ou la fréquence de l'onde électrique. Le fonctionnement des convertisseurs statiques de puissance est basé sur la commutation du courant entre des mailles adjacentes de circuit électrique. Ces commutations de courant sont réalisées grâce à des interrupteurs de puissance à semi-conducteurs (d'où le nom de statique) et qui permettent par une séquence convenable de fermeture et d'ouverture de maîtriser le transfert d'énergie entre des sources d'entrées et de sortie éventuellement réversibles [57-58].

On différencie quatre types de convertisseurs (figure 3. 1) :

1. Convertisseurs **alternatif-continu** : ce sont des redresseurs (ou convertisseurs de courant).
2. Convertisseurs **alternatif** ($V_{1\text{eff}}$, f_1)-**alternatif** ($V_{2\text{eff}}$, f_2): ce sont des gradateurs (ou variateurs de courant alternatif) lorsque $f_1=f_2$; sinon ce sont des cycloconvertisseurs (ou convertisseurs de fréquence).
3. Convertisseurs **continu** (U_1)-**continu** (U_2) : ce sont les hacheurs (ou variateurs de courant continu).

4. Convertisseurs **continu-alternatif** : ce sont des onduleurs de tension ou onduleurs de courant (appelé aussi commutateur de courant).

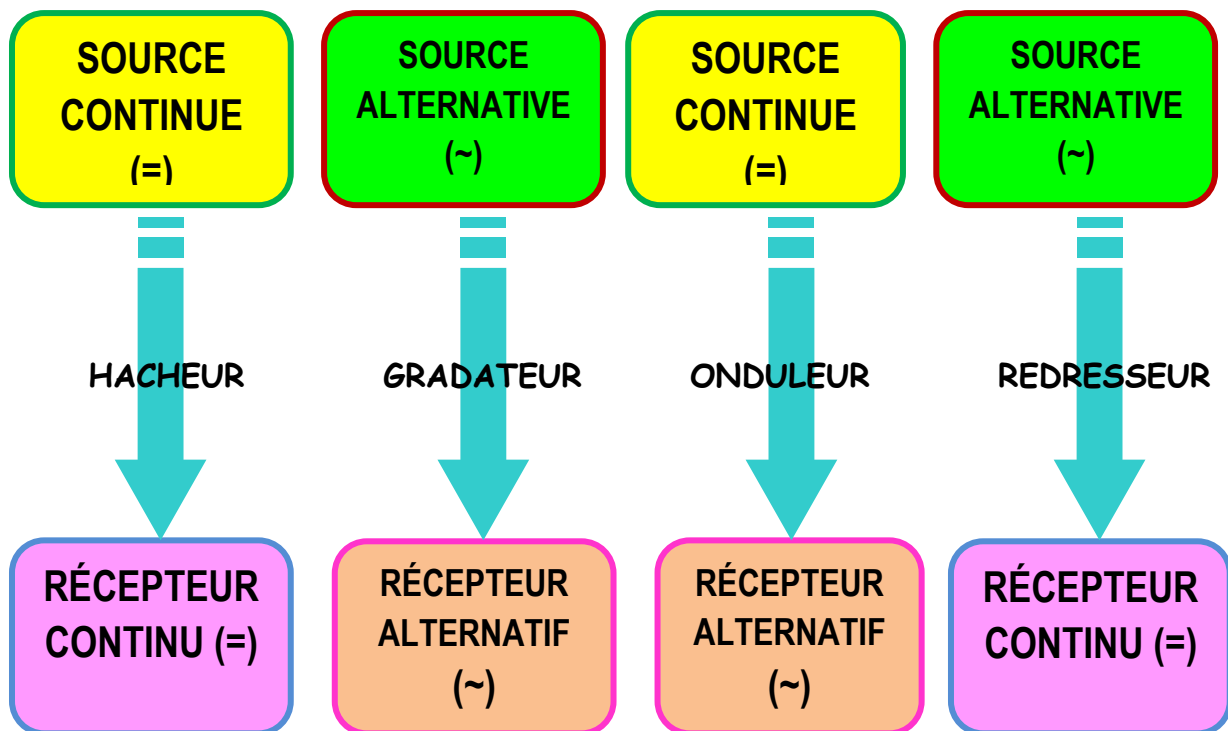


Figure 3. 1 : Famille des convertisseurs statiques.

Notre intérêt est porté sur les convertisseurs statiques **continu-alternatif** dont la fréquence de sortie peut être constante ou réglable suivant les types de structures. L’ondeur de tension est l’un des structures le mieux adapté à des développements au niveau de la commande qui se charge elle-même de fournir à la charge le niveau de tension souhaitée.

3. 3. Généralités et principes de fonctionnement des onduleurs

3. 3. 1. Généralités

L’ondeur étant un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue (figure 3. 2), est utilisé, en électrotechnique pour [59-61] :

- ✗ Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitude variables.

Ex : c’est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

✗ Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et amplitude fixes.

Ex : c'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour créer la forme de tension et fréquence du réseau.

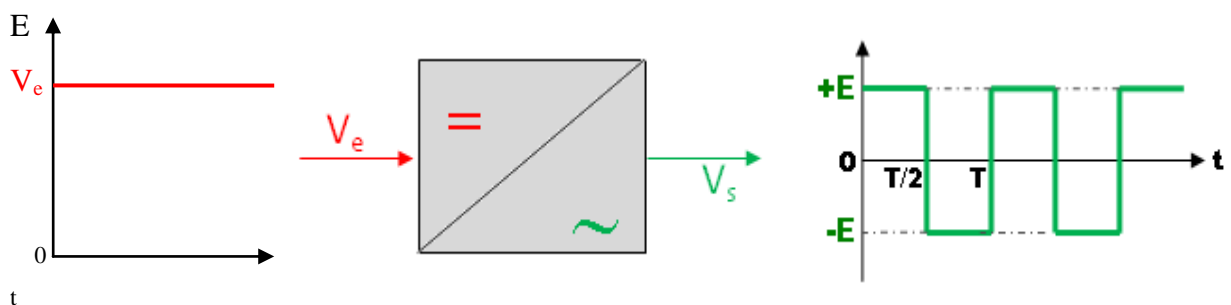
On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques watts à plusieurs MW). L'onduleur de tension est alimenté par un générateur continu du type source de tension :

✚ Idéalement, la tension à son entrée a une valeur constante U qui est indépendante du courant i que l'onduleur absorbe. En pratique, le caractère de " source de tension " du générateur d'entrée de l'onduleur est obtenu en plaçant en parallèle avec les bornes de cette source un condensateur, C , de forte valeur.

✚ Idéalement, le courant absorbé par le récepteur est :

- Un courant sinusoïdal si le récepteur est monophasé ;
- Un système triphasé équilibré de courants sinusoïdaux si le récepteur est triphasé.

✚ En pratique, le caractère de source de courant du récepteur découle de la présence d'inductances série à ses bornes d'accès.



V_e : tension continue fixe

V_s : tension alternative de fréquence $f=1/T$ réglable.

Figure 3. 2 : Schéma symbolique de l'onduleur [60].

3. 3. 2. Structure initiale de l'onduleur en pont

Les parties puissances des onduleurs de tension sont équipées d'éléments semi-conducteurs commandables à l'amorçage et au blocage (transistors, MOSFET, IGBT, GTO,

etc.). Dans les onduleurs en pont, chaque borne du récepteur est reliée à la source de tension continue par deux interrupteurs à semi-conducteurs bidirectionnels en courant : l'un permet de la relier à la borne plus (+) de cette source, l'autre à la borne moins (-) de la source. Ces deux interrupteurs forment un bras de l'onduleur. Un onduleur monophasé en pont comporte deux bras tandis qu'un onduleur triphasé en pont a trois bras (figure 3. 3).

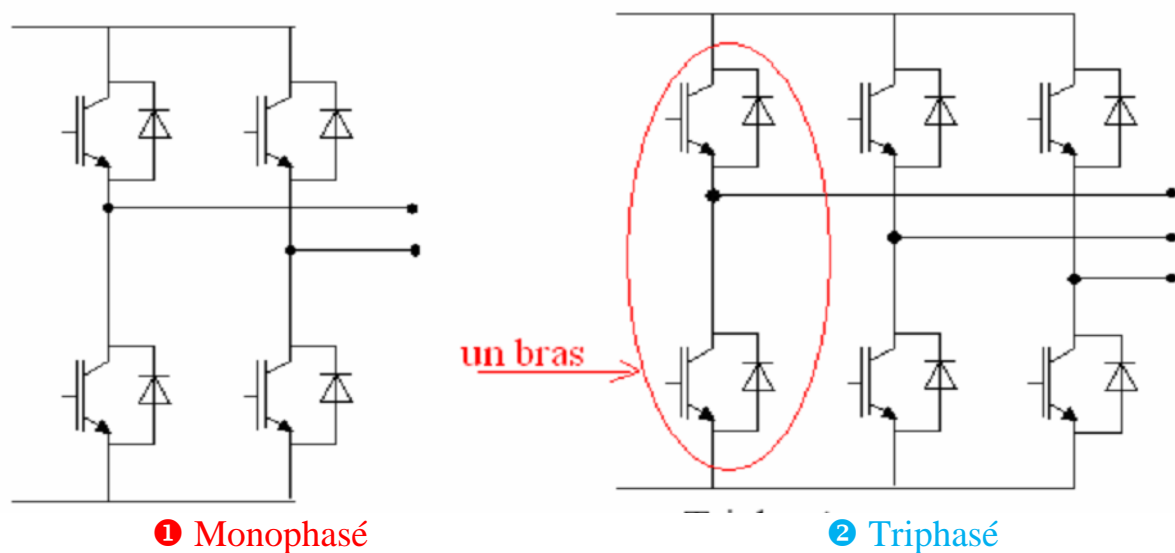


Figure 3. 3 : Schéma de l'onduleur en pont [60].

3. 3. 3. Principe de fonctionnement de l'onduleur

Pour réaliser un onduleur, il faut travailler en commutation, en approchant la forme sinusoïdale par des signaux rectangulaires dont on ajuste le rapport cyclique.

L'onduleur monophasé est constitué de 8 commutateurs de courants placés en pont (figure 3. 4) [62]:

- 4 interrupteurs à amorçage-blocage commandé à une période T , fonctionnant en simultané sur chaque diagonale du pont, mais par alternance de demi-période.
- 4 diodes de récupération si la charge peut rendre l'énergie électrique lorsqu'elle n'est plus alimentée.

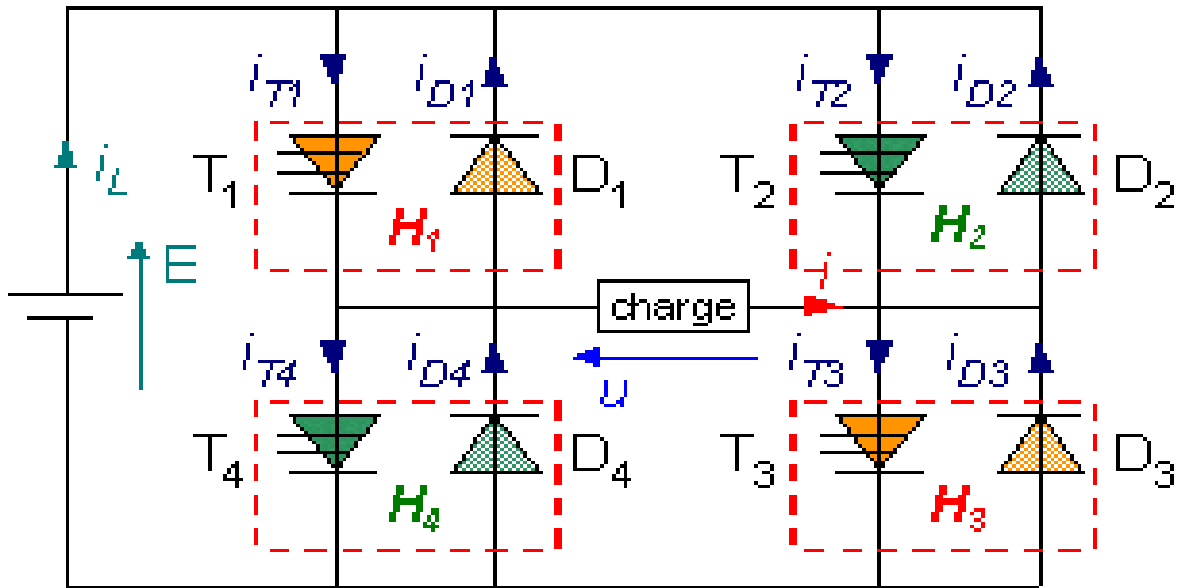


Figure 3. 4 : Fonctionnement de l'onduleur [62].

3. 3. 3. 1. Étude des séquences de conduction

L'étude porte essentiellement sur la circulation du courant. Le signe de u la tension aux bornes de la charge, ainsi que le sens de parcours de i , l'intensité du courant, indiquent de façon formelle les composants passants et non passants. Une fois ces éléments déterminés, il est indispensable de vérifier que les signes de u et i soient respectés en représentant le modèle équivalent qui convient, un interrupteur ouvert est symbolisé par un circuit ouvert, un interrupteur fermé par un fil.

Les interrupteurs commandés périodiquement et deux par deux passent de l'état bloqué à l'état passant aux instants t_1 et $(t_1 + T/2)$ où T est une période constante. Pendant la première demi-période ($0 \leq t < T/2$), la commande impose T_1 et T_3 fermé, T_2 et T_4 ouvert. Pendant la deuxième demi-période ($T/2 \leq t < T$), la commande impose T_1 et T_3 ouvert, T_2 et T_4 fermé.

Quatre phases sont présentées et se déroulent ainsi [62] :

Phase ① ($t_1 < t < T/2$) : La phase d'alimentation fait intervenir deux interrupteurs T_1 et T_3 . Nous commençons notre étude par cette séquence de conduction, elle est évidente, en effet l'intensité du courant est positive ainsi que la tension aux bornes de la charge. Les interrupteurs T_1 et T_3 sont fermés ce qui implique T_2 et T_4 ouverts. La circulation électrique

ne peut se faire que par l'interrupteur T_1 et T_3 . Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant (figure 3. 5).

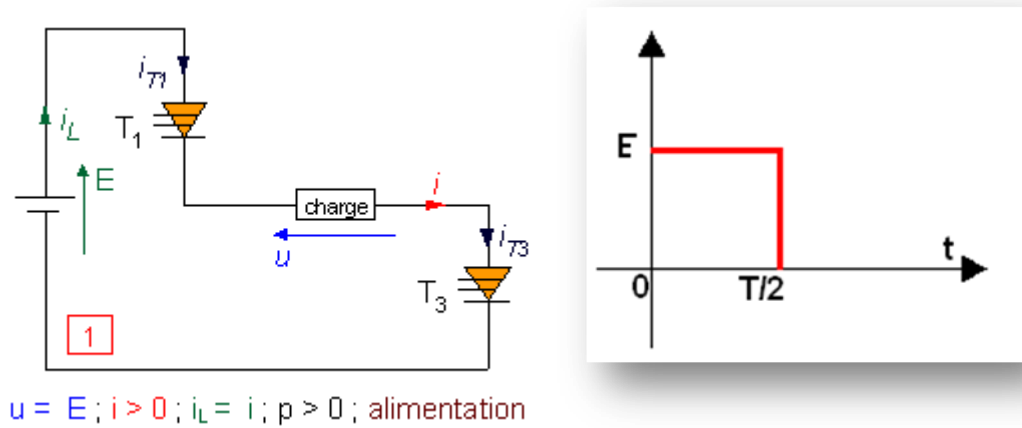
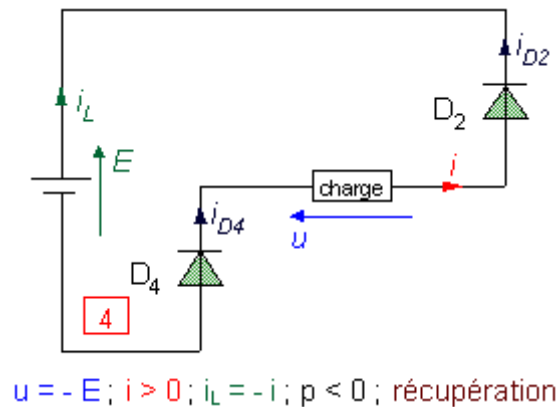


Figure 3. 5 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1^{er} demi-cycle.

Phase ② ($T/2 < t < t_2$) : la phase de **récupération** fait intervenir deux diodes D_2 et D_4 .

La tension aux bornes de la charge est négative, les interrupteurs T_2 et T_4 sont fermés ce qui implique T_1 et T_3 ouverts. L'intensité du courant est toujours positive, en examinant le schéma, nous constatons qu'il ne peut circuler que dans les diodes D_2 et D_4 .



Phase ③ ($t_2 < t < T$) : La phase **d'alimentation** fait intervenir deux interrupteurs T_2 et T_4 .

Cette séquence de conduction est évidente, en effet l'intensité du courant est négative ainsi que la tension aux bornes de la charge. Les interrupteurs T_2 et T_4 sont fermés ce qui implique T_1 et T_3 ouverts. La circulation électrique ne peut se faire que par les interrupteurs T_2 et T_4 . Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant (figure 3. 6) :

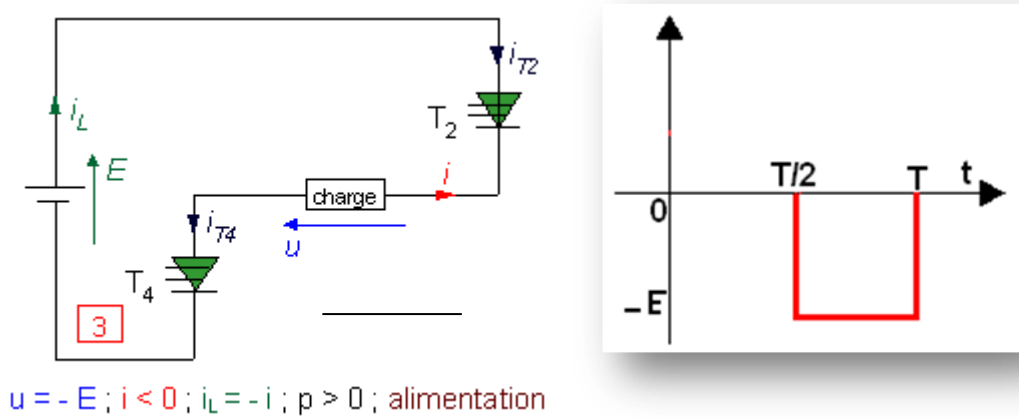
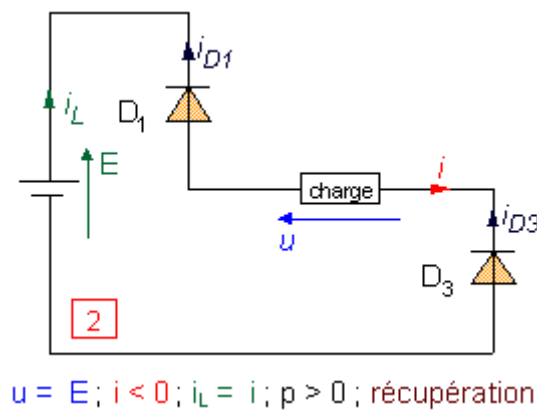


Figure 3. 6 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2^{ème} demi-cycle.

Phase ④ ($0 < t < t_1$) : La phase **de récupération** fait intervenir deux diodes **D₁** et **D₃**.

La tension aux bornes de la charge est positive, Les interrupteurs **T₁** et **T₃** sont fermés ce qui implique **T₂** et **T₄** ouverts. L'intensité du courant est toujours négative, en examinant le schéma, nous constatons qu'il ne peut circuler que dans les diodes **D₁** et **D₃**.



Le signal résultant sur une période complète est représenté par la [figure 3. 7](#). l'allure de la tension est symétrique dont la valeur moyenne est nulle.

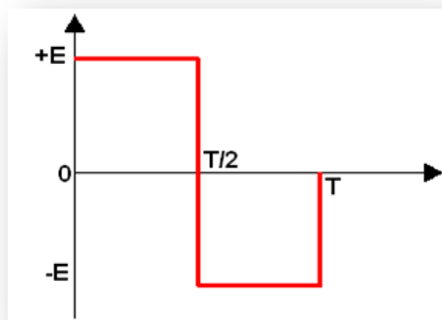


Figure 3. 7 : Signal complet de l'onduleur.

3. 3. 3. 2. Étude du fonctionnement

Les diodes trouvent leurs fonctions, évitent une discontinuité dans la conduction de courant et prennent donc le relais des interrupteurs, quand ceux-ci bien qu'étant commandés à la fermeture, ne peuvent pas conduire car ils sont unidirectionnels [62]. De plus, il faut remarquer que la charge fournit de la puissance à l'alimentation quand les diodes sont passantes. Il s'agit de **phases de récupération**. Ces phases de récupération nécessitent d'utiliser des alimentations en tension réversible en courant. Les phases ❶ et ❸, dites de charge, correspondent à une consommation d'énergie, déchargeant la batterie. La charge y est donc réceptrice. Les phases ❷ et ❹, dites de récupération, correspondent à une fourniture d'énergie électrique par la charge à la batterie. La charge y est donc génératrice.

L'évolution du courant $i(t)$ suit une loi exponentielle. L'allure des différents courants change (figure 3. 8), elle dépend de la charge.

3. 4. Réalisation de l'alimentation électrique pour DBD à base du PIC 16F84A

À présent, nous introduisons l'alimentation destinée à notre DBD qui se caractérise par des formes d'onde (courant et tension) alternatives, à cause du comportement capacitif inhérent à ce type de décharge.

Avec une alimentation en tension continue, au bout d'un certain temps, les capacités (barrières diélectriques) seraient chargées au potentiel imposé, empêchant le passage de courant. Avec une alimentation en courant continu, les diélectriques se chargeraient de plus en plus, conduisant à des tensions qui vont endommager un composant de l'alimentation ; ceci oblige à imposer un courant moyen nul.

3. 4. 1. Source de tension sinusoïdale

La façon la plus facilement réalisable et peut-être la plus ancienne, d'alimenter une DBD est d'utiliser un générateur de tension sinusoïdale. Dans ce type de configuration, il est nécessaire de placer un transformateur élévateur en sortie du générateur, quand la tension du générateur n'est pas suffisante pour faire claquer le gaz. Les alimentations sinusoïdales permettent un réglage de la fréquence et de l'amplitude de la tension.

Pour ce type d'alimentation, les formes d'onde, de tension et courant, affichées sur la figure 3. 9 ont été relevé expérimentalement sur une DBD.

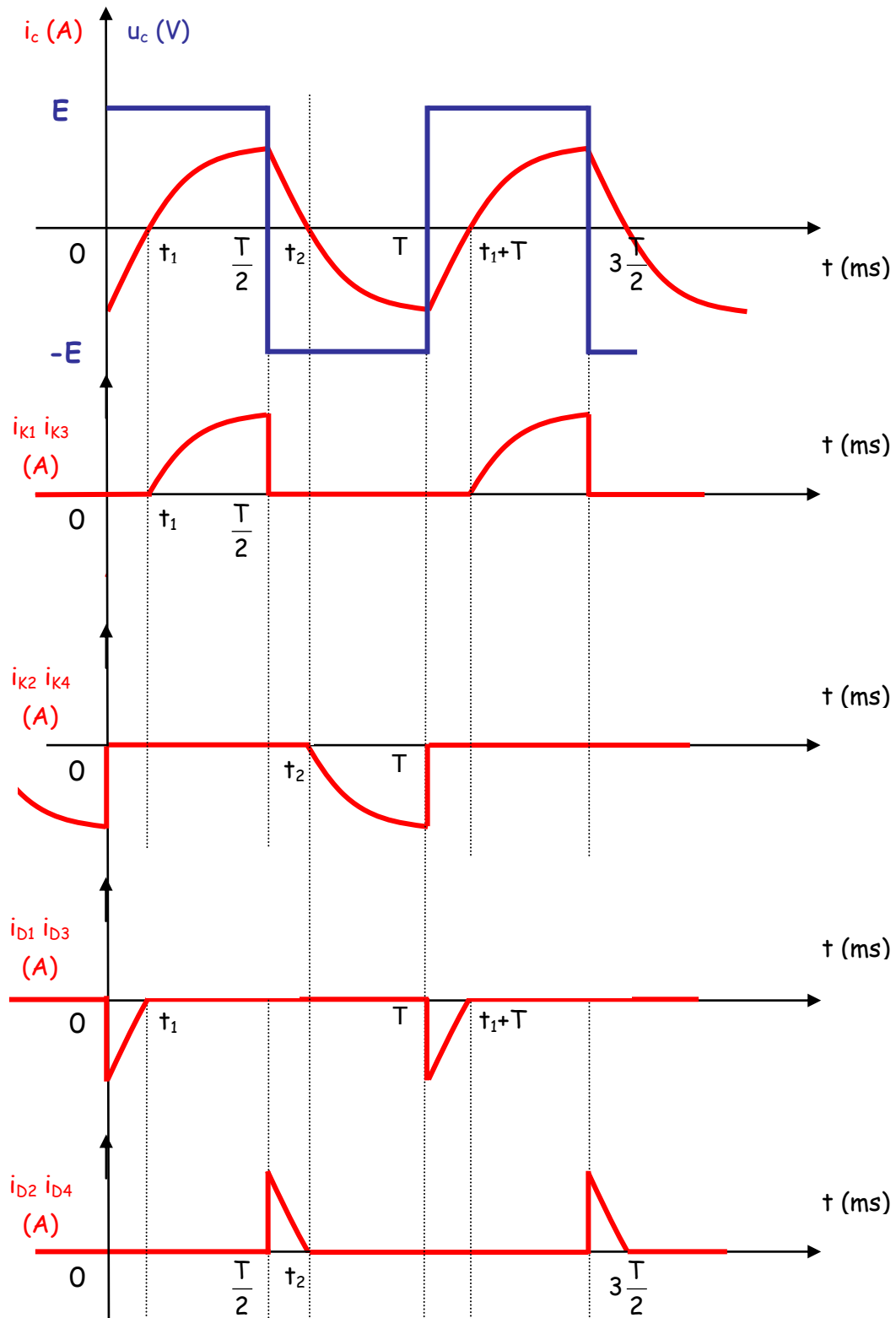


Figure 3. 8 : Chronogrammes des courants dans chaque composant [62].

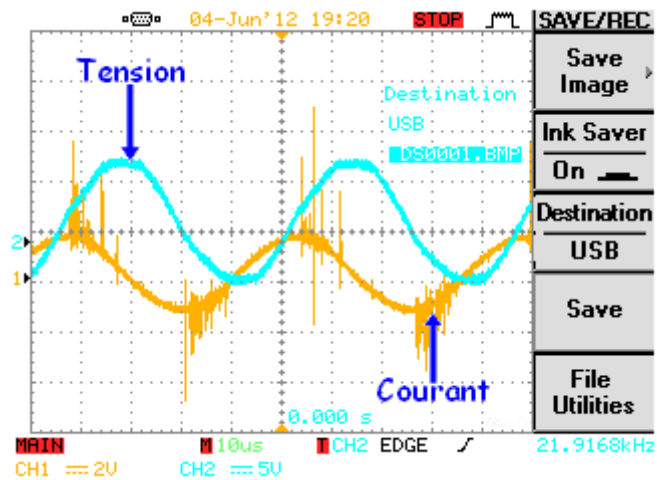


Figure 3. 9 : Formes d’onde du courant et de la tension de la DBD obtenues avec l’alimentation réalisée (U: 5kV/div.; i: 2V/div.; 10µs/div.).

Une photographie de l’alimentation haute tension à haute fréquence destinée à notre DBD est illustrée à la [figure 3. 10](#) et le circuit électrique de cette alimentation est représenté dans la [figure 3. 11](#).

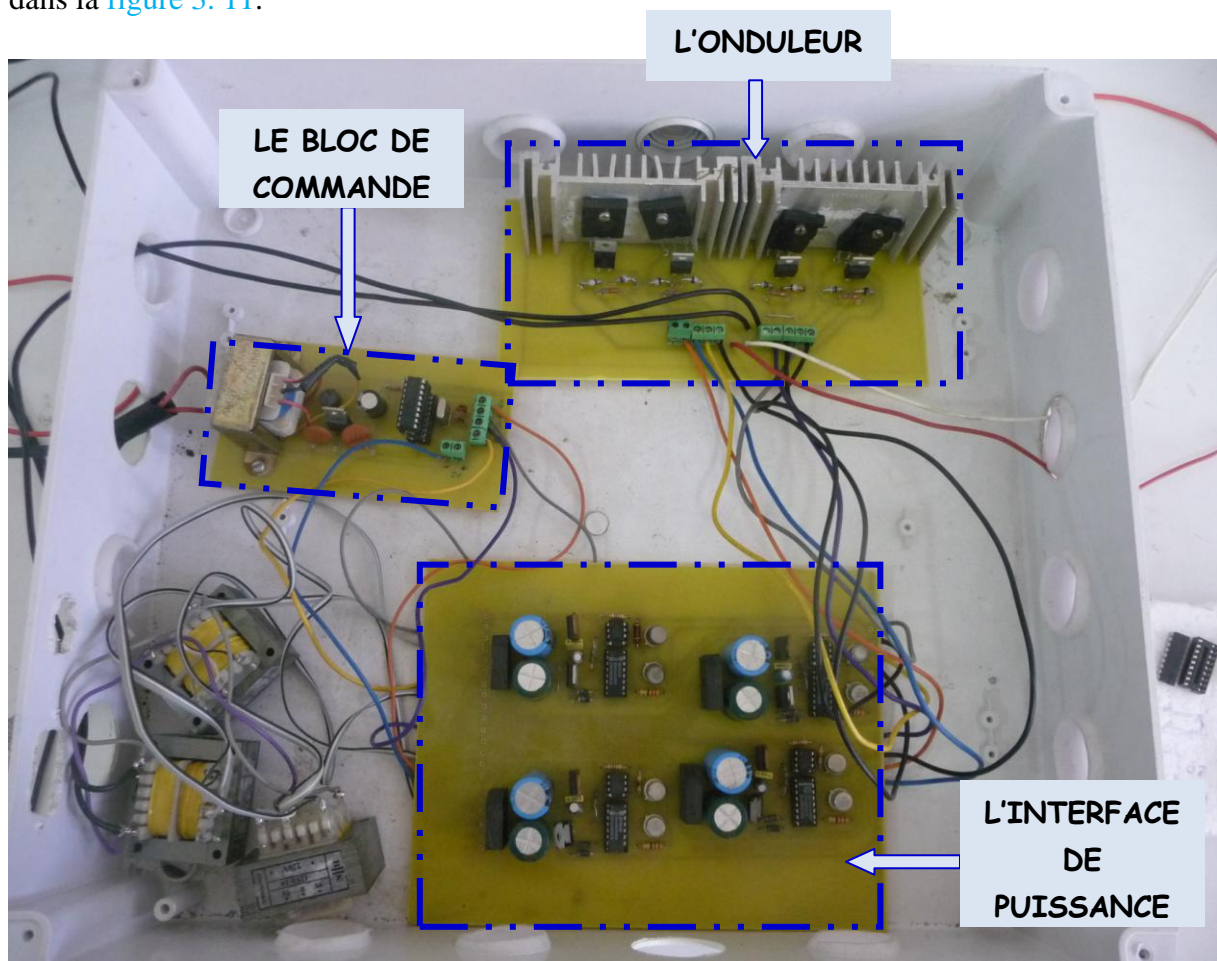


Figure 3. 10 : Photographie de l’alimentation.

3. 4. 2. Conception de la maquette : Description de l’onduleur

Grâce à l’utilisation de composants électroniques de haute performance, l’onduleur est d’utilisation universelle et se caractérise par une très grande sécurité de fonctionnement, un rendement optimal et une capacité de communication vers d’autres systèmes au moyen d’interfaces intégrées. L’électronique de commande de l’onduleur est conçue sur la base d’une technique moderne à microcontrôleur.

Les principaux composants de la chaîne de l’onduleur sont (figure 3. 12):

- I. Alimentation de la plaque,
- II. Bloc gérant la commande,
- III. Bloc gérant l’interface de puissance (Driver),
- IV. Bloc gérant l’étage de puissance (onduleur).

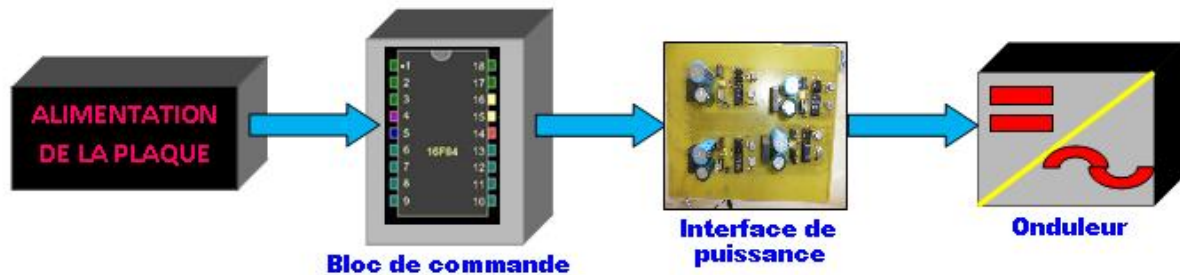


Figure 3. 12 : Chaîne de l’onduleur.

3. 4. 2. 1. Bloc gérant l’étage de puissance (onduleur)

L’onduleur constitue la dernière partie de la maquette dans le circuit puissance.

I. Interrupteurs de puissance

Les interrupteurs de puissance utilisés pour le convertisseur sont des modules MOSFET (**IRF740**) + Diode (**BYT12**). La fiabilité des MOSFETs décroît très vite quand la température augmente. On est donc obligé d’évacuer les calories produites dans les jonctions des semi-conducteurs, en fixant ceux-ci sur des dissipateurs (radiateurs : barres d’aluminium de petites dimensions). Par ailleurs pour ne pas court-circuiter les MOSFETs, chaque signal de commande doit avoir une masse indépendante. On y parvient en utilisant des alimentations indépendantes pour chaque circuit de commande. La commande consiste essentiellement à

amplifier le signal fourni par la partie de faible puissance à la partie haute puissance, on l’appelle souvent l’interface de puissance.

II. Critères de choix de l’élément semi-conducteur

Le choix de l’interrupteur de puissance est lié à la fréquence de travail, à la tension, au courant et surtout au prix et à la disponibilité. Nous avons opté pour le transistor MOSFET de type IRF740 dont les caractéristiques conviennent à nos besoins en courant, tension et temps de réponse.

III. Transistor MOSFET de puissance

Le transistor MOSFET (Metal-Oxide-Silicon-Field-Effect-transistor) présente la particularité d’être un interrupteur de puissance commandé qui fonctionne en mode unipolaire, c’est-à-dire que le courant n’est dû qu’au déplacement d’un seul type de porteurs de charges. Il en résulte une très grande rapidité de commutation due à l’absence de charges stockées [63]. La figure 3. 13 montre le symbole usuel du MOSFET de puissance avec les notations classiques.

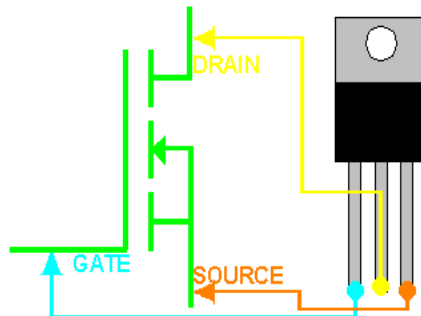


Figure 3. 13 : Brochage du MOSFET.

IV. Diode Zener

Des diodes Zener sont également placées au plus près des cellules de commutation. La fonction principale de ces diodes est de maintenir une tension constante à ses bornes. Ce sont des diodes stabilisatrices de tension. Il faut toujours les alimenter à travers des résistances supérieures à **100Ω**. Dans notre cas, la valeur de la résistance est de **5,6 kΩ**.

Une prise de vue de l’onduleur est représentée dans la figure 3. 14 et son circuit électrique est illustré dans la figure 3. 15.

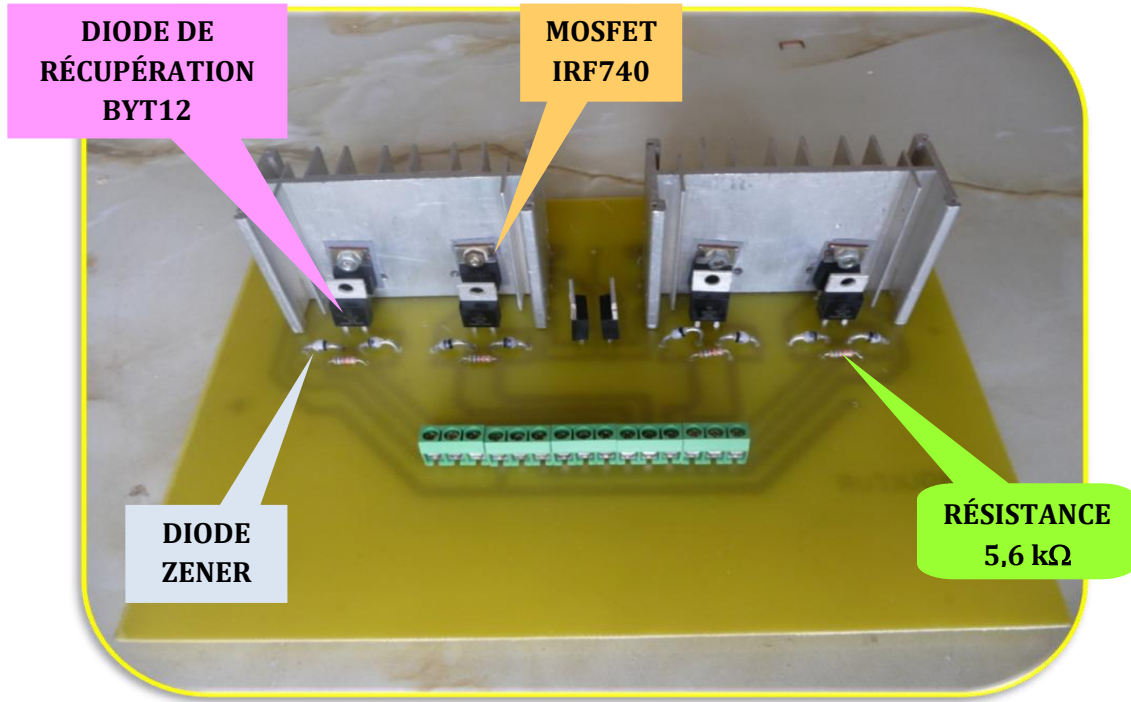


Figure 3. 14 : Photo de prototype de l'onduleur.

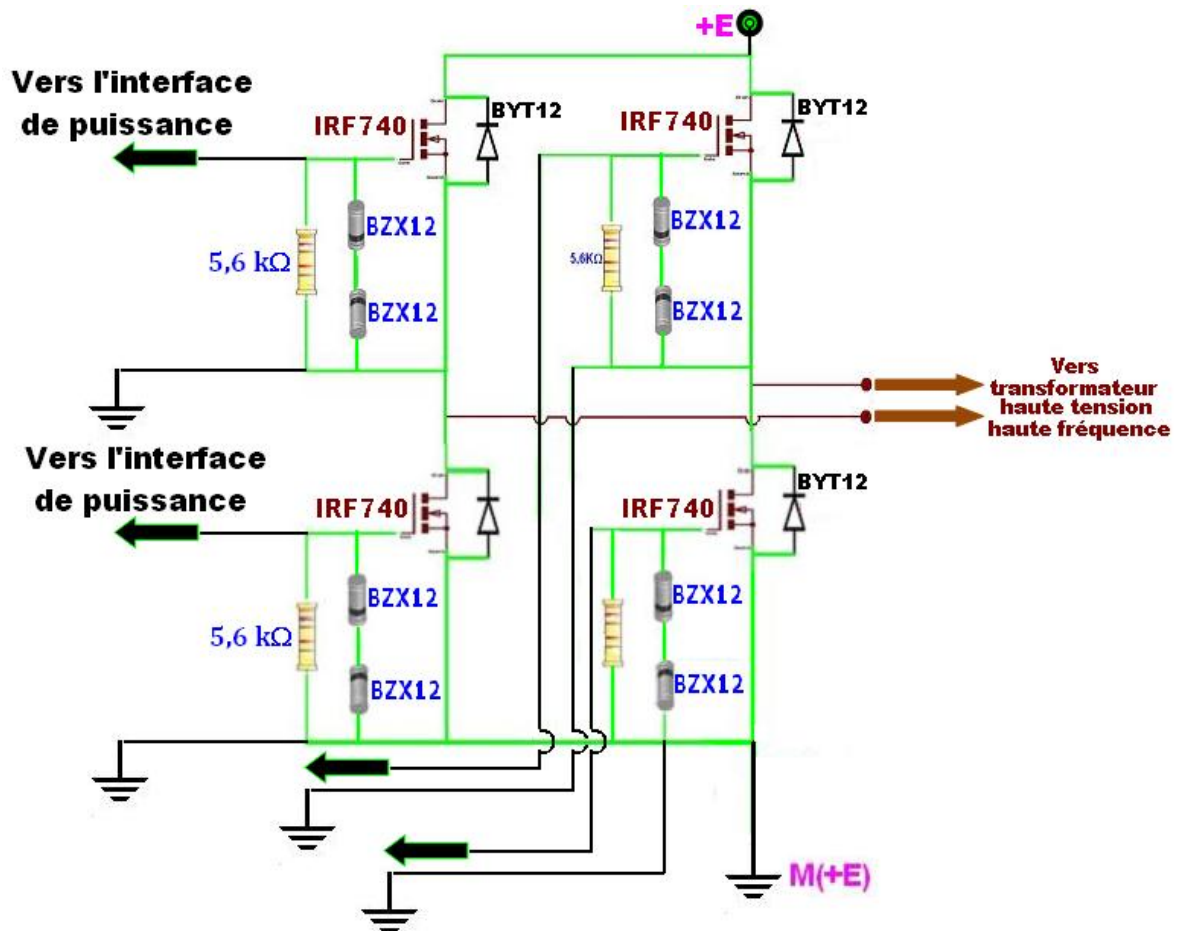


Figure 3. 15 : Circuit électrique de l'onduleur.

3. 4. 2. 2. Bloc gérant l'interface de puissance (Driver)

I. Alimentation de l'interface

Le concept à la base de cette alimentation est simple : l'alimentation linéaire transforme un courant alternatif en un courant continu, utilisable par un circuit électronique. Une telle alimentation comporte un transformateur pour abaisser la tension secteur (**220 V** alternatifs) à une tension alternative plus basse, un dispositif de redressement qui transforme la tension bidirectionnelle du secteur en tension unidirectionnelle (pont de diode : [figure 3. 16](#)) et qui supporte un courant direct de **1 A**, et un dispositif de lissage (2 condensateurs) monté en parallèle à la sortie du pont pour éliminer l'ondulation issue de la tension sinusoïdale du secteur. Ce lissage ([figure 3. 17](#)) est d'autant plus efficace que la capacité des condensateurs est importante.

Pour ce qui est du circuit de régulation ([figure 3. 18](#)), il a pour rôle d'affiner le "lissage" et stabiliser la tension à une valeur fixe. Nous avons donc à la sortie de chaque régulateur une tension continue de **+8 V (7808)** et **-8V (7908)**. L'étage de régulation est attaqué via deux diodes placées entre masse et borne de masse de chaque régulateur pour garantir une chute de tension constante égale **0,6 V** pour chaque diode dans le but d'avoir deux tensions symétriques de **+7,5V** et **-7,5V**. Les deux condensateurs placés entre la sortie de chaque régulateur et la masse n'est pas obligatoire, mais il est conseillé de les mettre pour éviter tout risque d'oscillation parasite des régulateurs. Chaque condensateur devra être placé le plus près possible du régulateur lui-même.

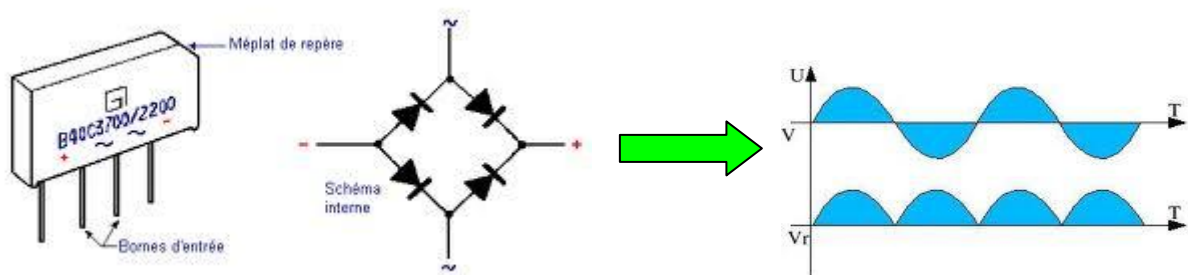


Figure 3. 16 : Pont de diode.

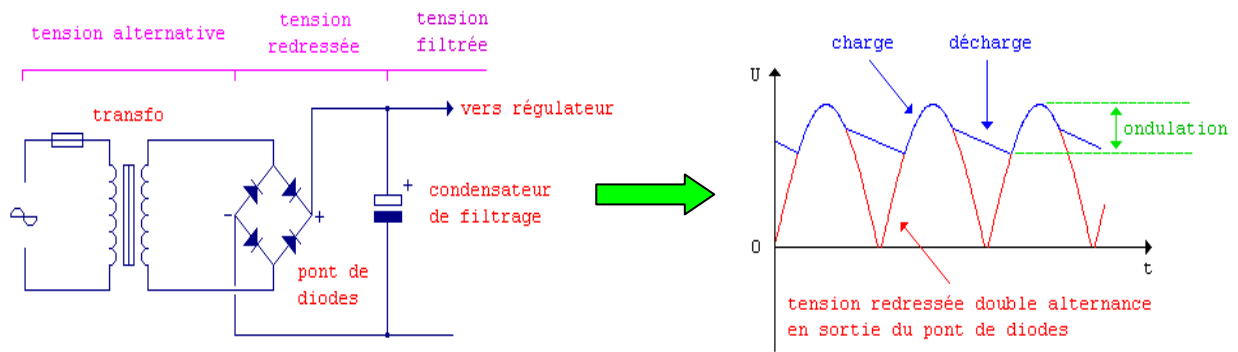


Figure 3. 17 : Condensateurs de filtrage.

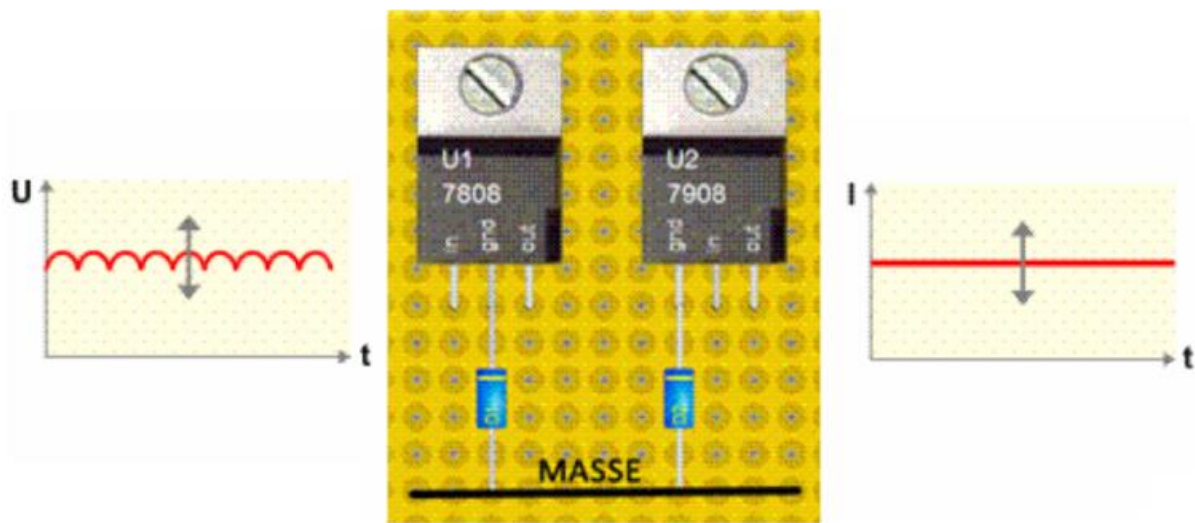


Figure 3. 18 : Régulateurs de tension (régulateur de tension positif 7808 et régulateur de tension négatif 7908).

II. Interface

L'interface doit assurer la protection de la commande en cas d'accidents côté puissance. Une isolation galvanique à base de photocoupleur (ou encore optocoupleur) est nécessaire. Ce composant assure à lui seul l'isolation électrique (galvanique) entre la partie commande (l'entrée au niveau **0V / 5V**) et la partie puissance (**220V / 1A**) parce que les tensions mises en jeu ne sont pas compatibles de part et d'autre. Le photocoupleur est composé de deux éléments (figure 3. 19) :

- ❖ Un photoémetteur (diode), dans le visible ou l'infrarouge.
- ❖ Un photorécepteur, le plus souvent un phototransistor.

Le signal de commande attaque la diode photoémettrice du photocoupleur via une résistance de protection de faible valeur **100Ω**. Les impulsions sont transmises au phototransistor qui est polarisé par une alimentation indépendante de celle de la commande. La diode et le phototransistor sont électriquement indépendants mais optiquement couplés, à l'intérieur du composant parfaitement étanche à la lumière extérieure.

À la sortie de l'optocoupleur (type **4N35**), on retrouve l'architecture suivante :

- ✚ borne **5** du phototransistor est reliée au **+7,5V**.
- ✚ borne **4** du phototransistor reliée à **-7,5V** au travers d'une résistance de **1 kΩ** recevant les données du PIC, tamponnées ici par des buffers qui sont définis comme amplificateurs de courant (type **HEF4049BP**). Le circuit intégré comporte 6 portes inverseuses " portes logiques de type NON " dont **4** seulement sont branchées (U1 : A, D, E, F). La mise en parallèle des trois portes en sortie permet d'augmenter la capacité en courant de sortie.

Le brochage du circuit BUFFER inverseur **4049** est représenté par la [figure 3. 20](#).

Nous nous retrouvons à la sortie du BUFFER, le circuit de pilotage du MOSFET, formé par les transistors **2N1711** et **2N2905** en configuration "push-pull". Cette solution est importante, car pour assurer un bon rendement au circuit il faut pomper un courant considérable dans la grille du MOSFET pendant les commutations.

Nous avons fait intervenir la paire de transistors différents et complémentaires, c'est-à-dire, un transistor de type NPN (**2N1711**) et un de type PNP (**2N2905**) pour faire l'interface entre partie "faible puissance" (portes inverseuses) et partie "forte puissance" (MOSFET). Ces deux transistors opèrent comme interrupteurs et sont montés en « push-pull » ([figure 3. 21](#)) : c'est un montage composé de ces deux éléments actifs, dont les actions s'équilibrent par réaction réciproque. Le montage est alimenté par les deux alimentations continues symétriques (**+7,5V** et **-7,5V**) par rapport à la masse. Le signal présent en sortie pilote directement la gâchette (gate : [figure 3. 13](#)) du MOSFET de puissance et est fourni alternativement par les deux transistors.

Si $i_g > 0$, c'est le transistor NPN qui travaille, $I_{c1} \approx i_g$ et le transistor PNP est bloqué, $I_{c2} = 0$.

Si $i_g < 0$, c'est le transistor PNP qui travaille, $I_{c2} \approx -i_g$ et le transistor NPN est bloqué, $I_{c1} = 0$.

Le driver du MOSFET doit pouvoir fonctionner à $i_g > 0$ et à $i_g < 0$. Une résistance de 22Ω est insérée à la sortie du montage "push-pull".

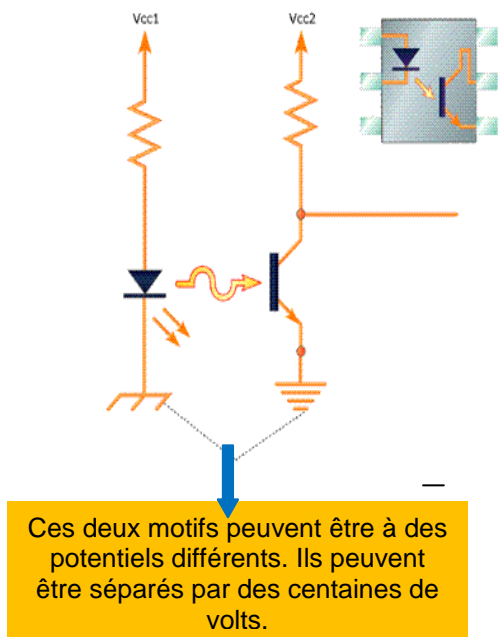


Figure 3. 19 : Photocoupleur.

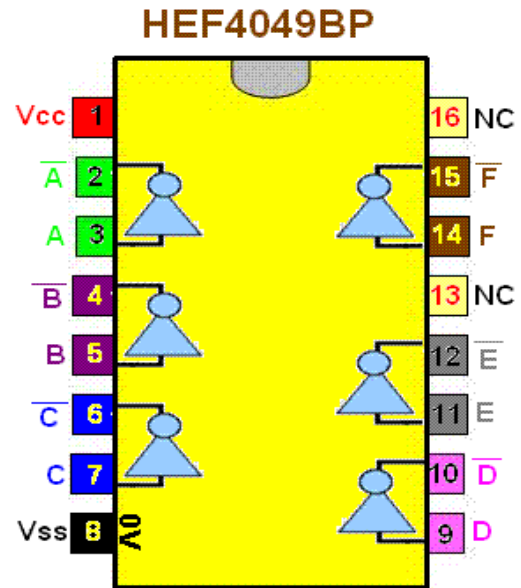


Figure 3. 20 : Brochage de l'amplificateur.

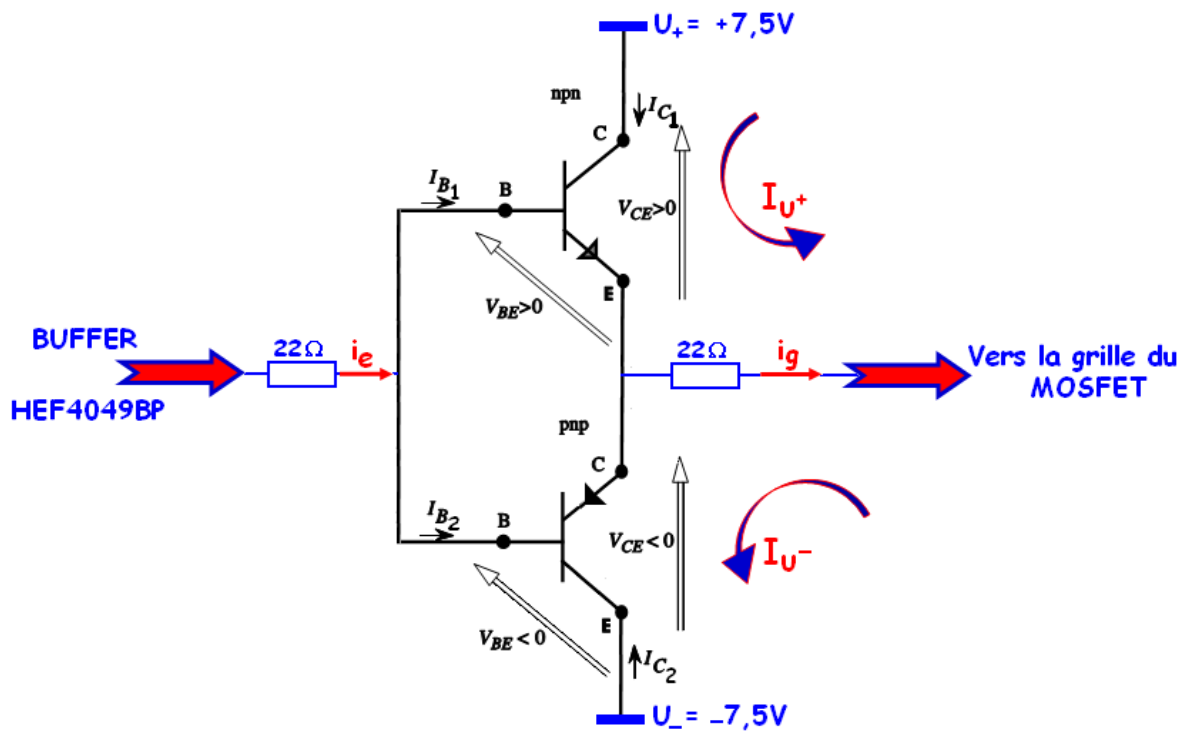


Figure 3. 21: Montage " push-pull " à deux transistors complémentaires (NPN et PNP).

Une photo de prototype de l'interface de puissance et son alimentation est illustrée à la figure 3. 22.

La figure 3. 23 représente le schéma électrique adopté pour la réalisation de notre interface de puissance dont l'alimentation est représentée par la figure 3. 24.

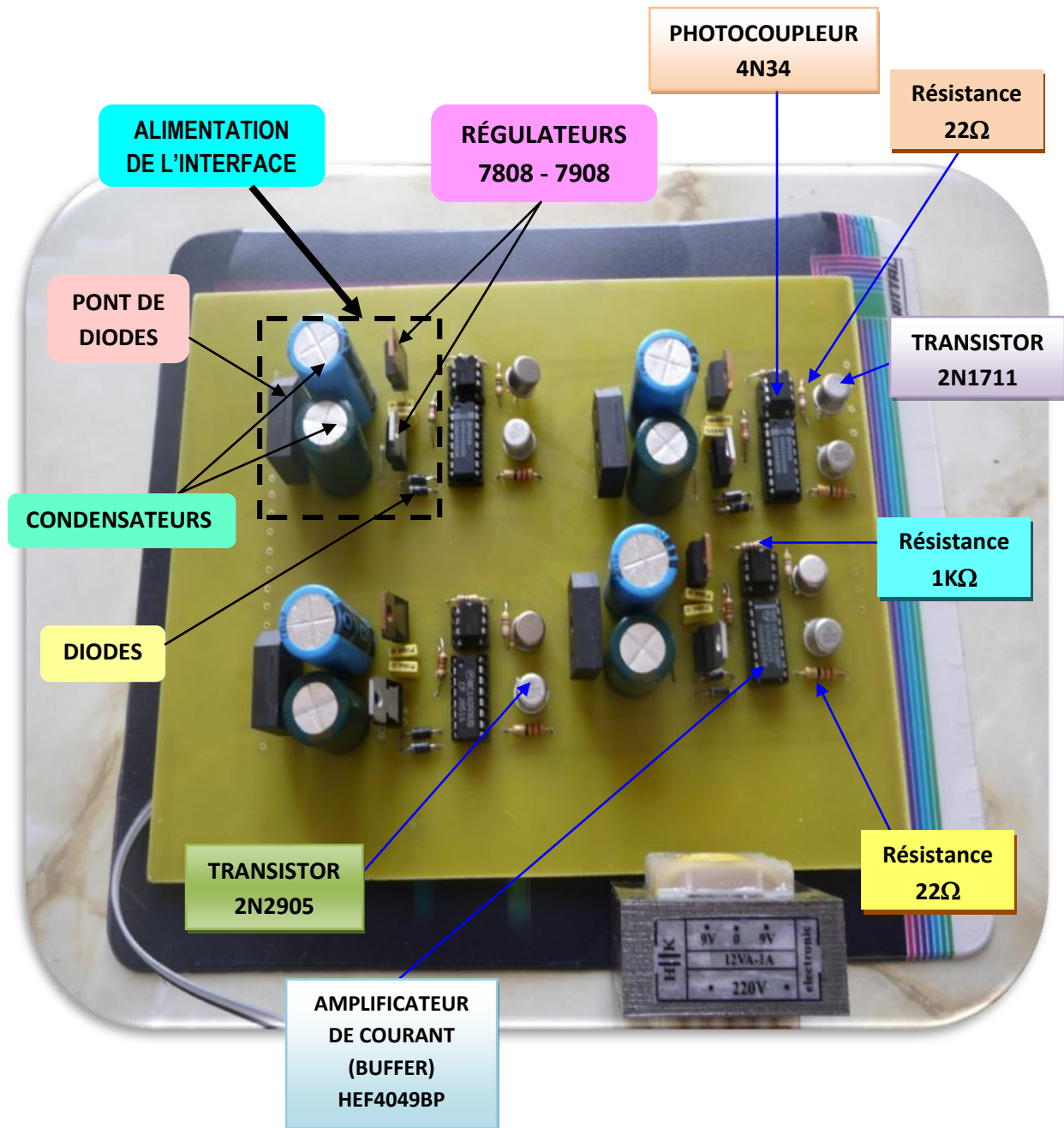


Figure 3. 22 : Photo de prototype de l'interface de puissance et son alimentation.

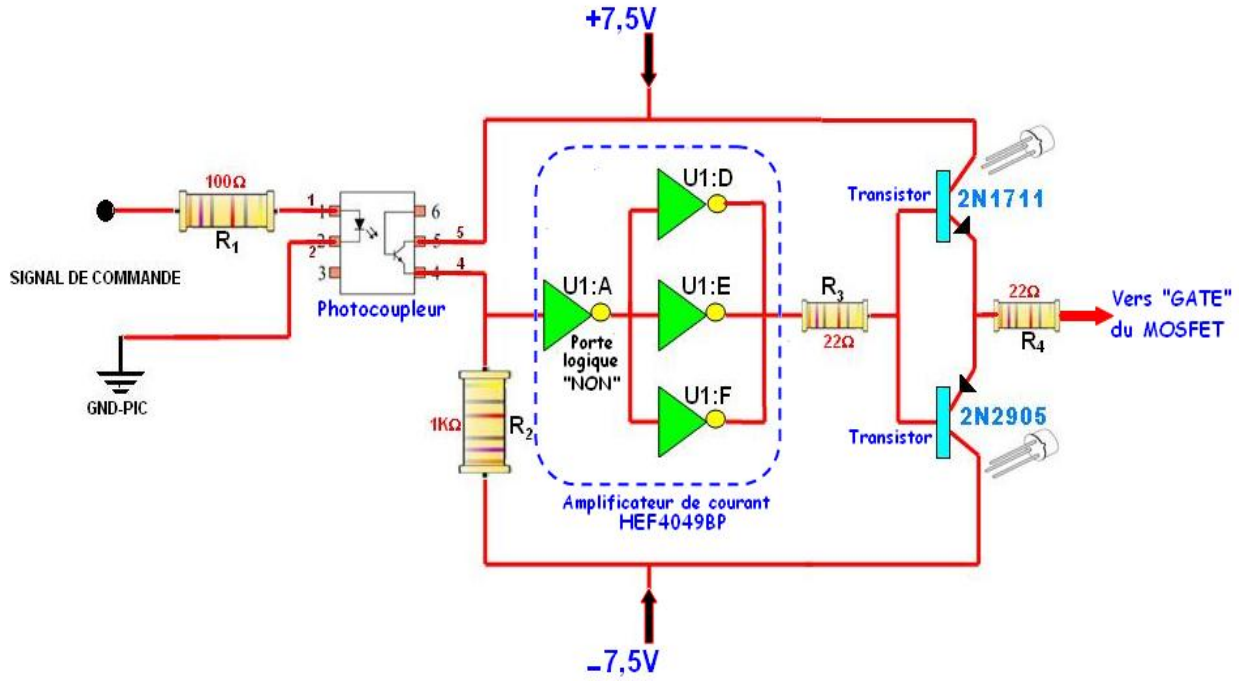


Figure 3. 23 : Schéma électrique de l'interface de puissance.

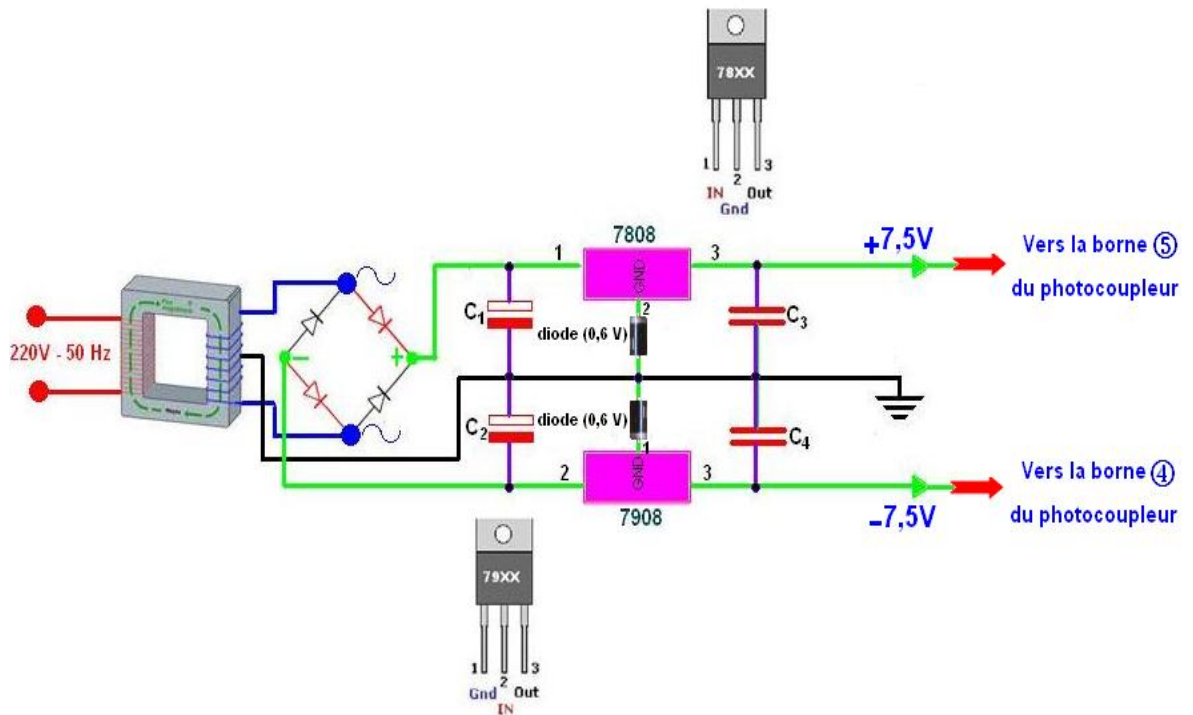


Figure 3. 24 : Schéma électrique de l'alimentation de l'interface de puissance.

3. 4. 2. 3. Bloc gérant la commande

I. Circuit de commande

Le circuit de commande ne fait pas partie du circuit puissance (onduleur).

Le diagramme de la [figure 3. 25](#) illustre le schéma fonctionnel du système de gestion et pilotage de l'alimentation. La génération des signaux de commande est réalisée par un microcontrôleur de type PIC **16F84A** [64]. Ces signaux sont envoyés aux interrupteurs de puissance du convertisseur, avec une isolation galvanique garantie par les optocoupleurs déjà introduits auparavant.

Un programme est utilisé pour envoyer, depuis un ordinateur, les consignes vers le microcontrôleur. Sur l'interface utilisateur, il est possible de changer la fréquence de fonctionnement.

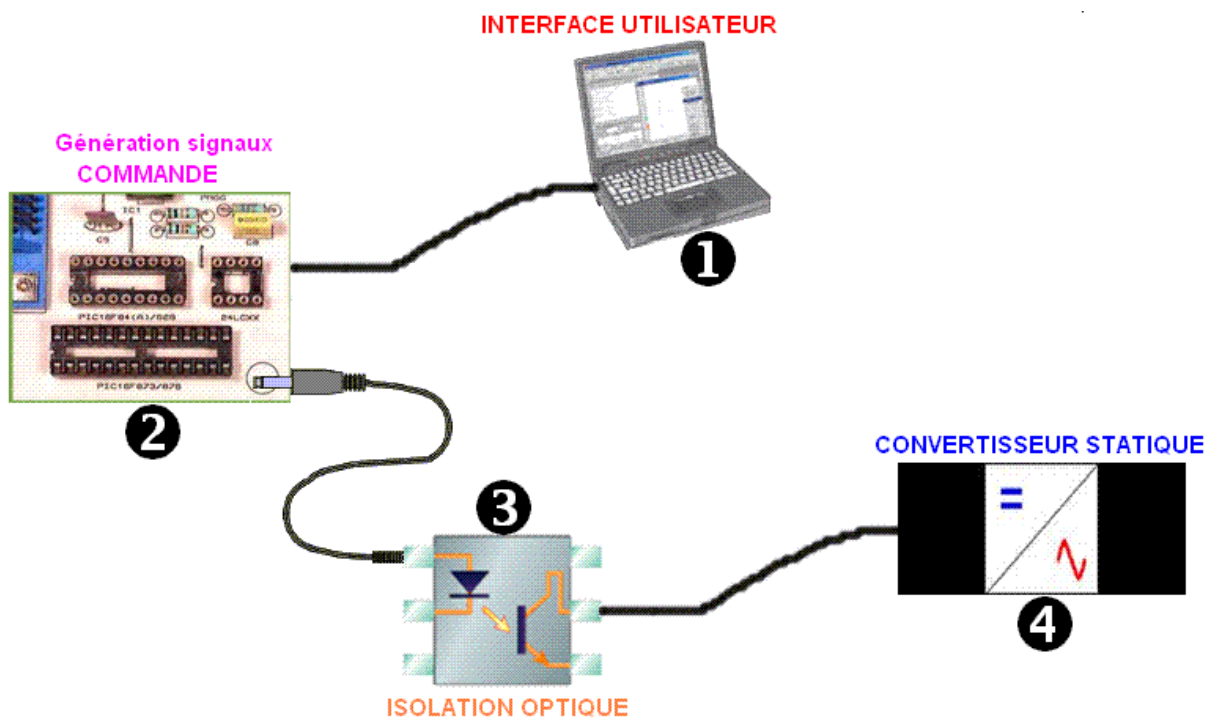


Figure 3. 25 : Système de gestion et pilotage de l'onduleur.

Les PICs sont des composants qui ne sont capables de rien tant qu'on ne leur a pas fait ingérer un programme. Le PIC **16F84A**, circuit intégré de **18** broches, nécessite une horloge pour fonctionner (pour faire tourner le programme interne). Cette horloge est à base de quartz pour une grande stabilité de fréquence d'horloge. La valeur courante de l'horloge est de **4 MHz**, il existe des **16F84** acceptant une fréquence maximale de **10 MHz** ou **20 MHz**. La

fréquence de l'horloge de notre pic **16F84** est de **20 MHz**, ce qui limite les changements dans la période de fonctionnement, à une résolution de **50 ns**, valeur suffisante pour notre application.

II. Alimentation de la commande

Le PIC **16F84**, pour pouvoir fonctionner, a nécessairement besoin de :

- Une alimentation de **5 Volts** ;
- Un quartz et ses deux condensateurs de pied (car un pilotage précis par base de temps à quartz est nécessaire) ;
- Un condensateur de découplage (pour réduire les transitoires se formant inévitablement dans tout système impulsionnel) ;
- Un bouton poussoir et une résistance, pour la mise en place d'une commande de Reset.

Ces éléments – qu'il convient de considérer comme des invariants devant nécessairement figurer dans tous montage – représentent le cortège obligatoire de tout microcontrôleur PIC **16F84**.

IL s'agit d'une configuration classique ([figure 3. 26](#)) : L'alimentation de notre PIC se fait avec un transformateur de **6V**, via un redresseur à diodes. On place un condensateur de filtrage juste après le redresseur d'une valeur de **220 µF** qui a pour but de lisser la tension afin que celle-ci soit continue.

Un régulateur de tension **+5V** de type **7805** fournit ensuite une tension stable indépendante du courant débité. Ne pas oublier de filtrer l'entrée et la sortie du régulateur par deux condensateurs de valeur **0,1µF** chacun, ces condensateurs doivent être le plus près possible des bornes et reliés directement à la masse.

Un quartz **20 MHz** permet de générer les horloges. Deux condensateurs en céramique d'une valeur de **15µF** chacun sont placés aux pieds du quartz et sont directement reliés à la masse.

L'entrée de reset MCLR est connectée à l'alimentation positive **+5V** via une résistance de **1kΩ** qui est recommandée pour limiter le courant. Ceci permettra au PIC de redémarrer plus sûrement après une coupure d'alimentation brève.

Une photo de prototype de l'alimentation du PIC est illustrée à la [figure 3. 27](#).

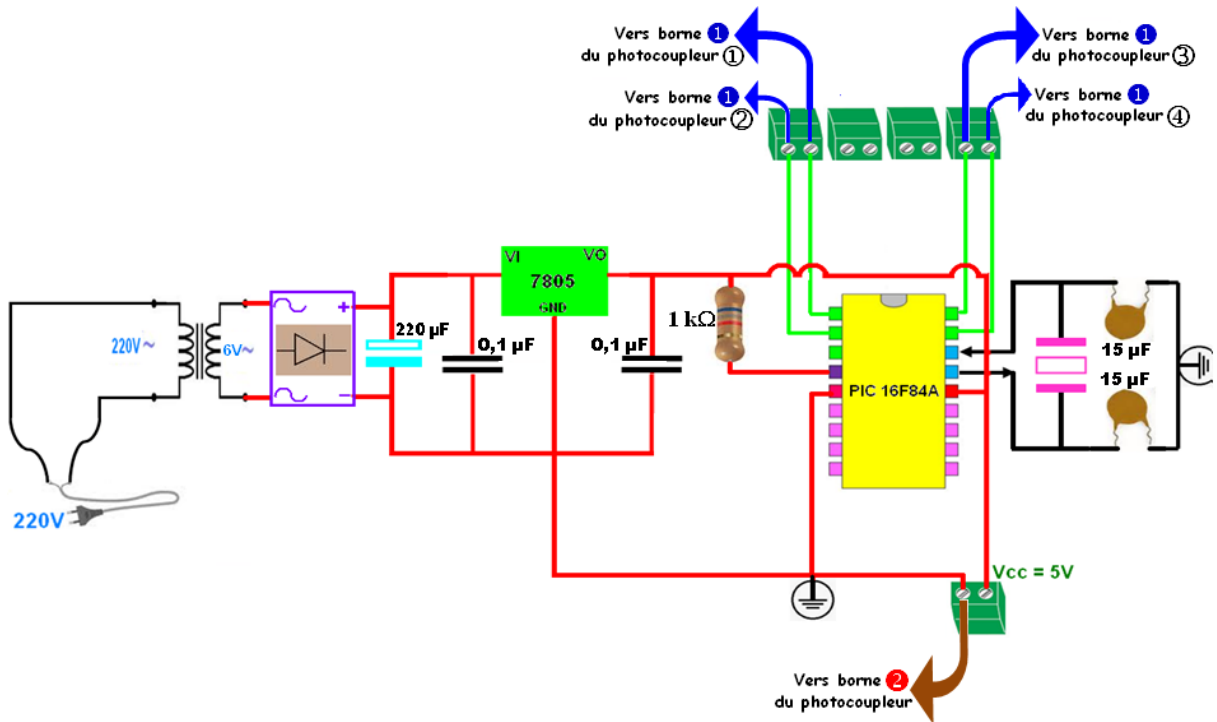


Figure 3. 26 : Alimentation du PIC 16F84A.

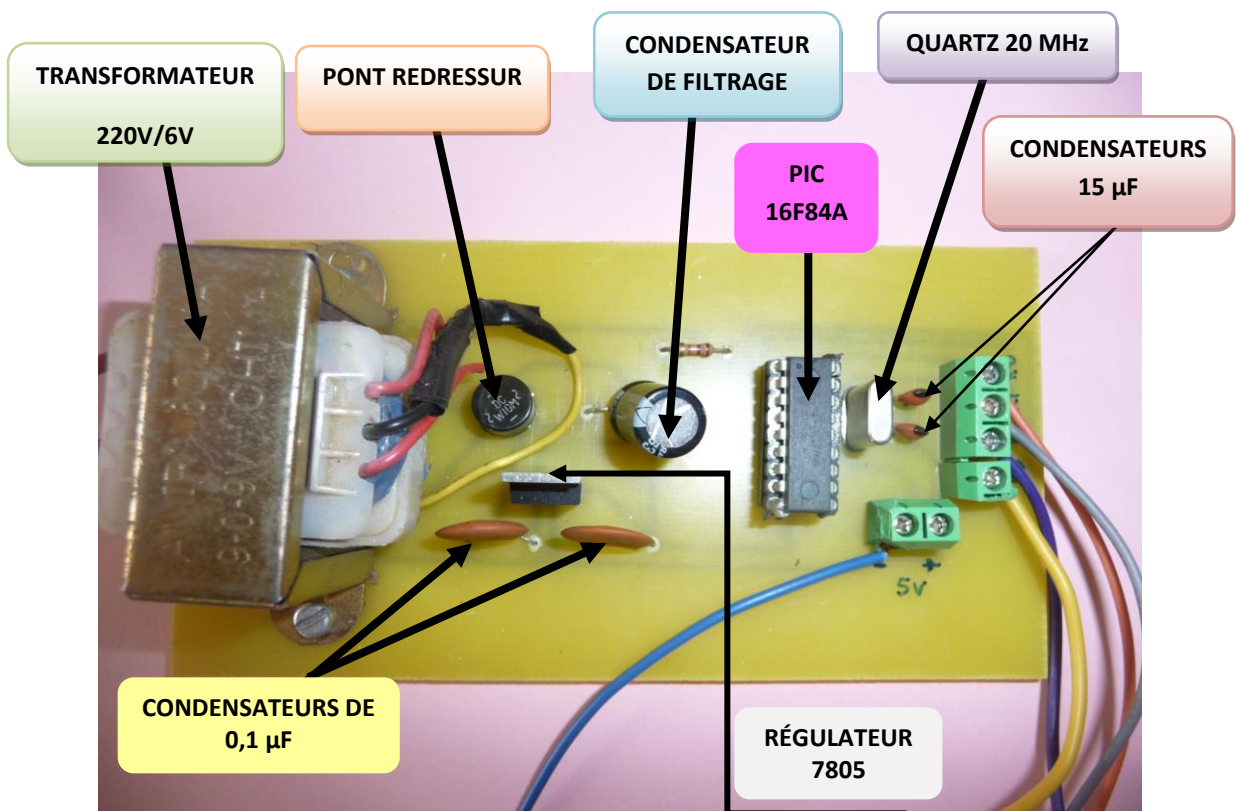


Figure 3. 27 : Photo de prototype de l'alimentation du PIC 16F84A.

3. 4. 3. Transformateur élévateur

Pour les niveaux typiques de puissance fournie à l'ozoniseur, la tension développée à ses bornes atteint des niveaux d'environ **7 kV** ; il s'agit d'une valeur très élevée pour la technologie actuelle des semi-conducteurs. Pour cette raison, nous sommes obligés d'inclure un transformateur élévateur entre le pont (onduleur) et l'ozoniseur.

Ainsi, la structure du pont devient celle de la [figure 3. 28](#).

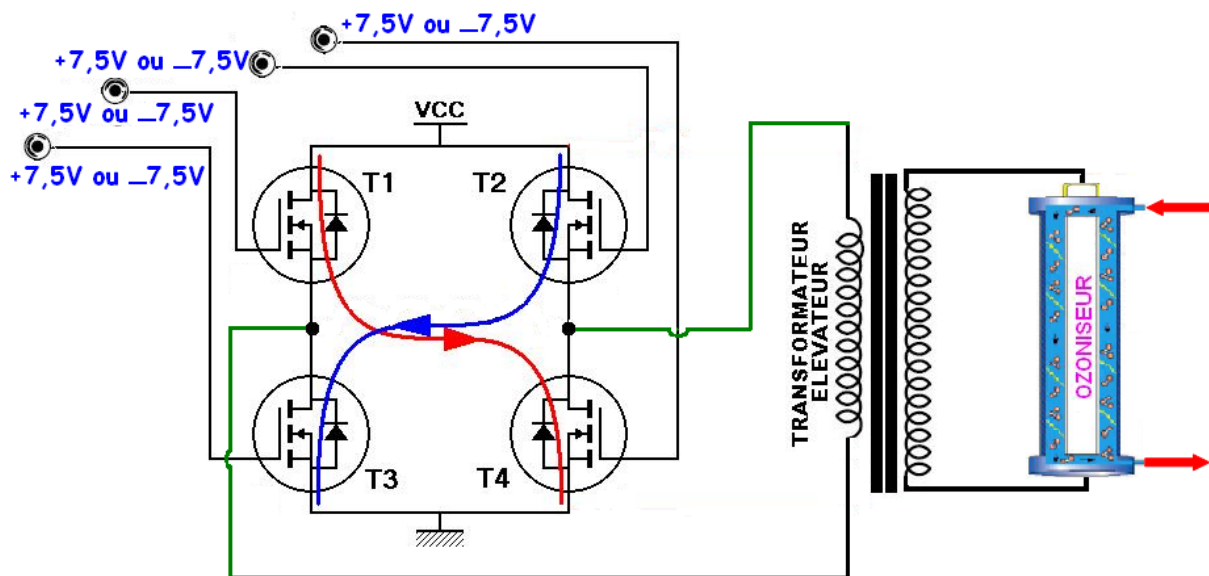


Figure 3. 28 : Transformateur élévateur dans le circuit de puissance.

3. 4. 4. Configuration initiale (avec MOSFETs)

Dans la réalisation pratique de cette alimentation, nous rencontrons plusieurs obstacles liés principalement à l'onduleur lui-même. L'inconvénient avec cette configuration, outre que nous ne pouvons pas accéder à une valeur élevée de la tension continue en entrée de notre onduleur, les MOSFETs " craquaient " et il fallait les changer à chaque fois. Afin de résoudre cet inconvénient, nous avons remplacé les MOSFETs (détériorant de ce fait l'alimentation de notre DBD) par des IGBTs.

3. 4. 5. Configuration définitive (avec IGBTs)

Une amélioration significative a été apportée par rapport à la configuration initiale, dont l'objectif était précisément l'amélioration des performances de cet onduleur. Dans cette

nouvelle configuration, nous évitons les inconvénients des quatre MOSFETs (**IRF740**) de la [figure 3. 14](#), en mettant en place quatre IGBTs (**1200V, 60A**). Un autre inconvénient de la configuration initiale est le suivant : la montée en tension continue occasionne une dissipation importante des MOSFETs ce qui provoquait leurs craquements.

3. 5. Utilisation de l'alimentation sinusoïdale et résultats obtenus

Le système d'alimentation électrique d'une décharge à barrière diélectrique est un des éléments clé pour le contrôle et la stabilité de la décharge. Un soin particulier doit être apporté à son développement et sa construction afin d'éviter les problèmes de claquage, mais aussi pour garantir la sécurité de l'expérimentateur.

L'alimentation sinusoïdale utilisée au cours de cette étude comprend deux éléments principaux ([figure 3. 29](#)) : une chaîne de l'onduleur (développée au sein du laboratoire) et un transformateur haute fréquence et élévateur de tension.

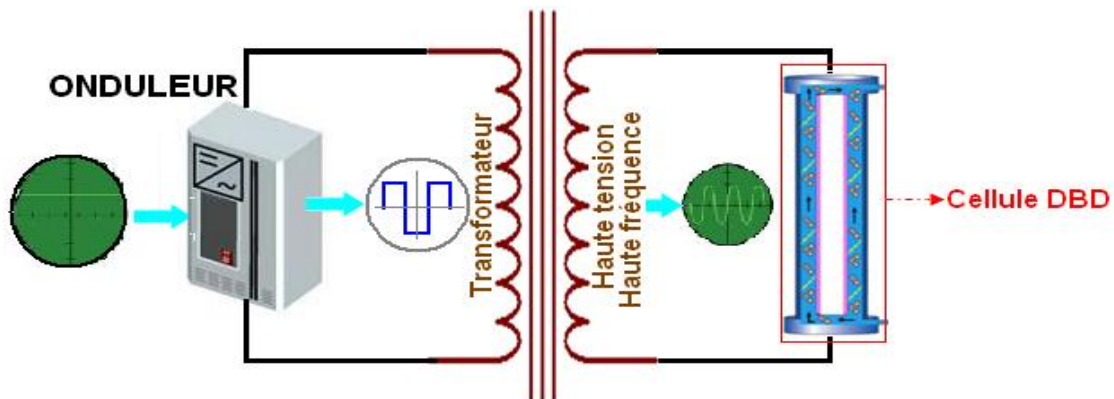


Figure 3. 29 : Circuit électrique de l'alimentation sinusoïdale.

Le bloc gérant la commande de l'onduleur fournit le signal carré d'entrée de l'onduleur et permet le réglage de la fréquence. L'onduleur délivre une tension carrée dont l'amplitude maximale vaut **200 V**. Ce signal alimente le primaire du transformateur élévateur à circuit magnétique ferrite. L'amplitude maximale que peut atteindre la tension de sortie est **7 kV**.

Vu la caractéristique capacitive de la décharge DBD, le rôle principal du diélectrique est de constituer d'une certaine façon une capacité en série avec l'espace de gaz. Cette capacité, associée en série avec la bobine du transformateur élévateur de tension, constituent un circuit oscillant série dont la fréquence d'oscillation f_0 se calcule d'après la formule connue $LC\omega_0^2 = 1$.

3. 5. 1. Transformateurs utilisés

Le transformateur a pour but d'amplifier la tension en sortie du convertisseur (onduleur). Le système d'alimentation influe sur le comportement de la décharge. Dans le but d'étudier le système d'alimentation de la décharge nous avons effectué une caractérisation des quatre transformateurs (figure 3. 30).

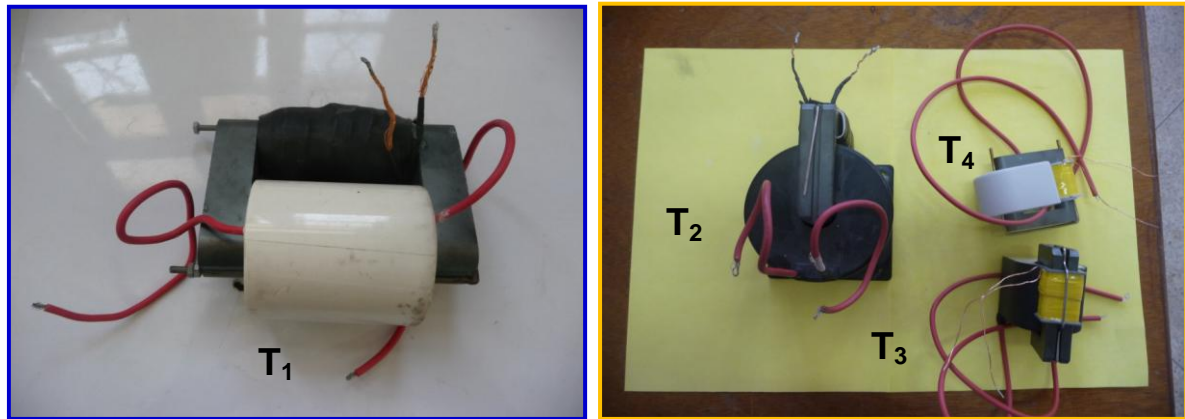


Figure 3. 30 : Transformateurs utilisés dans cette étude.

La figure 3. 31 présente un exemple de mesures de tension effectuées, pour deux fréquences différentes : **20 kHz** correspondant au transformateur T₁ et **22 kHz** correspondant au transformateur T₄. L'amplitude étant de **6,5 kV**.

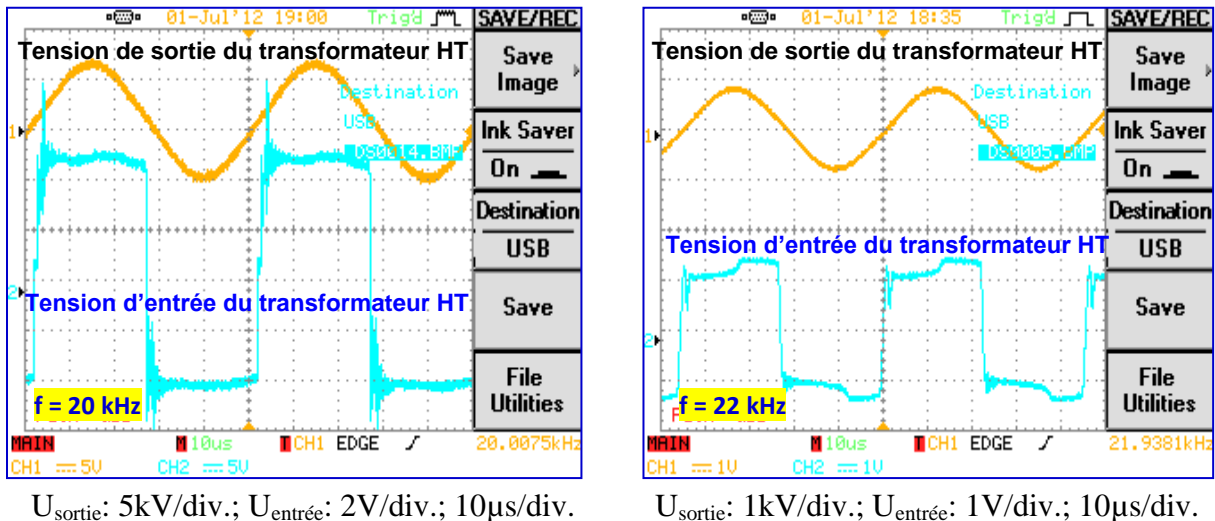


Figure 3. 31 : Formes d'onde de la tension obtenue à la sortie (en haut) et à l'entrée (en bas) du transformateur pour deux valeurs de fréquences.

3. 5. 2. Diagnostics et mesures des signaux électriques

Le suivi des paramètres électriques (la tension inter-électrodes et le courant instantané) est effectué grâce à un oscilloscope numérique 2 voies (INSTEK GDS-840C) échantillonnant à 250 MHz. Nous pouvons donc effectuer un bilan électrique. Les signaux de courant instantané produits par la décharge sont mesurés par l'intermédiaire de la tension aux bornes d'une résistance de mesure de **120 Ω** . Puis, ils sont visualisés sur l'oscilloscope. La tension inter-électrodes est mesurée par l'intermédiaire d'une sonde haute-tension (Tektronix modèle P6O15 A, rapport de conversion de **1** pour **1000**, tension maximale **40 kV**, impédance de **100 M Ω**) disposée entre sortie transformateur haute-tension et la masse et connectée à la voie **1** de l'oscilloscope. La [figure 3. 32](#), représente schématiquement le dispositif de mesures électriques utilisé dans cette étude.

Une prise de vue du dispositif expérimental est représentée dans la [figure 3. 33](#).

La détermination des caractéristiques du transformateur doit nous permettre de prédire son comportement en fonction de la charge ajoutée au secondaire par le générateur d'ozone. Les relevés des inductances des transformateurs, au primaire et au secondaire en se servant d'un RLCmètre sont résumés dans le [tableau 3. 1](#) :

Tableau 3. 1 : Valeurs des inductances des quatre transformateurs.

Transformateurs	Inductances au primaire	Inductances au secondaire
Transformateur T ₁	14,35 mH	1,87 H
Transformateur T ₂	0,550 mH	434 mH
Transformateur T ₃	6,54 mH	3,98 H
Transformateur T ₄	12,83 mH	3,32 H

Étant donnée la forme impulsionnelle du courant de décharge, il est nécessaire d'étudier le comportement des transformateurs à haute fréquence. Leurs caractéristiques ont été déterminées à partir des essais à vide et à charge.

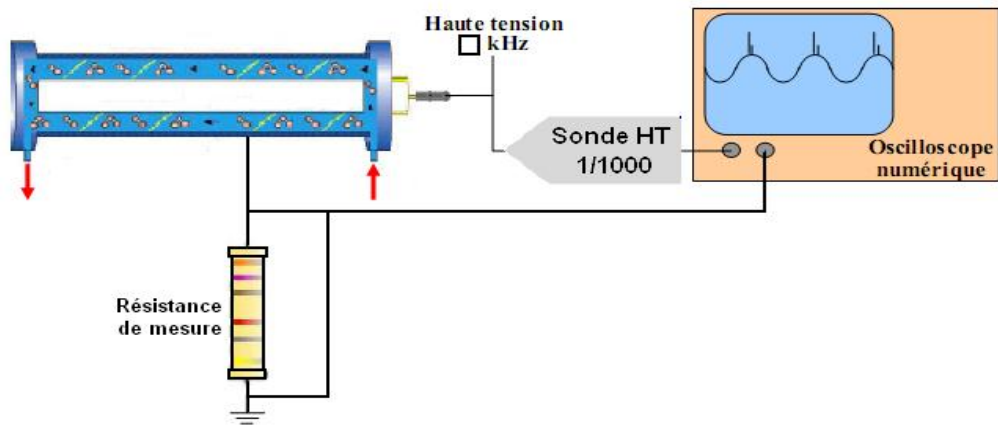


Figure 3. 32 : Schéma du dispositif de mesure du courant et de la tension dans le réacteur.

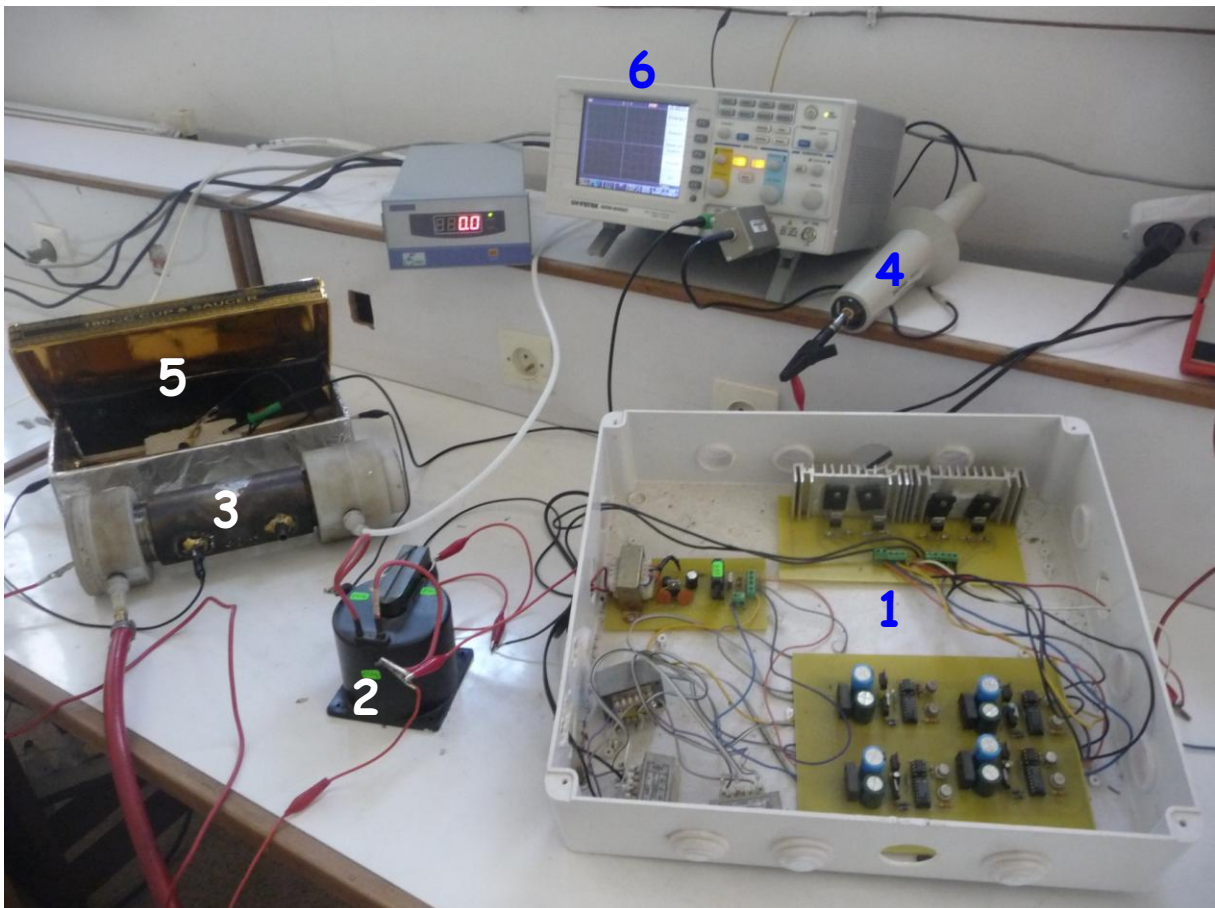


Figure 3. 33 : Photo du dispositif expérimental.

- 1- Alimentation HT-HF ;
- 2- Transformateur élévateur de tension ;
- 3- Générateur d'ozone ;
- 4- Sonde HT ;
- 5- Résistance de mesure ;
- 6- Oscilloscope numérique.

①. Essai à vide

Afin de caractériser le contrôle de la haute tension à la sortie de chaque transformateur, nous nous plaçons à une fréquence choisie et nous faisons varier la tension continue d'entrée de l'onduleur. Puis nous suivons la même procédure pour d'autres fréquences. Ensuite la même opération a été effectuée pour les autres transformateurs.

Les courbes de la [figure 3. 34](#) présentent les résultats de cette expérience.

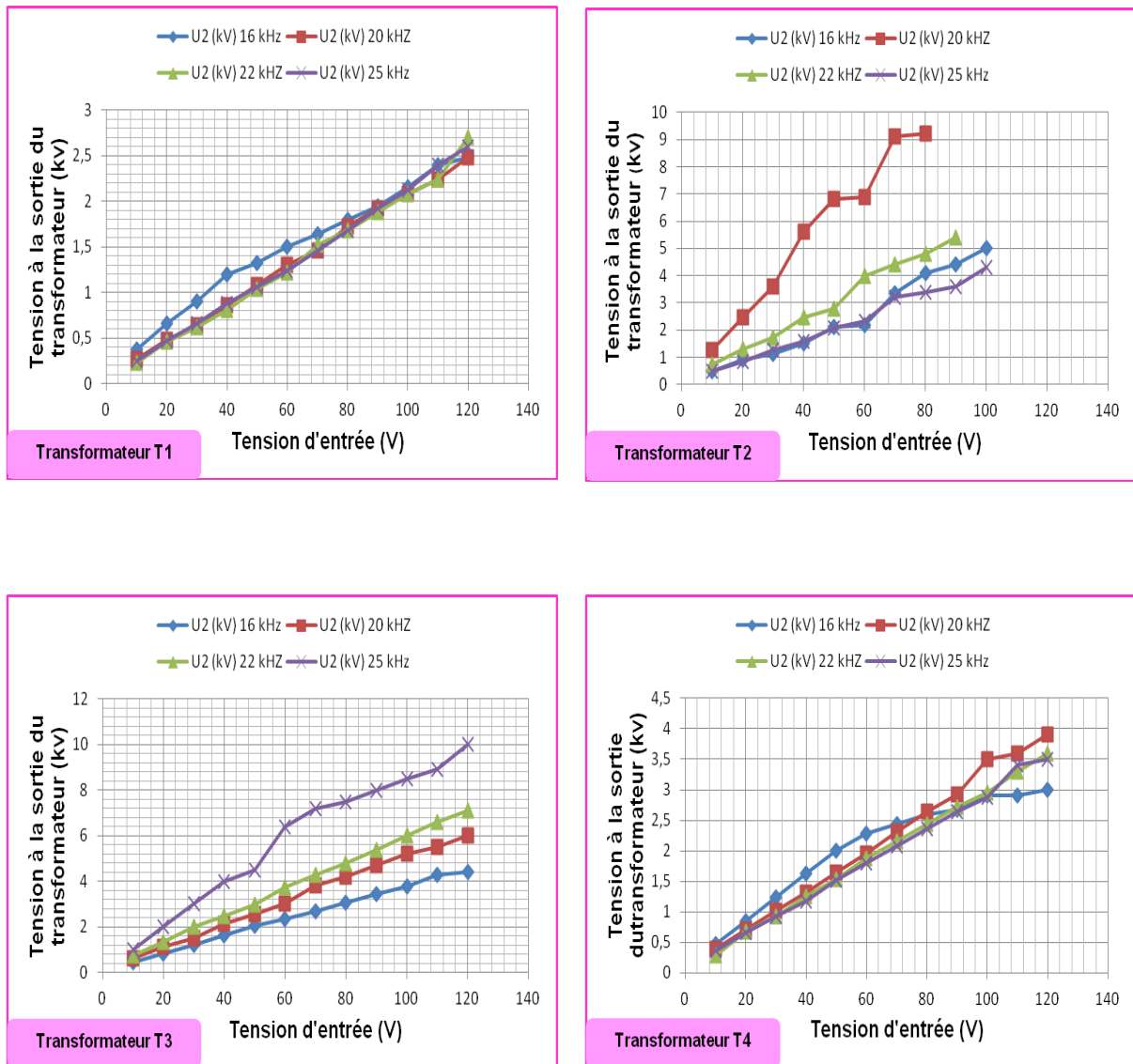


Figure 3. 34 : Évolution de la haute tension à la sortie de chaque transformateur en fonction de la tension continue d'entrée de l'onduleur (Essai à vide).

②. Essai à charge

La figure 3. 35, représente l'évolution de la haute tension à la sortie du transformateur, en charge, en fonction de la tension continue d'entrée de l'onduleur, pour les quatre valeurs de fréquence en utilisant les quatre transformateurs. La charge est le générateur d'ozone décrit dans le chapitre V.

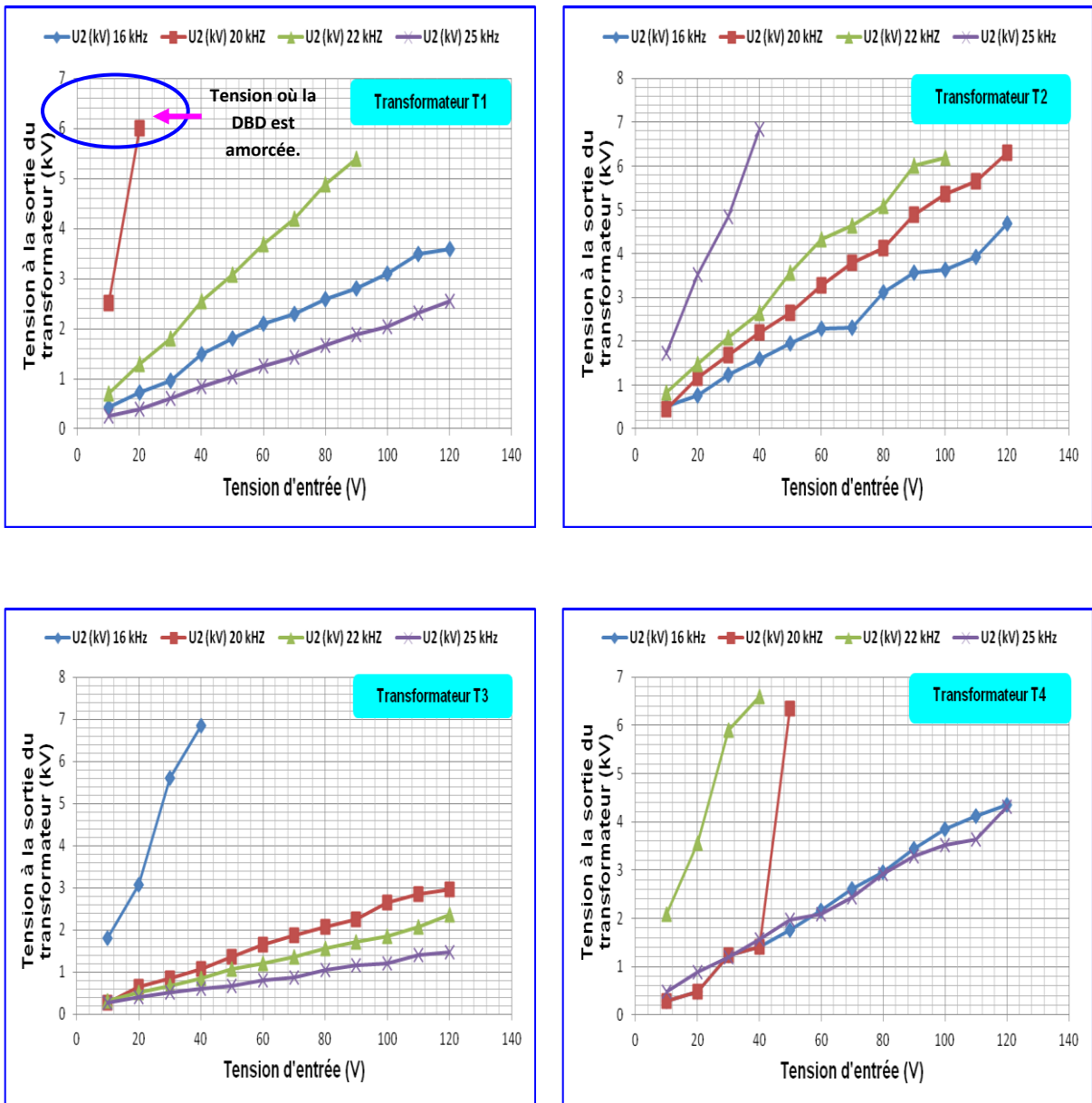


Figure 3. 35 : Évolution de la haute tension à la sortie de chaque transformateur en fonction de la tension continue d'entrée de l'onduleur (Essai à charge).

Nous observons que la haute tension à la sortie de chaque transformateur augmente d’une manière quasi-linéaire, avec la tension continue d’entrée de l’onduleur, dans le cas d’une fréquence fixée. En effet, l’alimentation haute tension fonctionne selon le principe d’un générateur HT à circuit résonnant. Les fréquences de fonctionnement de chaque transformateur sont différentes selon le mode de fonctionnement de l’alimentation, à vide ou à charge.

Nous remarquons que la haute tension obtenue à charge est plus élevée car le générateur d’ozone, qui est une charge capacitive, permet de former avec l’inductance du transformateur un circuit résonnant. Le système alimentation-générateur DBD exhibe, donc un comportement résonant. Le principe de ce dernier permet de faire fonctionner le système du générateur d’ozone à des puissances plus faibles comparativement à son fonctionnement à vide. En effet, à charge, des tensions dépassant **6 kV** sont obtenues pour une tension d’entrée inférieure à **40 V** alors qu’à vide, des tensions d’entrée plus élevées sont nécessaires.

Le résultat obtenu est satisfaisant, puisqu’il apparaît que chaque transformateur possède sa propre fréquence de fonctionnement. Dans le **tableau 3. 2** sont données les valeurs des fréquences de fonctionnement pour chacun des quatre transformateurs.

Tableau 3. 2 : Valeurs des fréquences de fonctionnement pour chaque transformateur.

Transformateur T ₁	Transformateur T ₂	Transformateur T ₃	Transformateur T ₄
20 kHz	25 kHz	16 kHz	22 kHz

Pour chaque transformateur utilisé, nous avons calculé la puissance consommée de notre générateur dont les résultats sont regroupés dans le **tableau 3. 3** où I, U représentent le courant et la tension (respectivement) de l’onduleur à charge et **P** représente la puissance consommée par le générateur.

Tableau 3. 3 : Puissances consommées du générateur d’ozone pour chaque transformateur.

Fréquences (kHz)	Courant I (A)	Tension U (V)	Puissance P (W)
20 (T ₁)	0,6	30	18
25 (T ₂)	1,4	40,7	56,98
16 (T ₃)	0,55	53,9	29,645
22 (T ₄)	0,4	55	22

À l'égard des résultats du tableau ci-dessus, il ressort que les transformateurs T_1 et T_4 fonctionnant à des fréquences respectives de **20** et **22 kHz**, produisant une DBD efficace à des puissances moindres par rapport aux deux autres transformateurs

Pour conclure sur ce rapide tour d'horizon concernant les transformateurs, nous retiendrons la facilité d'obtenir des tensions de sortie de l'ordre de plusieurs milliers de Volts avec quelques dizaines de Volts seulement en entrée.

3. 6. Réalisations de deux alimentations électriques à base de temporisateur NE555

L'obtention d'une décharge à pression atmosphérique requiert la réduction des distances inter-électrodes ainsi qu'une différence de potentiel entre ces électrodes de l'ordre des kilovolts au minimum. La première étape de ce chapitre a donc été de réaliser un circuit d'alimentation permettant d'obtenir ces tensions sur une plage de fréquence utile la plus large possible, en considérant les parties puissance et commande. Dans le souci de toujours augmenter la fréquence et afin de mener à bien ce projet, il a été nécessaire de concevoir d'autres alimentations hautes tensions hautes fréquences.

Comme extension à ce travail et parallèlement à la première alimentation (onduleur + driver + commande), nous avons monté deux autres alimentations, toutes les deux à base du circuit intégré **NE555**. Ces deux alimentations, applicables à une vaste gamme d'applications de la décharge à barrière diélectrique, ne sont pas détaillées dans ce chapitre pour ne pas encombrer la thèse. Sur le plan électrique, les deux circuits utilisent chacun une alimentation de **12V** (pour alimenter la partie commande : le **NE555**) avec une conception basée sur des composants électroniques classiques, donc peu onéreuse.

Les circuits électriques ainsi que des prises de vue de ces deux alimentations figurent en **annexe A**.

3. 7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche argumentée pour alimenter une DBD via un transformateur haute tension à haute fréquence et plus particulièrement un ozonateur. Elle consiste fondamentalement à contrôler la fréquence et l'amplitude du signal.

Nous avons proposé un convertisseur statique (onduleur) pour alimenter notre générateur d'ozone qui représente une des structures le mieux adapté à des développements au niveau de la commande. Cette dernière est assurée par le 16F84A, le microcontrôleur des plus

séduisants à utiliser : simple et peu coûteux. Le bon fonctionnement de l'onduleur nécessite l'utilisation d'interrupteurs de type IGBT.

Nous avons brièvement présenté deux composants essentiels pour l'alimentation : le transistor MOSFET de type IRF740 et l'IGBT qui pourraient également trouver d'autres applications que l'alimentation des DBDs, pourvu qu'elles soient à basse puissance (pour le MOSFET), moyenne et haute puissance (pour l'IGBT).

Nous avons aussi conçu deux autres alimentations : une première alimentation à base d'un circuit intégré NE555 et une seconde à base de deux circuits intégrés NE555.

De façon à valider le rôle de notre alimentation haute tension et d'un point de vue applicatif, ce résultat semble intéressant puisqu'il montre l'amorçage de la décharge à barrière diélectrique à partir de cette alimentation. C'est ce que nous allons étudier dans les prochains chapitres.

4. 1. Introduction

Dans cette partie, nous allons traiter l'étude de la décharge de surface à barrière diélectrique (DBD surfacique). Au cours de cette partie, nous allons nous attacher à l'étude des caractéristiques électriques régissant la décharge de surface à barrière diélectrique. Sachant que le fait de créer des espèces réactives au contact de la barrière puisse être exploité pour le traitement de l'air et la conservation des produits agroalimentaires, les deux domaines d'application vaste des plasmas froids qui nous intéressent dans ce chapitre, un réacteur a donc été conçu pour répondre aux deux exigences citées auparavant.

4. 2. Stratégie choisie : Traitement de l'air intérieur par plasma

Les études sur la stérilisation par plasma ont débuté au cours des années **90**. La recherche porte sur l'application des plasmas pour la stérilisation d'objets médicaux mais également pour la décontamination des produits alimentaires. Bien que tous ces systèmes aient le même but, ils présentent des modes de fonctionnement très variés. On peut les classer par exemple selon ce qui suit :

- ✿ La pression à laquelle le traitement s'effectue : basse pression ou pression atmosphérique ;
- ✿ Le positionnement des surfaces traitées par rapport à la décharge produite ;
- ✿ Le gaz utilisé ou encore le type de décharge.

Le choix de la pression entraîne une cinétique spécifique des espèces actives responsables de l'effet biocide ; leur durée de vie est a priori plus longue à basse pression qu'à pression atmosphérique. Un tel choix conditionne également le dispositif expérimental avec la nécessité éventuelle d'un système de pompage. Ceci est un handicap pour l'intégration du procédé dans l'industrie. Dans notre cas, seul le travail à pression atmosphérique est envisageable.

Traiter l'air serait une solution pour en faire un lieu sans odeur et en même temps sain, exempt de toute pollution. La manière la plus simple d'"éliminer " une odeur désagréable est de la masquer par une autre. Le traitement de l'air par plasma est une nouvelle technologie qui a fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches.

4. 3. Dispositif expérimental

Afin de mener cette étude paramétrique, il a été nécessaire de concevoir plusieurs plaques. Nous avons ainsi regardé l'influence du matériau du diélectrique (deux modèles), épaisseur du diélectrique (deux plaques) et les types d'électrodes (trois plaques).

4. 3. 1. Matériaux

La [figure 4. 1](#) montre les configurations typiques de DBD surfacique. Le dispositif de la décharge ([figure 4. 2](#)) est constitué de deux électrodes collées sur chacune des faces d'une plaque de matériau diélectrique. En fonctionnement, le plasma s'étend sur la surface de la plaque, sur une face ([figure 4. 1\(a\)](#)) ou les deux faces ([figure 4. 1 \(b\)](#)) de la plaque.

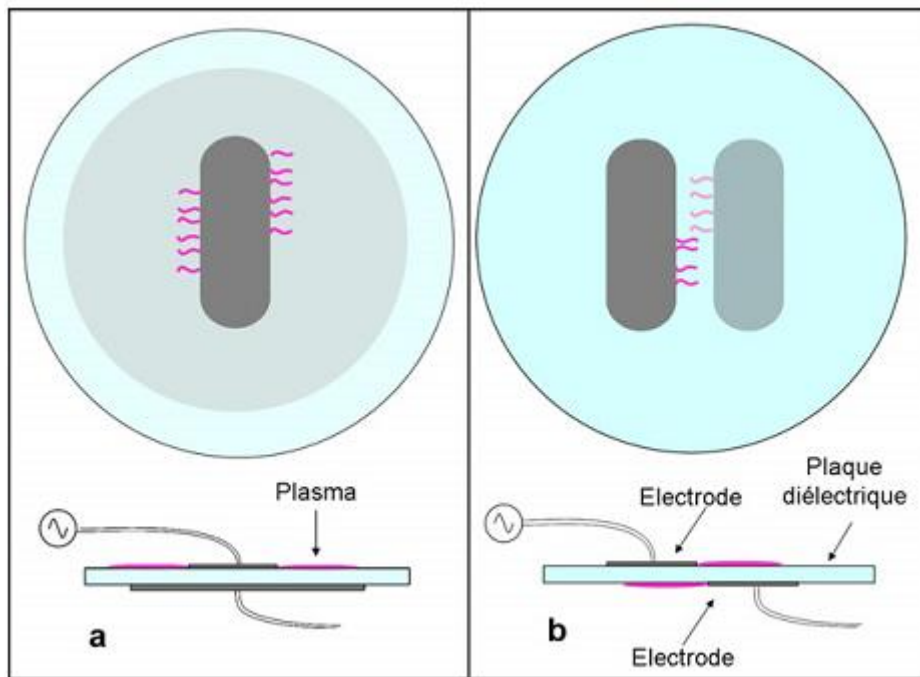


Figure 4. 1 : Configuration de DBD surfacique avec le plasma sur une face seulement (a) ou sur les deux faces (b) [21].

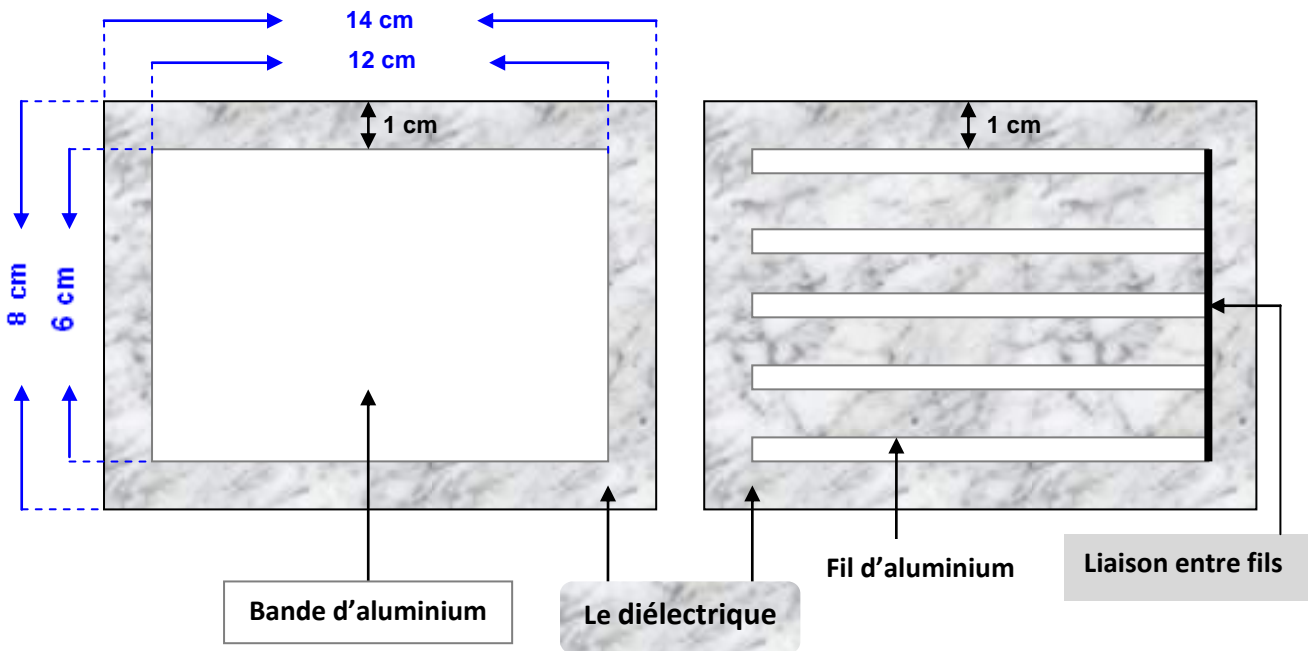


Figure 4. 2 : Vue de dessous et de dessus de la cellule pour la décharge en surface.

4. 3. 2. Électrodes

La plupart des réacteurs à DBD peuvent être assemblés à partir de matériaux simples. Par exemple, une décharge cylindrique peut être facilement obtenue à partir d'éléments tels que grille, tige filetée, tube en verre. Les décharges pointe-plan sont plus délicates à mettre en place car dans ce cas il faut contrôler le rayon de courbure de la pointe.

Les décharges de surface posent un autre problème : on ne peut pas coller des bandes métalliques sur une plaque de verre... sans colle. Un dépôt métallique serait une solution, mais il s'agit d'un procédé coûteux et qui ne permet pas de changement facile de configuration d'électrode. La solution retenue a été la confection d'électrode à partir de scotch aluminium commercial à résine conductrice. Cette solution a pour avantage sa facilité de mise en œuvre et sa souplesse : un changement de configuration d'électrode devient une opération légère et rapide. C'est d'ailleurs la solution souvent utilisée dans les laboratoires.

Trois types d'électrodes, de dimension **120 mm × 4 mm** chacune, ont été testés. Il s'agit d'électrodes reliées à la haute tension et représentant un certain nombre de fils d'aluminium (**1, 3 et 5**) collés sur la surface du diélectrique. L'électrode de masse désignant l'électrode reliée à la terre, est une bande d'aluminium de **120 mm × 60 mm**.

Une prise de vue de l'électrode haute tension et l'électrode de masse est représentée dans la [figure 4.3](#).

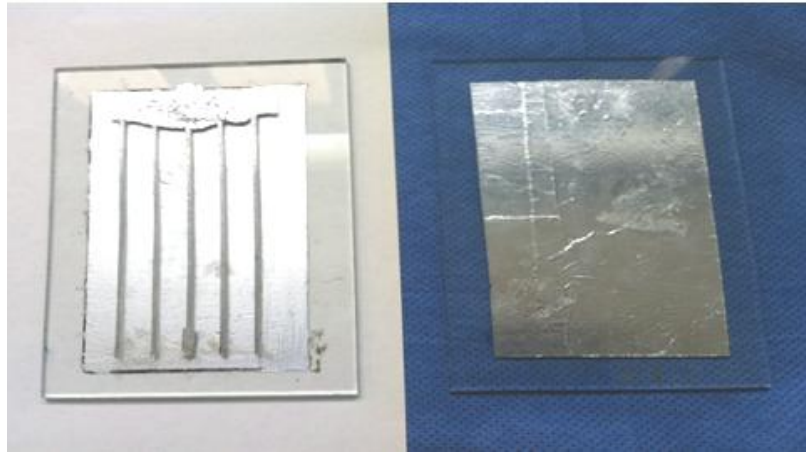


Figure 4. 3 : Photographie de l'électrode haute tension (à gauche) et l'électrode de masse (à droite).

4. 3. 3. Plaque de diélectrique

Le constituant de base de la plaque est en verre et mesure **14 cm** de longueur et **8 cm** de largeur, pour deux épaisseurs différentes (**2 mm** et **3 mm**). Un autre type de plaque a été utilisé : deux plaques en céramique de **8 cm** de longueur et **4 cm** de largeur, pour deux épaisseurs différentes (**2 mm** et **3 mm**).

4. 3. 4. Principe et configuration de la décharge

La décharge est établie à la surface de la surface isolante, diélectrique, entre les deux électrodes disposées de part et d'autre de l'isolant. Ces électrodes sont des bandes d'aluminium de faible épaisseur et collées directement sur la surface du diélectrique. Plusieurs paramètres (nature et épaisseur du diélectrique, nombres de fils de l'électrode active) seront précisés au fur et à mesure de la présentation des résultats.

Pour obtenir la décharge, on applique une haute tension alternative sinusoïdale entre les deux électrodes, l'une d'entre elles étant reliée à la terre. *Par la suite, nous considérons la configuration classique suivante : sur la face supérieure, l'électrode active désigne l'électrode reliée au signal HT et sur la face inférieure, l'électrode de masse désigne l'électrode reliée à la terre.* Lorsque la haute tension est appliquée, un plasma de couleur bleutée se forme à la surface du diélectrique sur une seule face. Il s'étend à l'extrémité d'une électrode vers l'extrémité la plus éloignée de l'électrode opposée (figure 4. 4) et est réparti de façon assez homogène le long des électrodes.

La figure 4.5 montre une photo de la décharge surfacique (de jour comme de nuit) qui s'étend d'une première électrode HT (fil 1) vers une deuxième électrode HT (fil 2) et ainsi de suite jusqu'à la cinquième électrode HT (fil 5).

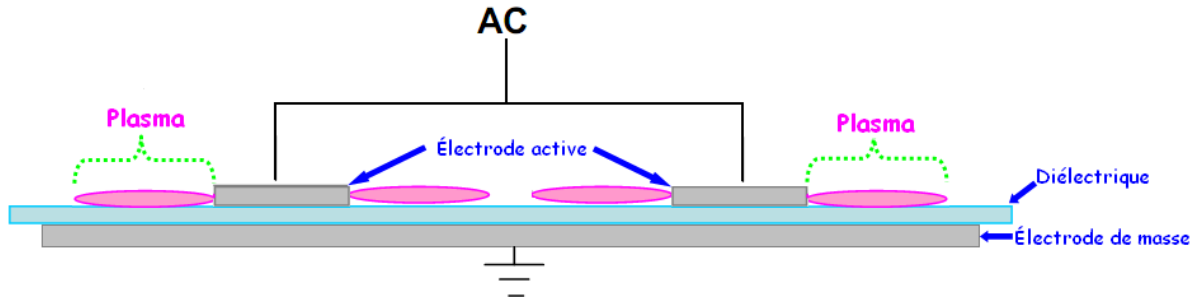


Figure 4.4 : Schéma de principe de la décharge.

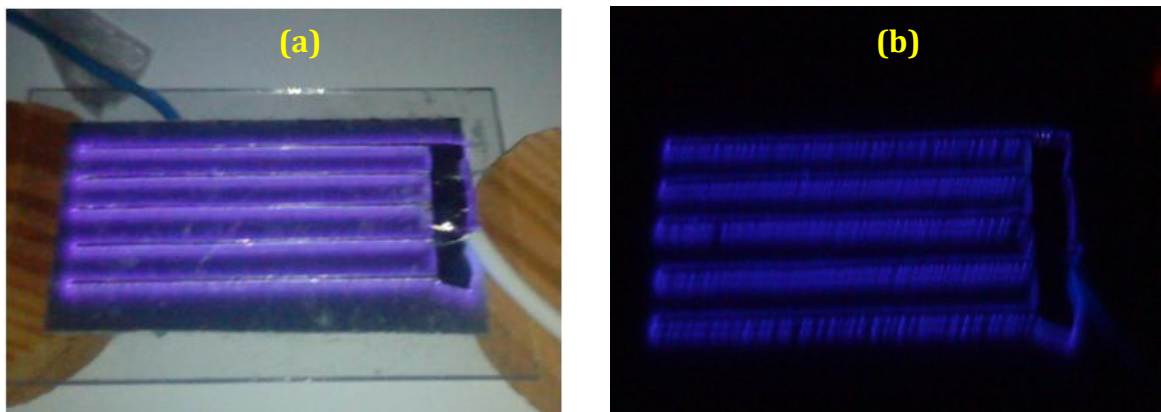


Figure 4.5 : Photos de la décharge surfacique.
(a) - jour, (b) – nuit.

4.4. Circuit électrique

Le schéma type du circuit électrique est montré sur la figure 4.6. L'électrode haute tension est alimentée par une alimentation sinusoïdale à 50 Hz, via un autotransformateur alimentant un transformateur haute tension haute fréquence, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ❖ Tension primaire **220V (50 Hz)**
- ❖ Tension secondaire **15 kV (fréquence 22 kHz)**.

L'électrode opposée est reliée à la terre via une résistance de mesure de valeur **100Ω**. Cette résistance est utilisée pour mesurer les signaux de courant instantané produits par la décharge. La haute tension appliquée est donnée par un voltmètre électrostatique raccordé au transformateur élévateur de tension dont la valeur est réglée par une source de tension

continue variable de marque LEYBOLD-HERAEUS, 0-250 V, I_{\max} 6A. Tous les signaux sont affichés par l'oscilloscope numérique de marque GW INSTRON, modèle GDS-840C, 2 voies échantillonnant à 250 MHz.

Une prise de vue du banc expérimental est représentée dans la [figure 4. 7](#).

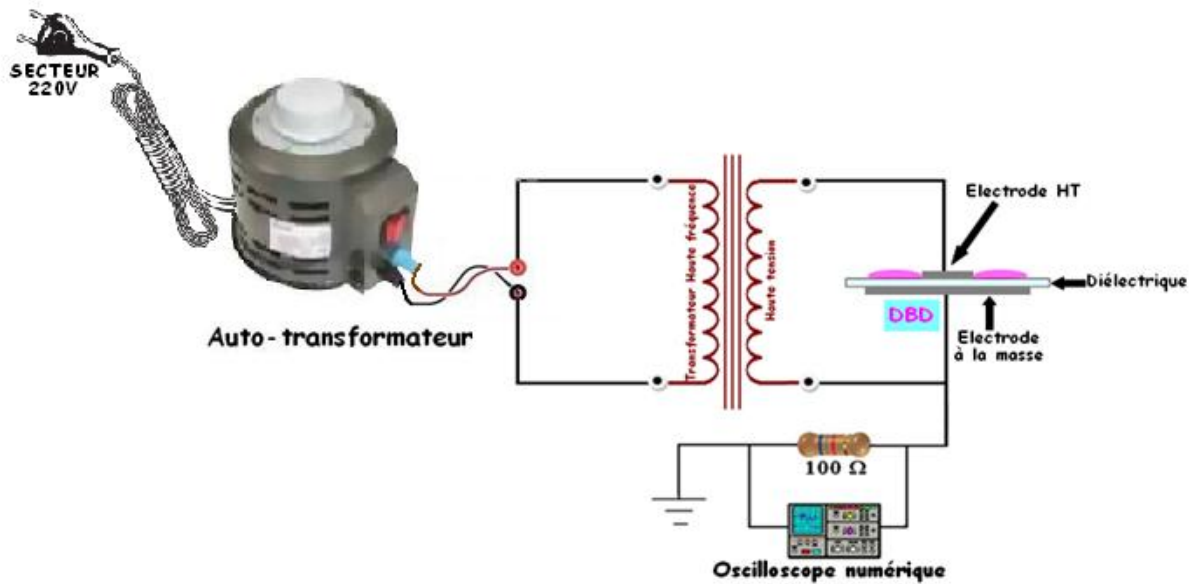


Figure 4. 6 : Circuit électrique pour alimenter une DBD de surface.

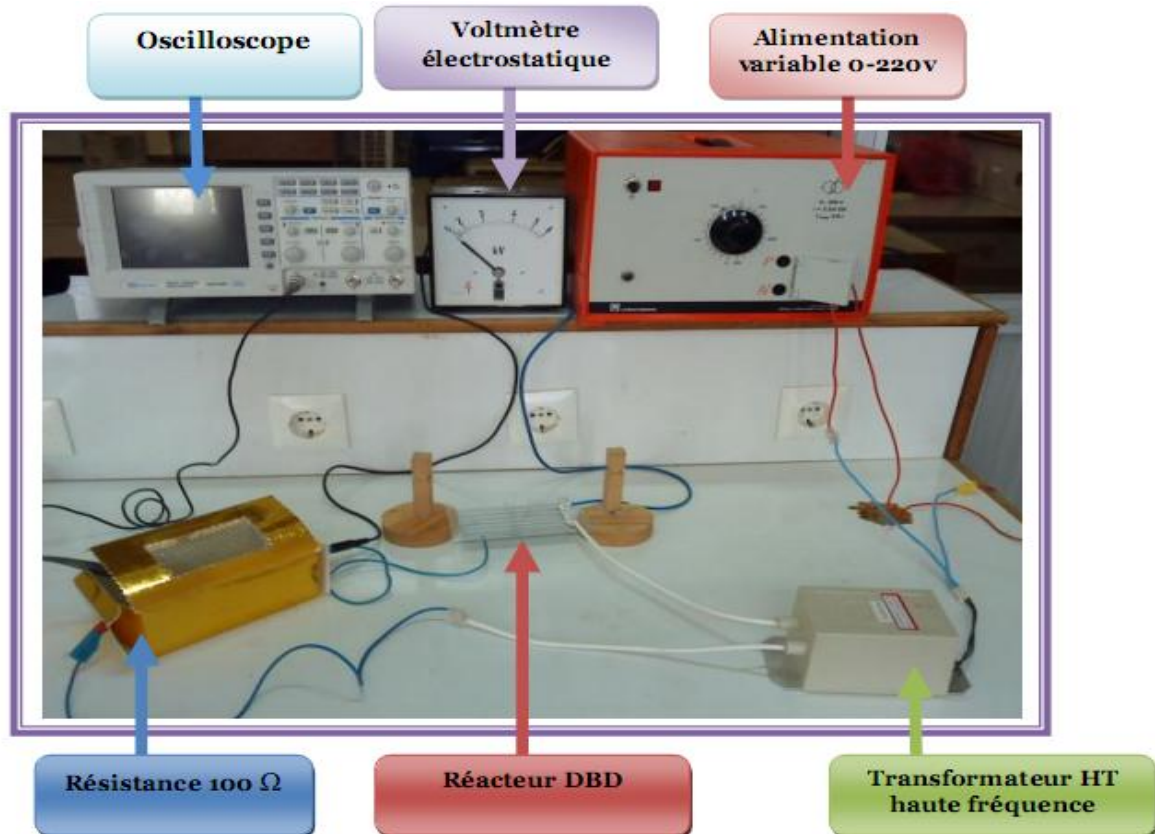


Figure 4. 7 : Photo du banc expérimental de la DBD surfacique.

4. 5. Quels paramètres tester ?

Comme nous venons de l'évoquer, le comportement électrique de la cellule de décharge surfacique dépend de nombreux paramètres, soit électrique (tension appliquée), soit géométrique (épaisseur du diélectrique) ou soit relatif à la nature de l'électrode haute tension et au matériau du diélectrique. Dans cette partie, nous allons donc présenter l'étude de l'influence de ces paramètres. Les critères déterminants sur lesquels nous nous baserons pour déterminer la configuration électrique la plus favorable sont la maximisation de la charge impulsionnelle, et la minimisation de la consommation énergétique (réduction du coût de traitement). Cette étude électrique n'est cependant pas suffisante pour choisir le meilleur réacteur. Elle sera complétée, dans la dernière partie de ce chapitre, par l'étude de l'efficacité de traitement de l'air et la conservation des produits agroalimentaires. Il sera alors possible de déterminer la configuration expérimentale permettant le meilleur compromis entre capacité de traitement et coût énergétique.

4. 5. 1. Matériau diélectrique : verre

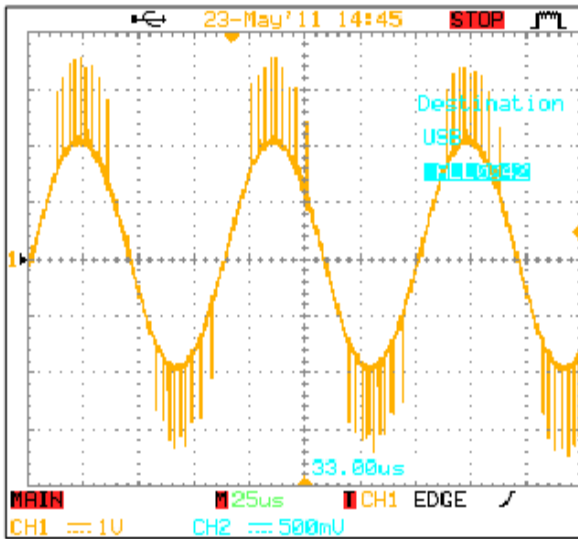
4. 5. 1. 1. Influence de l'épaisseur du diélectrique

Afin d'analyser l'influence de l'épaisseur sur la décharge, nous avons utilisé deux barrières d'épaisseurs différentes : **2 mm** et **3 mm** et une électrode haute tension à "**3 fils**". L'effet de l'épaisseur sur la caractérisation courant-tension est illustré par les [figures 4. 8](#) et [4. 9](#) pour différentes valeurs de tensions (**1 kV - 4 kV**).

Les résultats de l'amplitude de courant prélevée sur les oscillogrammes sont illustrés par la [figure 4. 10](#).

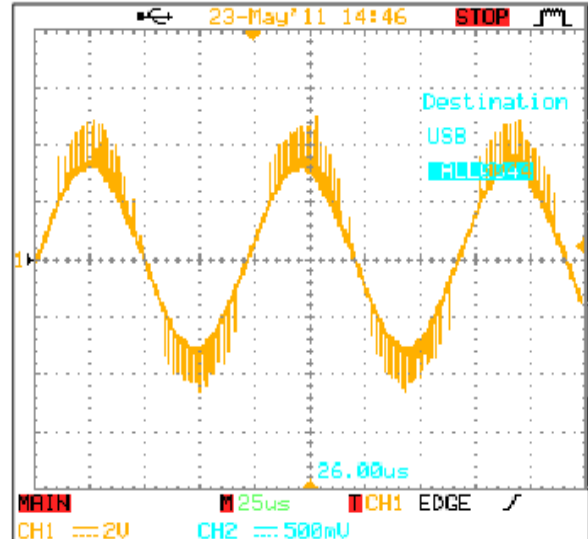
La puissance électrique consommée est elle aussi un bon indicateur des effets de l'épaisseur et de la tension. Le calcul de la puissance est obtenu en effectuant le produit de la tension d'alimentation par l'amplitude du courant de décharge visualisé sur l'oscilloscope.

La [figure 4. 11](#) montre les puissances calculées en fonction de la tension appliquée pour les deux valeurs de l'épaisseur.



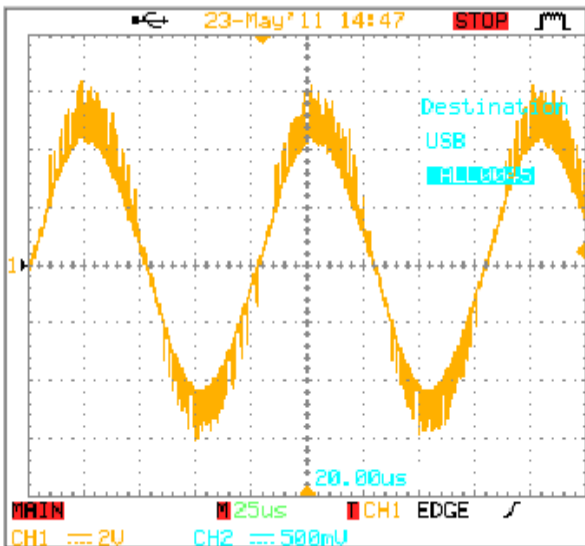
1 kV/div., 25 μ s/div.

1 kV



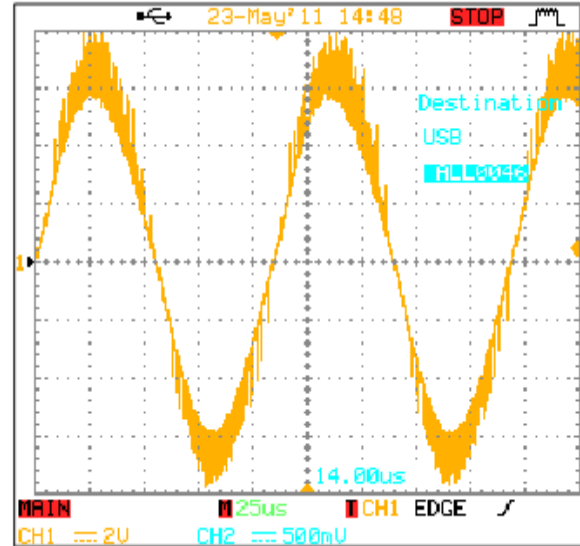
2 kV/div., 25 μ s/div.

2 kV



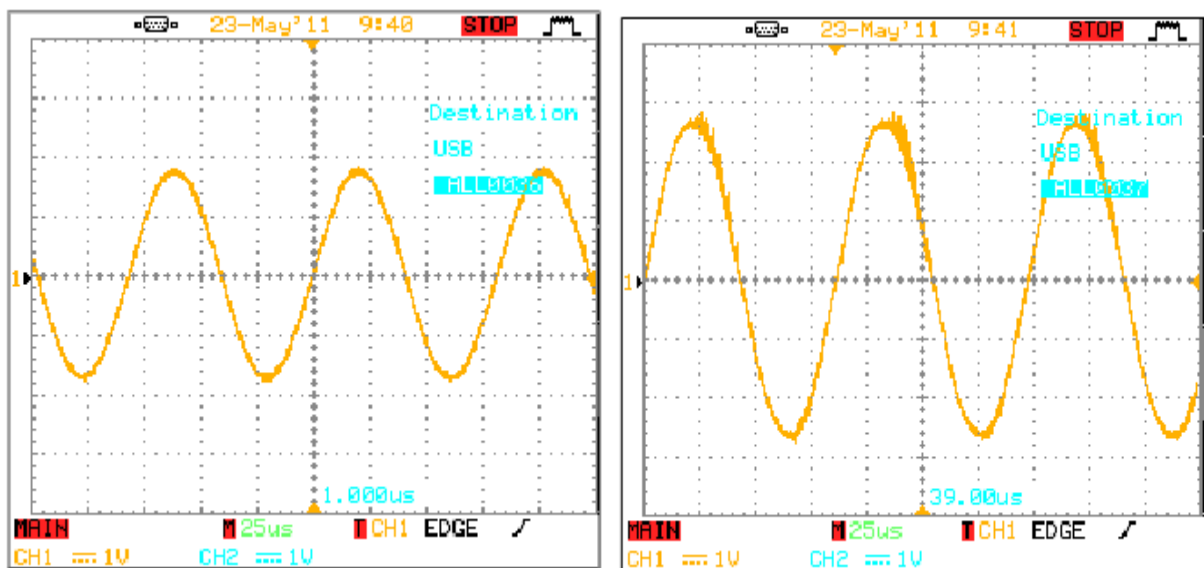
2 kV/div., 25 μ s/div.

3 kV



4 kV

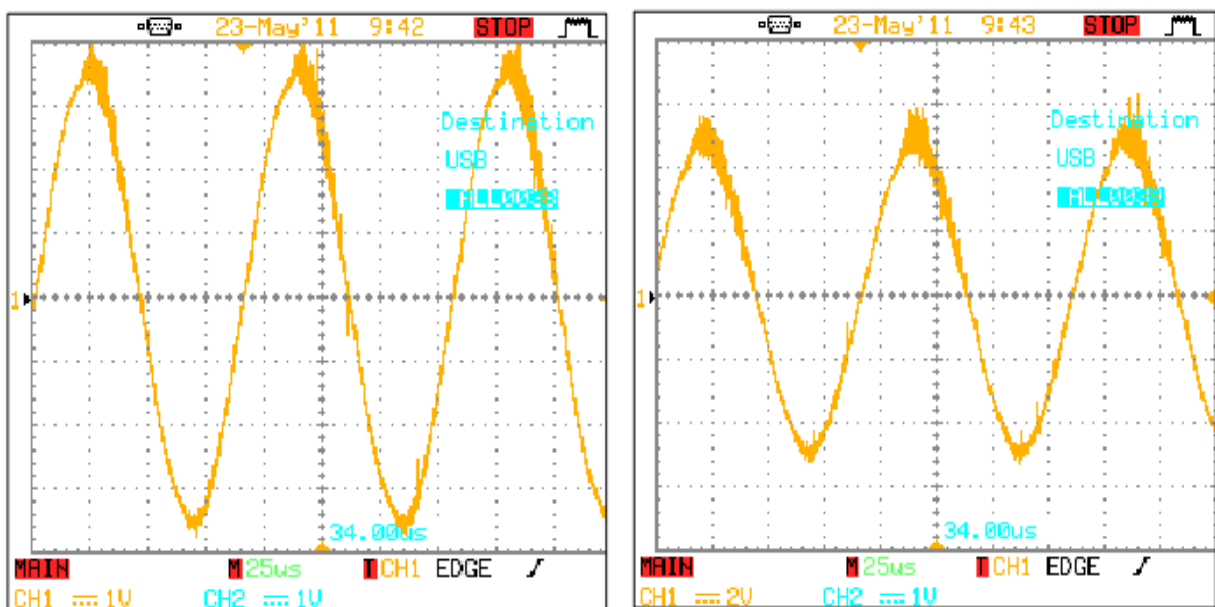
Figure 4. 8 : Oscillogrammes de courant pour plusieurs valeurs de la tension appliquée.
Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm.



1 kV/div., 25 μ s/div.

1 kV

2 kV



1 kV/div., 25 μ s/div.

2 kV/div., 25 μ s/div.

3 kV

4 kV

Figure 4. 9 : Oscillogrammes de courant pour plusieurs valeurs de la tension appliquée.
Diélectrique : verre, épaisseur : 3 mm.

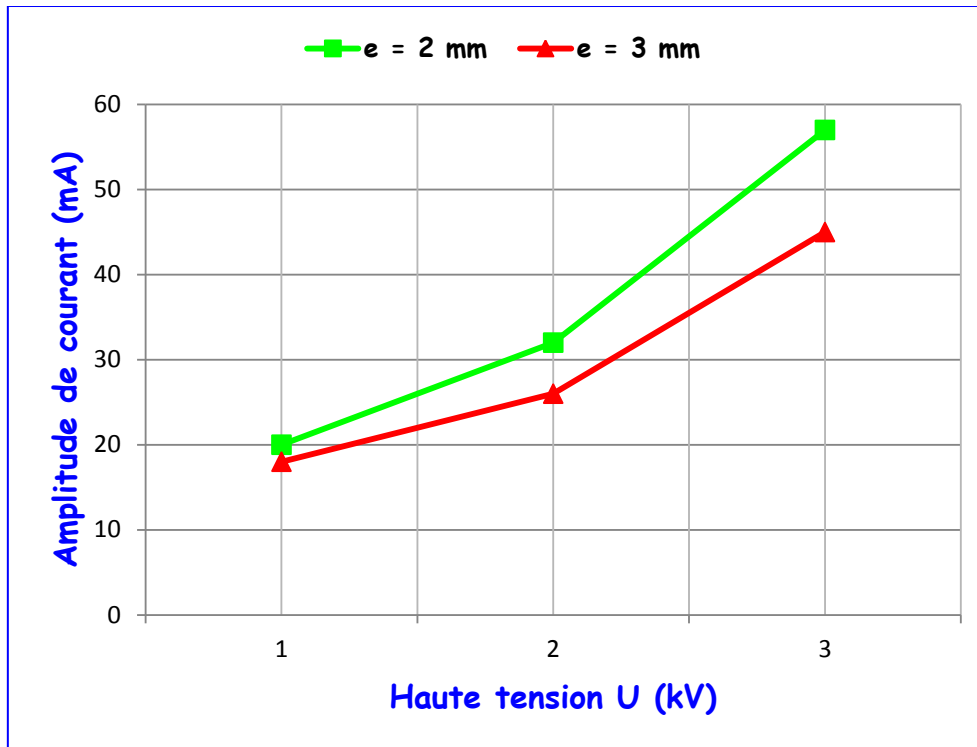


Figure 4. 10 : Caractéristique "courant - tension" pour les deux valeurs de l'épaisseur du verre.

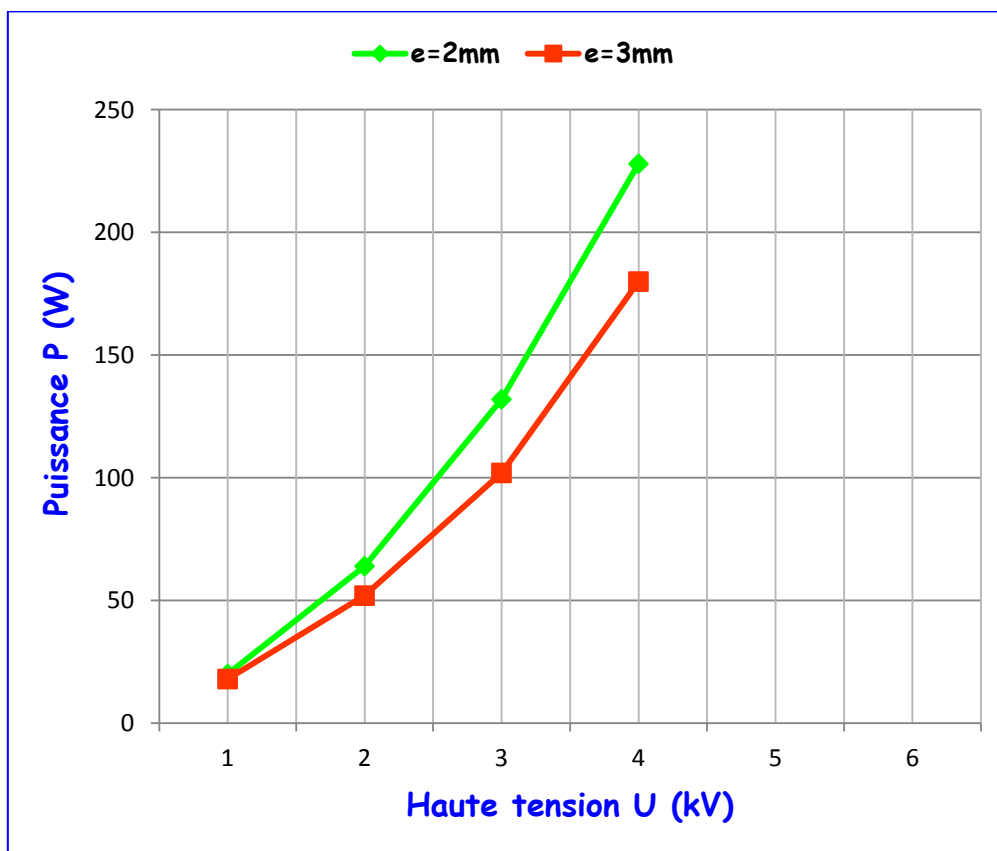


Figure 4. 11 : Caractéristique "puissance - tension" pour les deux valeurs de l'épaisseur du verre.

Interprétation

Les premiers résultats ont été obtenus en ne considérant que l'influence de l'épaisseur du verre, pour plusieurs valeurs de la tension appliquée. Nous avons établi les points suivants :

- *L'épaisseur de la barrière a une grande influence sur la valeur du courant et la puissance consommée.*
- *En augmentant l'épaisseur, le courant diminue. Une logique est évidente car une épaisseur plus grande correspond à une résistance plus élevée, par conséquent un courant faible.*
- *La puissance consommée semble fortement influencée par l'épaisseur. Il est donc recommandé d'utiliser des barrières diélectriques aussi fine que possible pour générer des puissances plus élevées avec des tensions plus faibles.*
- *Néanmoins, cette épaisseur ne peut être inférieure à une certaine valeur pour éviter la rupture électrique et mécanique du diélectrique.*

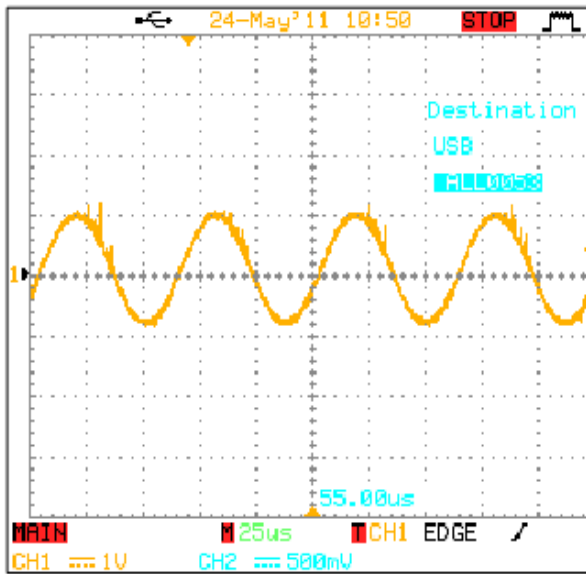
Gardons à l'esprit ces deux formes de courbes (caractéristique "courants - tension" et "puissance - tension") car nous allons les retrouver au cours de l'étude de l'influence du nombre de fils.

4. 5. 1. 2. Influence du nombre de fils

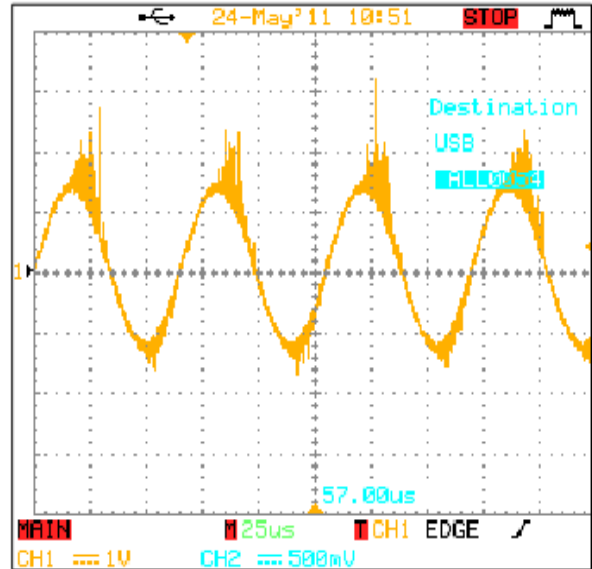
L'influence de la configuration de l'électrode haute tension a été étudiée au moyen de trois cellules à DBD. Ces cellules sont de conceptions strictement identiques. Seul varie le nombre de fils constituant l'électrode haute tension. Les nombres considérés sont de **1**, **3** et **5** fils.

Nous avons utilisé la même cellule et le même diélectrique d'une épaisseur constante de **2 mm** pour discuter l'influence de l'électrode haute tension sur la décharge.

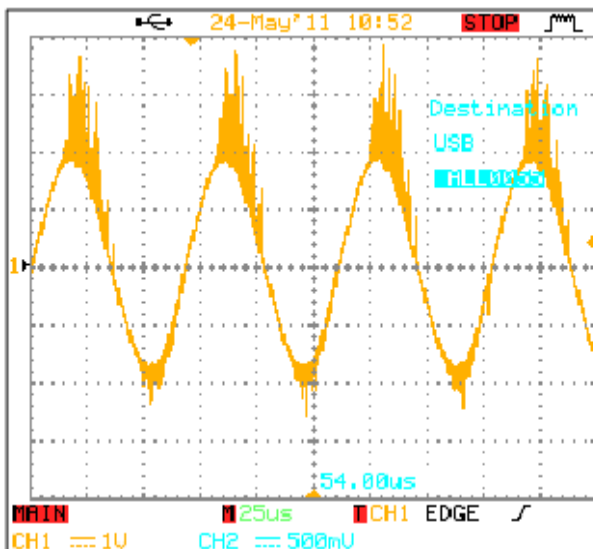
Nous avons relevé les oscillogrammes de courant pour les trois types d'électrodes dont les figures représentatives pour **1** fil, **3** fils et **5** fils sont [4. 12](#), [4. 13](#), [4. 14](#) respectivement.



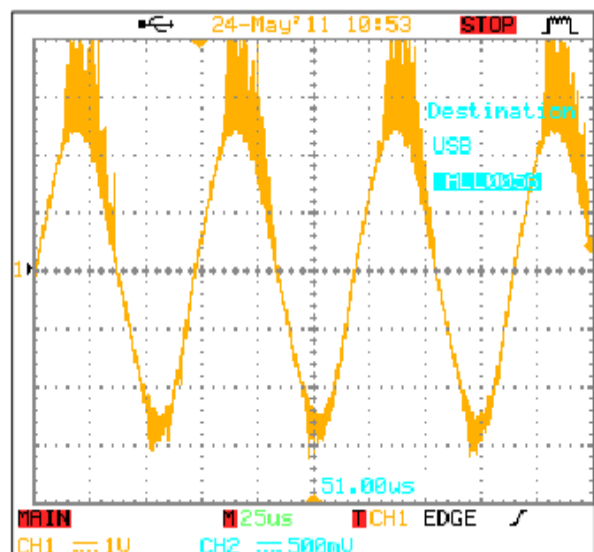
1 kV



2 kV

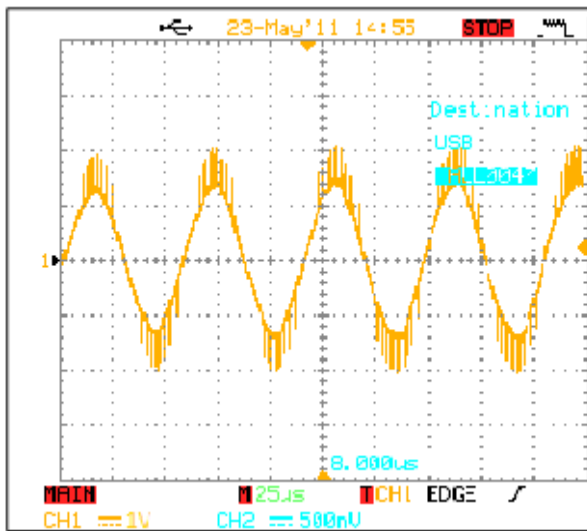


3 kV



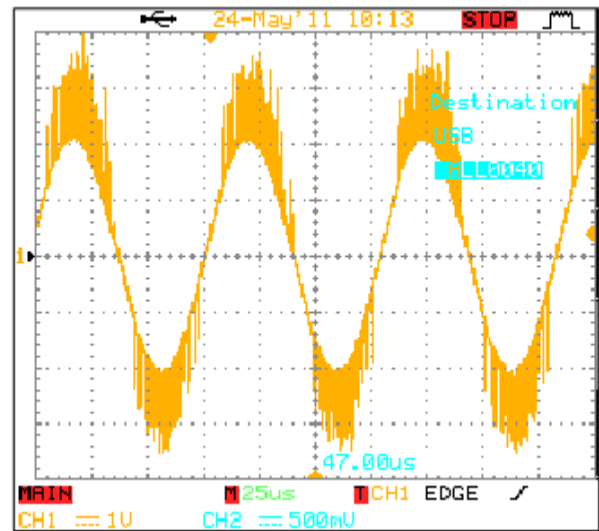
4 kV

Figure 4. 12 : Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de tension.
Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm, nombre de fil : 1.
1 kV/div., 25 μ s/div.

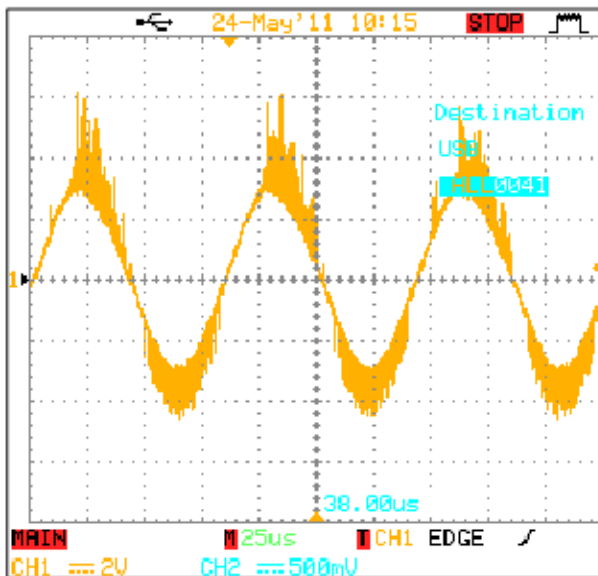


1 kV

1 kV/div., 25 μ s/div.

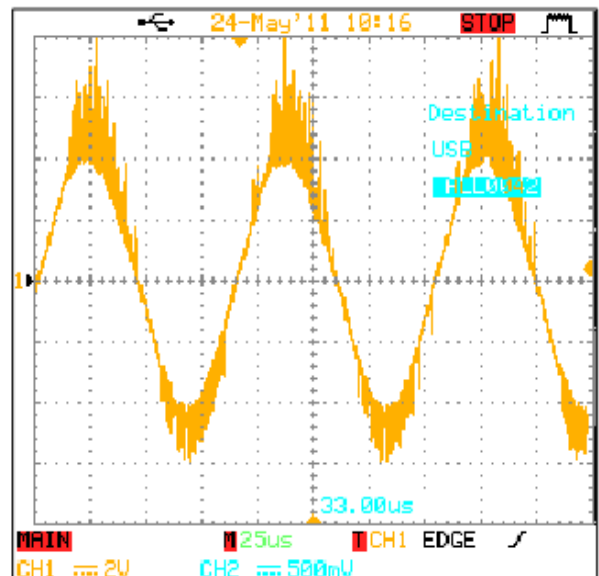


2 kV



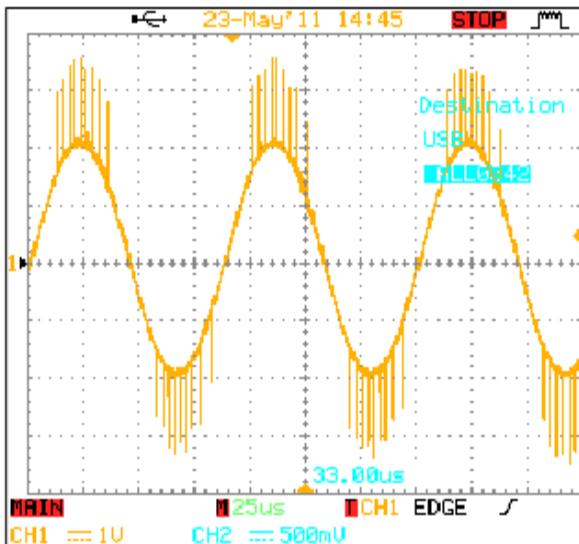
3 kV

2 kV/div., 25 μ s/div.



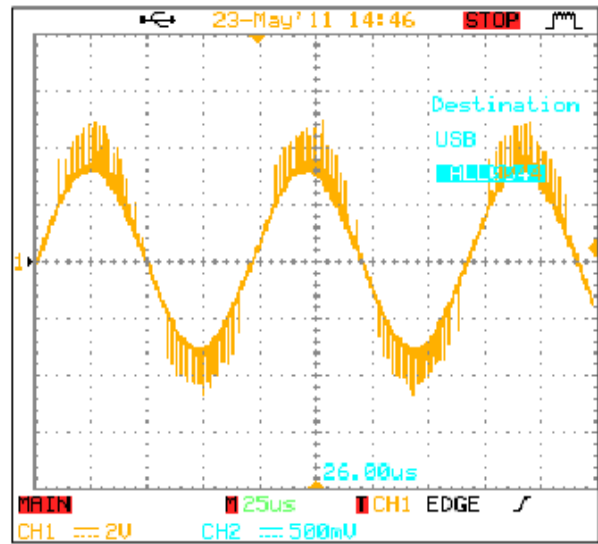
4 kV

Figure 4. 13 : Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de tension.
Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm, nombre de fils : 3.



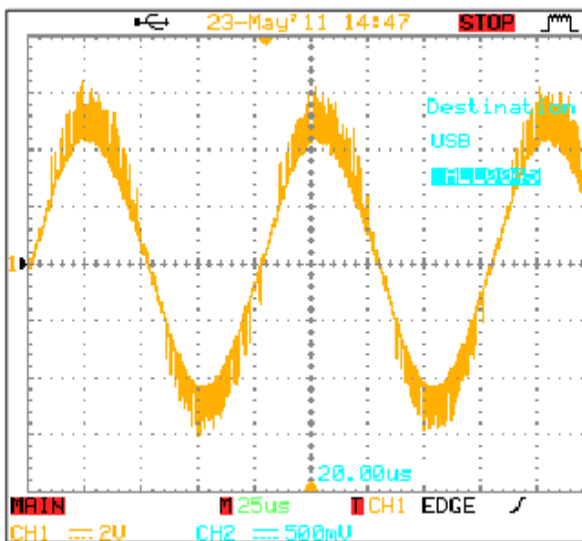
1 kV/div., 25 μs/div.

1 kV



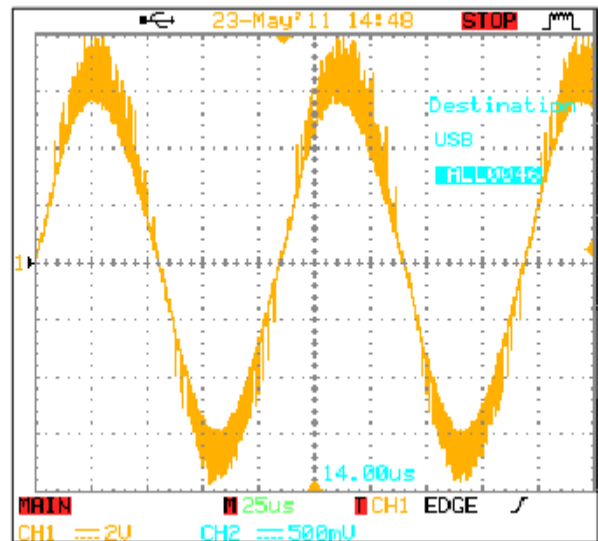
2 kV/div., 25 μs/div.

2 kV



2 kV/div., 25 μs/div.

3 kV



4 kV

Figure 4. 14 : Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de la tension.
Diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm, nombre de fils : 5.

Les résultats de l'amplitude de courant sont illustrés par la [figure 4. 15](#) et la [figure 4. 16](#) montre les puissances calculées en fonction de la tension appliquée pour les trois configurations de l'électrode haute tension et l'épaisseur fixe du diélectrique.

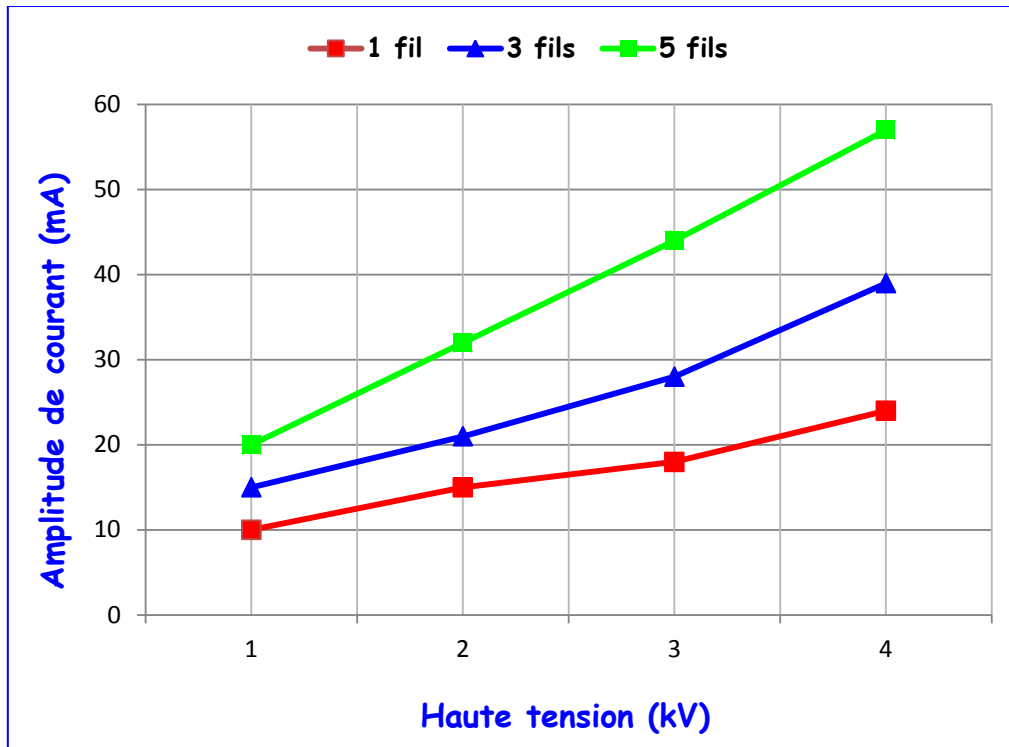


Figure 4. 15 : Caractéristique "courant - tension" pour les trois configurations de l'électrode haute tension, diélectrique : verre, épaisseur : 2 mm.

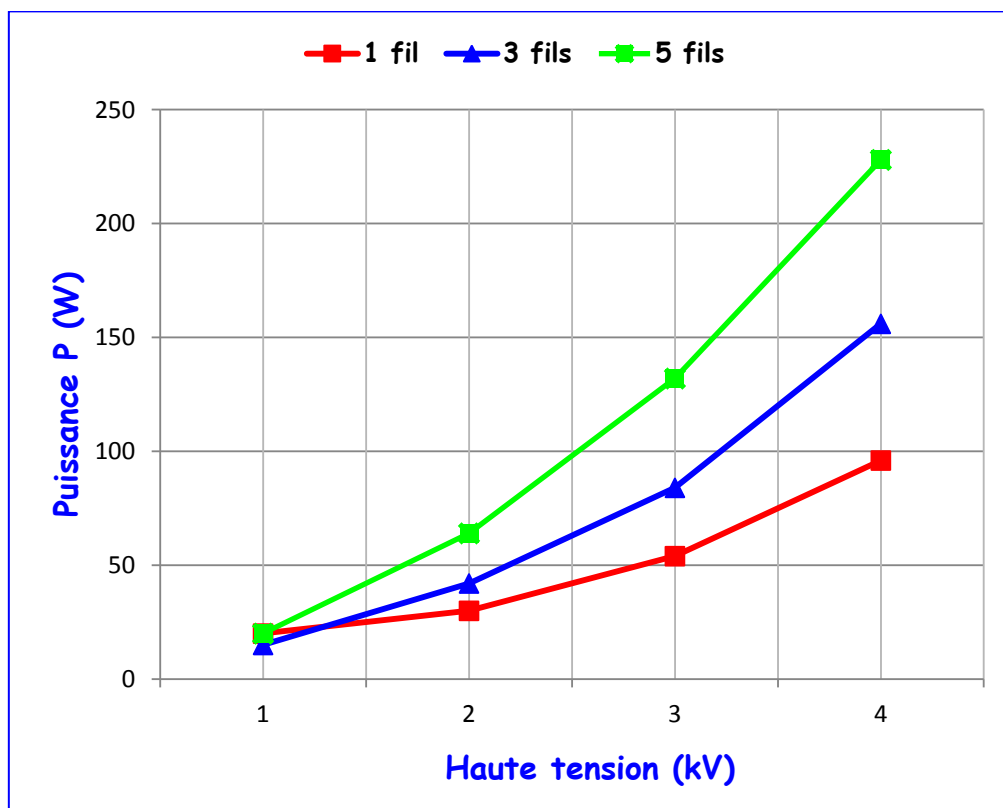


Figure 4. 16 : Caractéristique "puissance - tension" pour les trois configurations de l'électrode haute tension, épaisseur : 2 mm.

Interprétation

Il ressort de ces résultats que les caractéristiques "courant - tension" et "puissance – tension " ont la même forme que ses consœurs en [figure 4. 10](#) et [4. 11](#), et pourtant les protagonistes ne sont pas les mêmes. Ces caractéristiques révèlent plusieurs propriétés : Le nombre de fils constituant l'électrode haute tension a une influence significative sur la puissance de la cellule. Cela montre tout simplement que lorsqu'on augmente le nombre de fils, le courant augmente donc la distribution de la densité de courant sur la surface d'électrodes augmente elle aussi. En effet, afin de produire plus d'ozone, il faut générer des puissances plus grandes et des valeurs de courant plus élevées. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser plusieurs fils sur le diélectrique pour générer d'importantes décharges. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser un nombre élevé de fils et diminuer la tension appliquée.

4. 5. 2. Matériau diélectrique : céramique

4. 5. 2. 1. Influence de l'épaisseur du diélectrique

Dans cette partie et dans le but de voir l'influence de l'épaisseur de céramique, nous avons utilisé deux barrières d'épaisseurs différentes : **2 mm** et **3 mm** et une électrode haute tension "**3 fils**". L'effet de l'épaisseur sur la caractérisation "courant-tension" est illustré par les [figures 4. 17](#) et [4. 18](#) pour différentes valeurs de tensions (**1 kV - 6 kV**).

Les résultats de l'amplitude de courant sont illustrés par la [figure 4.19](#) et la [figure 4. 20](#) montre les puissances calculées en fonction de la tension appliquée pour les deux valeurs de l'épaisseur.

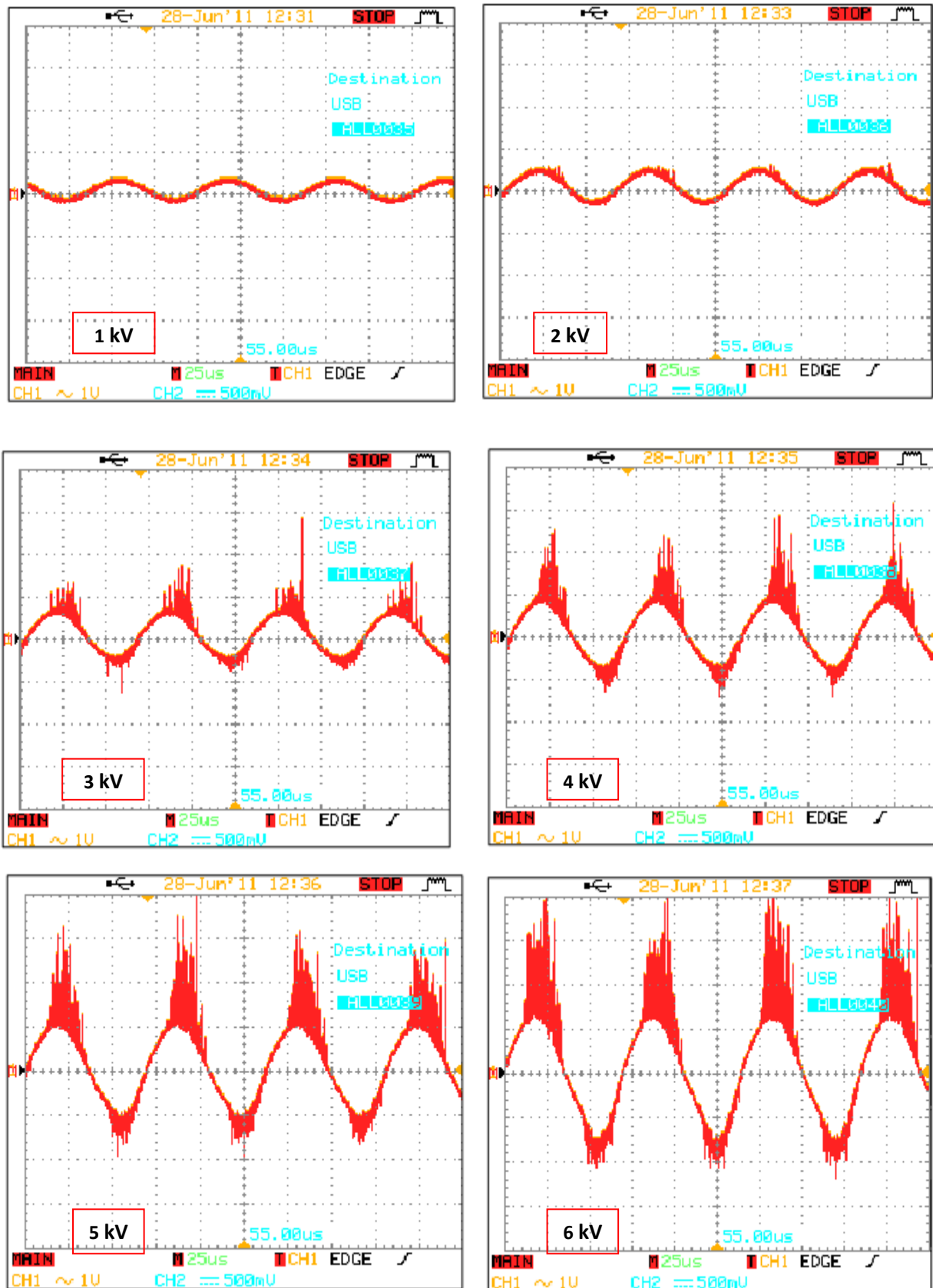


Figure 4. 17 : Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de la tension.

Diélectrique : céramique, épaisseur : 3 mm.

1 kV/div., 25 μ s/div.

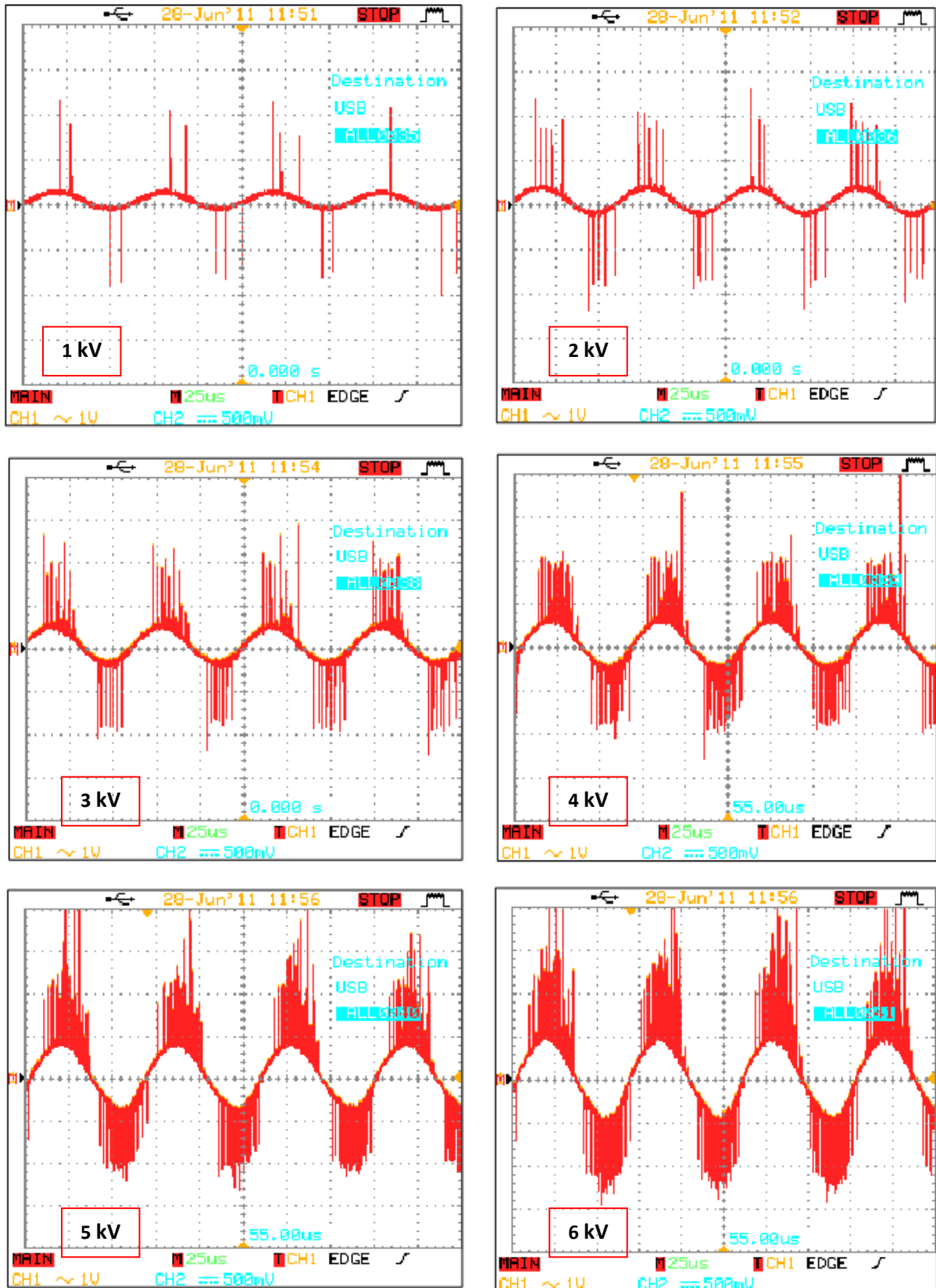


Figure 4. 18 : Oscillogrammes de courant pour différentes valeurs de la tension.
 Diélectrique : céramique, épaisseur : 2 mm.
 1 kV/div., 25 μ s/div.

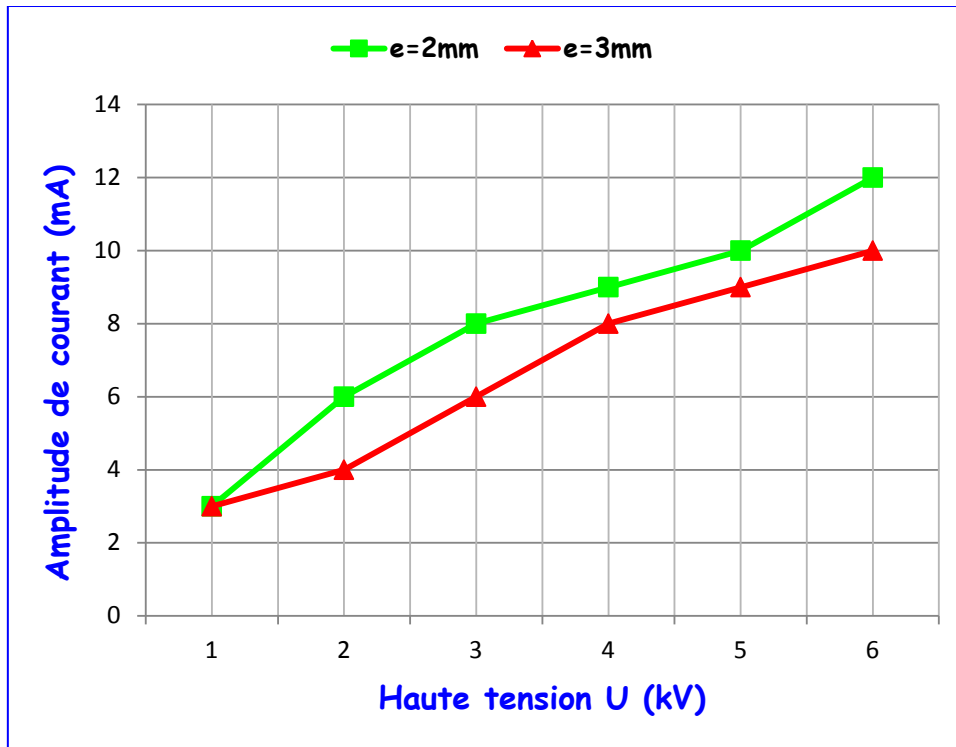


Figure 4. 19 : Caractéristique "courant - tension" pour les deux valeurs de l'épaisseur de la céramique.

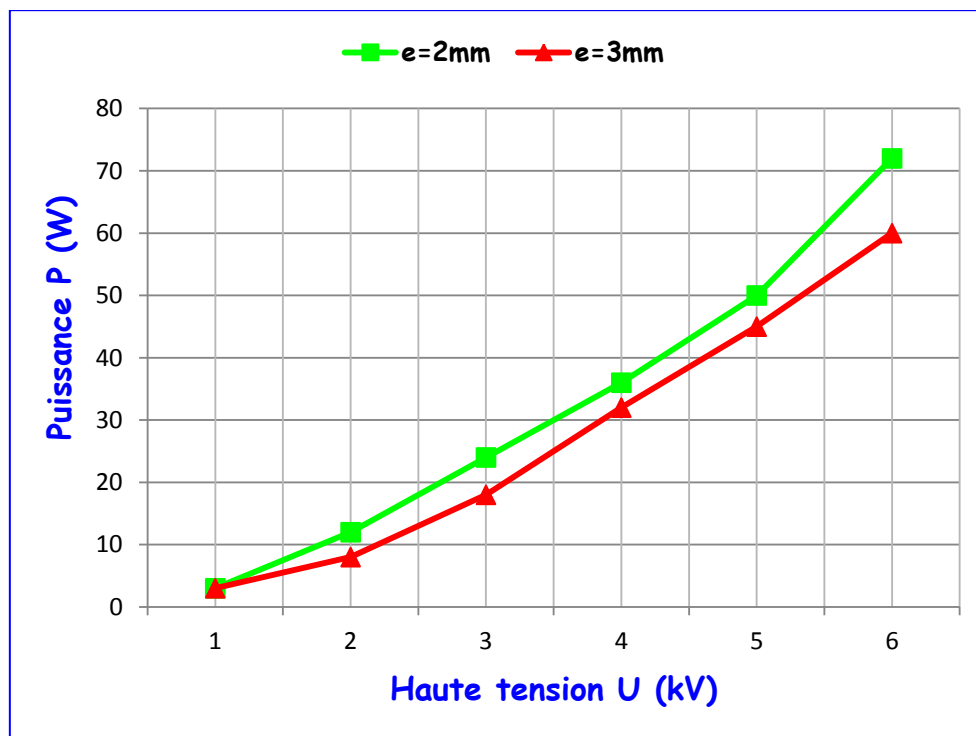


Figure 4. 20 : Caractéristique "puissance - tension" pour les deux valeurs de l'épaisseur de la céramique.

Interprétation

Ces deuxièmes résultats ont été obtenus en ne considérant que l'influence de l'épaisseur de la céramique, pour plusieurs valeurs de la tension appliquée. On constate que le courant est plus important pour une épaisseur de **2 mm** que pour **3 mm**. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des diélectriques aussi fins que possible pour générer plus d'ozone avec des tensions appliquées plus faibles.

4. 5. 3. Influence de la nature du diélectrique : Étude comparative

Le comportement électrique de la cellule de décharge dépend fortement de la nature du diélectrique. Ce paramètre joue à la fois sur les propriétés physiques et chimiques du système. Cette étude comparative a été déjà menée avec la cellule à **3 fils** (électrode haute tension), les deux diélectriques étant le verre et la céramique, de **2 mm** d'épaisseur chacun, pour quatre tensions : **1, 2, 3 et 4 kV**. Les oscillogrammes de courants sont déjà représentés sur les figures 4. 10 (verre) et 4. 19 (céramique).

Les résultats récapitulatifs de l'amplitude de courant sont illustrés par la figure 4. 21 et la figure 4. 22 montre les puissances en fonction de la tension appliquée pour les deux diélectriques.

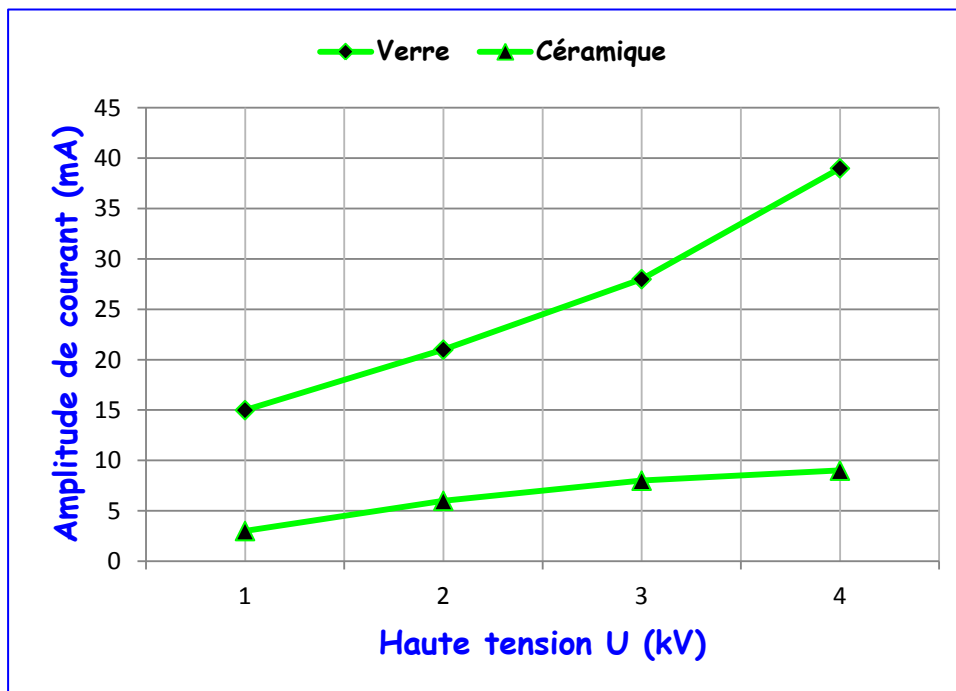


Figure 4. 21 : Caractéristique "courant - tension" en fonction de la nature du diélectrique : verre et céramique, épaisseur = 2mm, nombre de fils = 3.

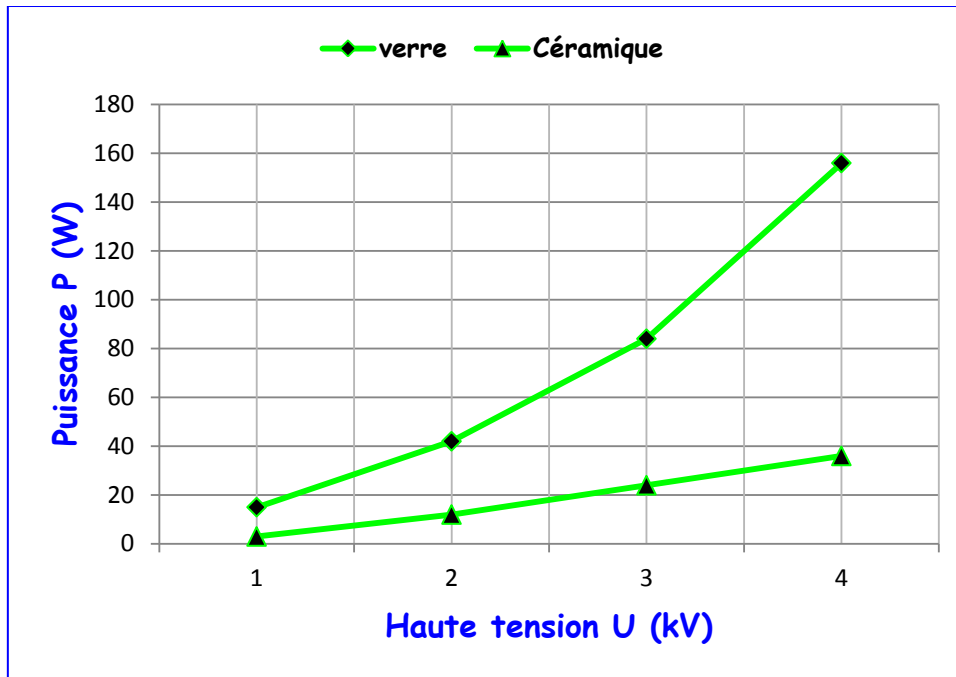


Figure 4. 22 : Caractéristique "puissance - tension" en fonction de la nature du diélectrique : verre et céramique, épaisseur =2mm, nombre de fils = 3.

Interprétation

L'observation des courbes (fig. 4. 21 et 4. 22) nous permet d'établir clairement que la décharge à barrière diélectrique est plus intense lorsque le diélectrique est en verre. En effet, la permittivité diélectrique du verre varie entre 2 et 9, par contre celle de la céramique prend quelques centaines [12]. Étant donné cette propriété spécifique du verre par rapport à la céramique, le verre reste le matériau pouvant être projeté au plasma, mais l'étendue des propriétés physiques des céramiques induit de nombreuses applications industrielles vu le bon comportement de cette classe de matériau aux températures élevées. En outre, la céramique résiste même aux chocs et aux manipulations. En effet, plusieurs barrières en verre ont été cassées par la chaleur de la DBD. Il ya du verre qui résiste aux températures élevées mais son coût est trop élevé.

4. 6. Caractéristique électrique du plasma

Dans les décharges à barrière diélectrique, les passages de charges se font via des pics de courants très courts. Leur durée, de quelques dizaines de nanosecondes, représente une difficulté expérimentale. Il y a deux échelles de temps à considérer : l'échelle nanoseconde pendant laquelle se déroule un pic de courant, ou bien la période entière permettant d'observer la distribution des pics (figure 4. 23). Ces deux mesures apportent des informations

différentes. Dans le cas de notre cellule (DBD surface), la mesure de courant est particulièrement ardue car elle est très sensible aux perturbations du circuit électrique. Les mesures sur lesquelles nous nous appuyons pour illustrer la discussion ont été faites dans une configuration monoface avec une tension $U = 6 \text{ kV}$.

En plaçant une résistance dans le circuit comme le montre la [figure 4. 6](#), il est possible de déterminer la caractéristique courant-tension de la décharge ainsi que la puissance électrique consommée. La caractéristique, présentée à la [figure 4. 23](#), met en évidence un comportement capacitif et impulsionnel de la décharge.

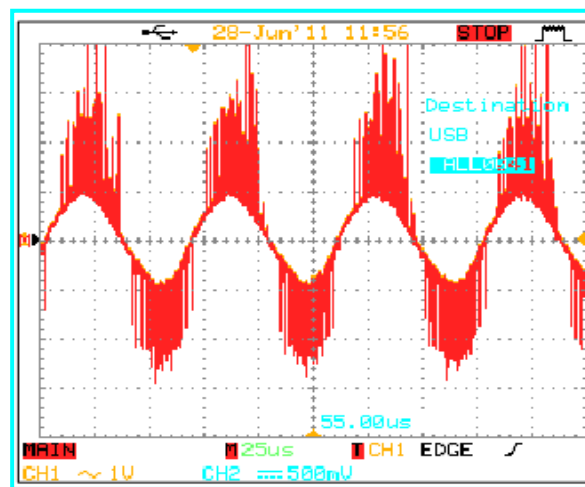


Figure 4. 23 : Caractéristique du courant de la décharge.

Le courant est constitué de séries d'impulsions apparaissant à chaque demi-période, s'initiant généralement à peu près au moment de l'inversion de polarité et s'éteignant après que la tension atteint sa valeur maximale. Cette forme de courant est typique des séries de micro-décharges qui apparaissent dans une décharge à barrière diélectrique. Les pics de courant peuvent atteindre des valeurs de **20 mA** mais pour des durées relativement courtes (de l'ordre de la ns). Enfin, en observant la courbe de la [figure 4. 23](#), on peut remarquer la présence d'une forte composante capacitive (composante sinusoïdale) sur laquelle viennent s'ajouter des pics d'intensités caractéristiques des micro-décharges qui se produisent à la surface du diélectrique. Cette composante s'explique par l'influence mutuelle des électrodes. On distingue une succession de décharges impulsionnelles très importantes pendant la période positive et la période négative (la cathode représentant 5 fils est au-dessus de la surface du diélectrique). La symétrie entre les impulsions positives et négatives apparaît clairement sur le courant. Sur la [figure 4. 23](#) apparaissent simultanément les contributions de la décharge de chaque côté du fil constituant l'électrode active (décharge autour du fil).

4. 7. Application pour la désinfection de l'air

Il y a dans l'industrie alimentaire un grand intérêt pour l'utilisation de l'ozone de manière à améliorer le stockage de produits alimentaires tels que fruits, légumes, fleurs, viande, poisson, fromage, etc.

Les applications les plus fréquentes de l'ozone dans l'industrie agro-alimentaire sont :

- Extension de vie de stockage en marché - qualité (conservation)
- Contrôle de germes pathogènes (désinfection)
- Ralentissement du processus de maturation des fruits et des légumes.

Peu a été publié concernant les concentrations de l'ozone exigées et d'autres procédures de traitement afin d'achever les résultats désirés, l'industrie agro-alimentaire considère généralement les détails des procédés comme des secrets de fabrication.

Les concentrations de l'ozone typiques utilisées pour le traitement d'aliments par l'air ambiant, comme par exemple dans des chambres froides, sont de l'ordre de **2 à 7 ppm** (particule par million) pouvant aller jusqu'à **20 ppm** [111]. Certains chercheurs pensent qu'en fait la croissance bactérienne pourrait être stimulée avec des concentrations d'ozone nettement inférieures à **0.1 ppm**. Les niveaux élevés d'ozone peuvent abîmer des fruits avec des taches noires, etc.

Notre travail consiste à purifier et désinfecter l'air, ce résultat est confirmé par la durée de conservation des produits agroalimentaires. La concentration d'ozone utilisée pour une bonne conservation est de **20 ppm**. Cette étude est destinée à la détermination de cette quantité d'ozone pour des périodes de traitements variables tous en sachant que la période de traitement pour des niveaux d'une réduction importante de germes pathogènes varie de quelques heures à quelques jours. Les virus et les bactéries sont les germes pathogènes les plus faciles à contrôler. Les champignons et moisissures exigent des concentrations d'ozone plus élevées pour des périodes de temps plus longues.

4. 7. 1. Chambres de traitement

Puisque le traitement plasma est effectué à pression atmosphérique, les contraintes au niveau des matériaux sont beaucoup moindres qu'à basse pression. C'est pourquoi le verre a été choisi pour fabriquer deux chambres de traitement pour sa faible réactivité vis-à-vis de l'ozone, il est assez étanche pour nos besoins, facilement usinable et sa transparence permettait d'observer facilement la décharge à l'intérieur. Le design rectangle a été choisi mais un design cylindrique aurait été tout à fait adéquat, puisque la forme de la chambre n'a

aucun effet sur la décharge. Un couvercle amovible s'adapte à la partie supérieure de la chambre pour faciliter l'accès à l'intérieur de celle-ci pour y placer la cellule DBD et les produits agroalimentaires.

- ✘ La chambre de longueur **50 cm**, largeur **25 cm**, hauteur **25 cm** sert de chambre témoin ;
- ✘ La chambre "air + ozone" de même dimensions que la chambre témoin, où nous avons installé la cellule DBD (figure 4. 2) et les produits agroalimentaires. Une ouverture sur le couvercle a été percée, permettant ainsi de recueillir et mesurer le taux d'ozone à l'intérieur de l'enceinte.

4. 7. 2. Description du dispositif expérimental

Nous détaillons l'installation expérimentale dans sa globalité pour la stérilisation de l'air. Le schéma descriptif du dispositif que nous avons utilisé est illustré sur la figure 4. 24. Il est constitué de :

- ✘ Un autotransformateur servant à alimenter le transformateur élévateur de tension,
- ✘ une cellule DBD surfacique composée de deux électrodes collées sur chacune des faces du diélectrique. L'électrode haute tension est constituée par 5 fils d'aluminium,
- ✘ Une enceinte en verre où siègent la cellule DBD et deux produits agroalimentaires.

La haute tension appliquée entre les deux électrodes disposées de part et d'autre du diélectrique produit un plasma surfacique qui génère de l'ozone. L'ozone produit est mesuré grâce à un analyseur d'ozone portable de marque O3TECHNOLOGIES qui permet de mesurer le taux d'ozone dans l'air en ppm.

4. 7. 3. Conditions opératoires

La cellule DBD est calibrée avec 5 fils d'aluminium sur sa face supérieure pour permettre une génération d'ozone autour de **20 ppm**.

De nombreuses expériences ont été effectuées sur deux produits (tomate et pomme) exposés ou non à l'ozone. Cet ozone généré par le réacteur DBD de surface est injecté à l'intérieur de la chambre de conservation pendant des durées d'application de **5, 10 et 15** secondes puis on éteint la décharge. Ensuite, le taux d'ozone dans l'air à l'intérieur de la cellule est prélevé à l'aide d'un analyseur d'ozone (figure 4. 25) à des intervalles de **2** minutes pendant une durée maximale de **56** minutes.

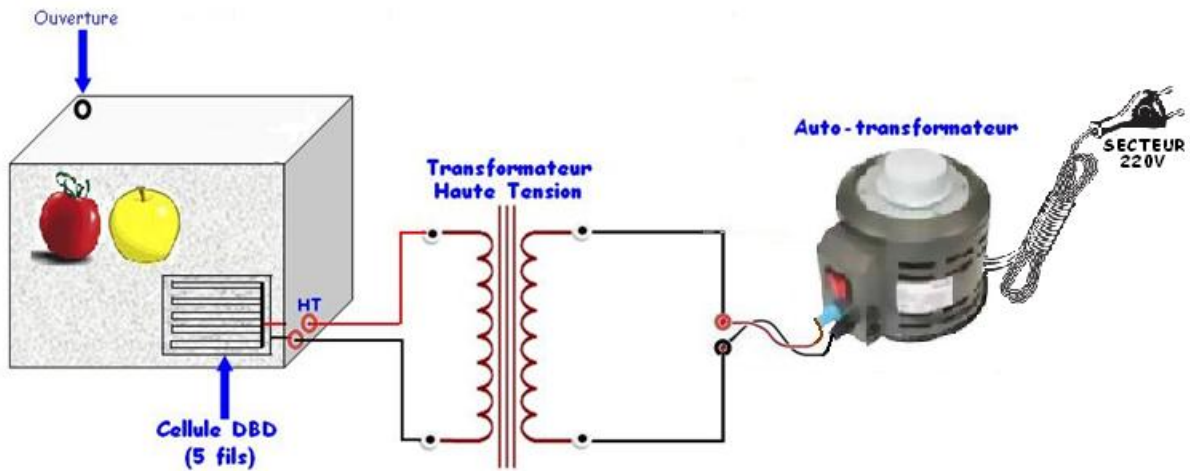


Figure 4. 24: Schéma descriptif du dispositif expérimental de désinfection de l'air.



Figure 4. 25 : Analyseur d'ozone.

🌈 **Première expérience :** On fixe la tension à **2,5 kV** et on fait varier le temps d'exposition (**5, 10 et 15** secondes) dans la chambre "air + ozone".

Les résultats sont illustrés sur la [figure 4. 26](#) qui présentent les concentrations d'ozone de la chambre durant l'essai.

🌈 **Deuxième expérience :** On fixe le temps d'exposition à **5** secondes et on fait varier la tension (**2,5 kV, 3 et 4 kV**).

Pour chaque valeur de la haute tension appliquée, les résultats sont illustrés sur la [figure 4. 27](#). Ces résultats sont exprimés sous la forme des concentrations d'ozone en ppm en fonction du temps en minutes.

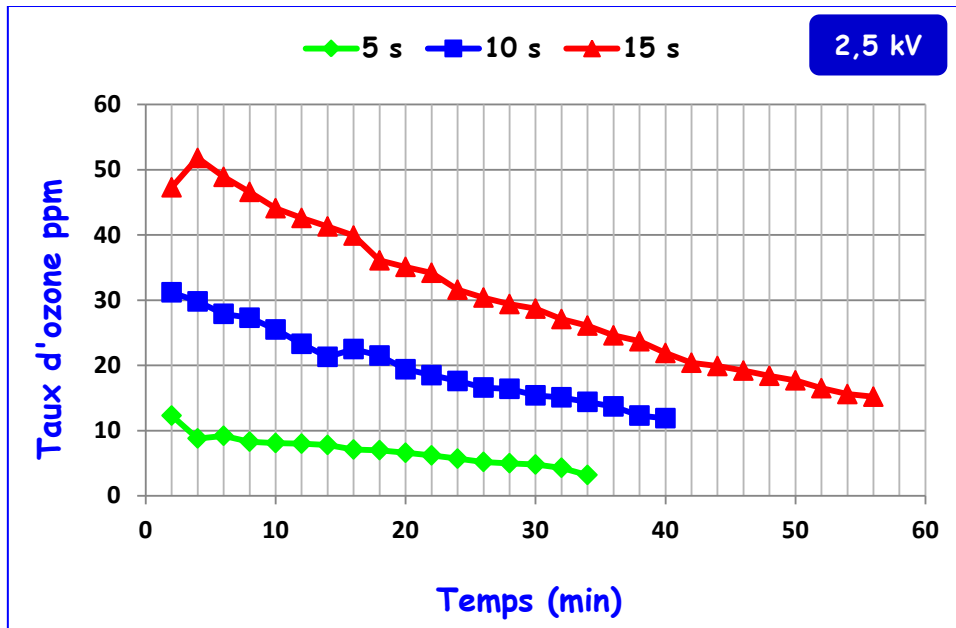


Figure 4. 26 : Réduction du taux d'ozone en fonction du temps, pour 3 durées d'application de la DBD et tension fixe.

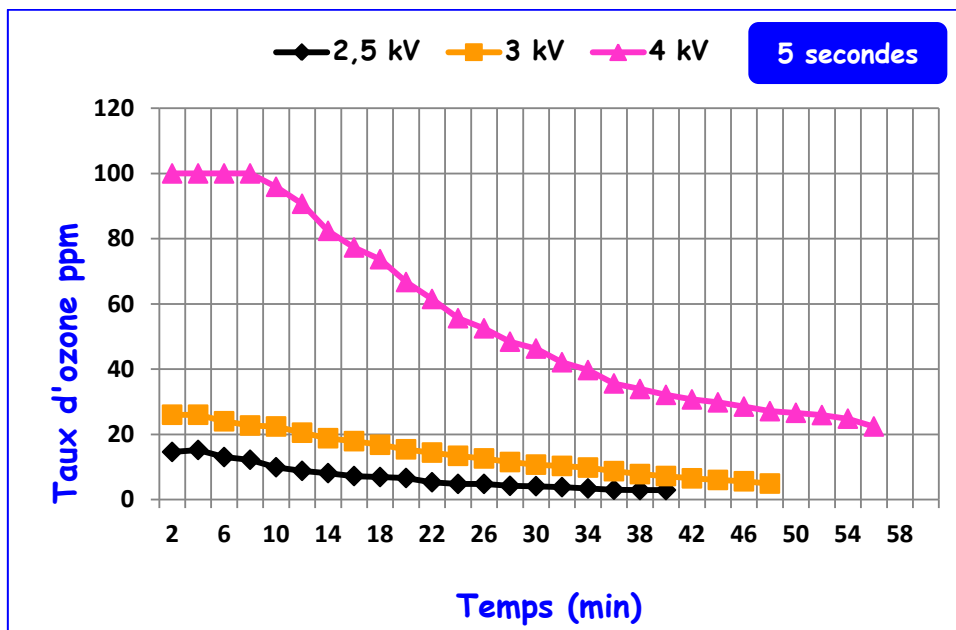


Figure 4. 27 : Réduction du taux d'ozone en fonction du temps, pour 3 valeurs de la tension appliquée et durée d'application de la DBD fixe.

On peut tirer de ces deux courbes que pour obtenir un taux d'ozone égal à **20 ppm**, on doit avoir une tension de **3 kV** pour une durée d'application de **5 s**. En outre, on remarque que, quelque soit la tension appliquée et quelque soit la durée d'application, le taux d'ozone diminue de moitié après une durée de **30 minutes**.

Afin de garder de l'ozone en quantité uniforme, il est recommandé de munir le système de désinfection d'un minuteur qui réenclenche la DBD au fur et à mesure pendant des durées brèves de quelques secondes.

4. 7. 4. Résultats obtenus

Au laboratoire, l'état de fraîcheur des deux échantillons (pommes et tomates) en expérience fut régulièrement contrôlé tous les **cinq jours** sur une observation faite sur chacun des échantillons : échantillon "témoin" et échantillon "air + ozone", par un examen des caractères organoleptiques, actuellement reconnus comme classiques :

- ①. Apparence générale des produits, aspect extérieur ;
- ②. Odeur ;
- ③. Fermeté des chairs, résistance à la pression ;
- ④. Coloration des chairs.

La pomme et la tomate, placées dans la chambre "air + ozone" qui sont soumises à un traitement par ozone, ont vu leur rendement de conservation augmenté chaque **5 jours** par rapport aux mêmes produits placés dans la chambre "témoin".

La [figure 4. 28](#) présente les deux plateaux testés le premier jour de traitement, **5 jours** après ([figure 4. 29](#)) et **10 jours** après ([figure 4. 30](#)). La photo de la [figure 4. 31](#) a été prise après **15 jours** et la [figure 4. 32](#) au bout de **20 jours**.



Figure 4. 28 : Produits (1^{er} jour de traitement).

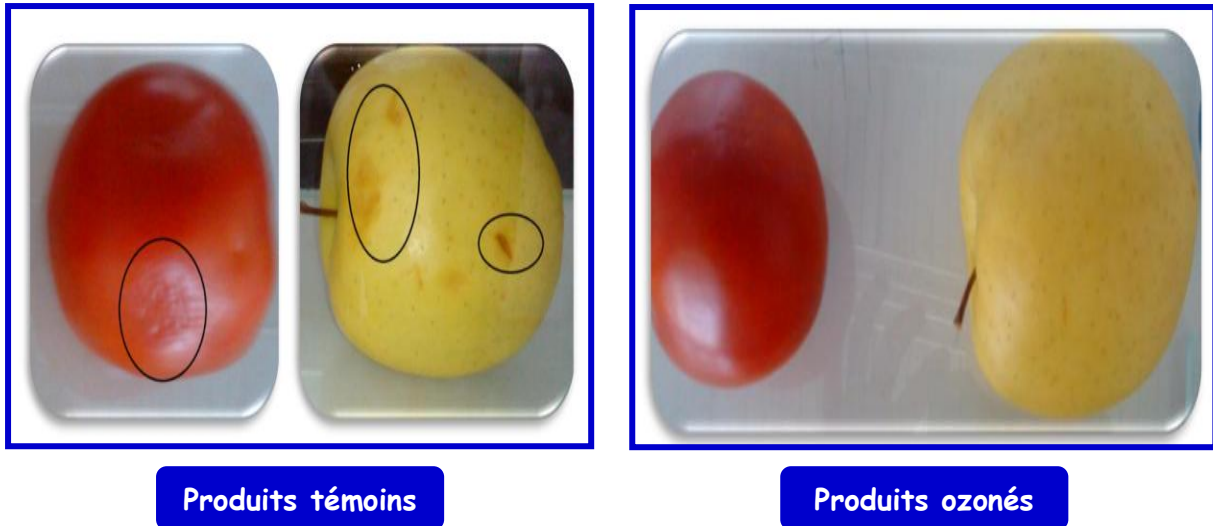


Figure 4. 29 : Produits (5^{ème} jour de traitement).

Après une durée de **cinq jours** le plateau des deux produits ozonés est parfaitement conservé :

- ✿ Pas de perte d'eau,
- ✿ Brillance équivalents au plateau du jour.
- ✿ Aspect appétissant, coloration vive et odeur fraîche.

Par contre, à la surface de la pomme non ozonée apparaissent des taches marron (cette pomme n'était déjà pas marquée lorsqu'elle a été placée dans la chambre "air + ozone") comparativement à la tomate qui ne présente pratiquement aucun signe d'endommagement.

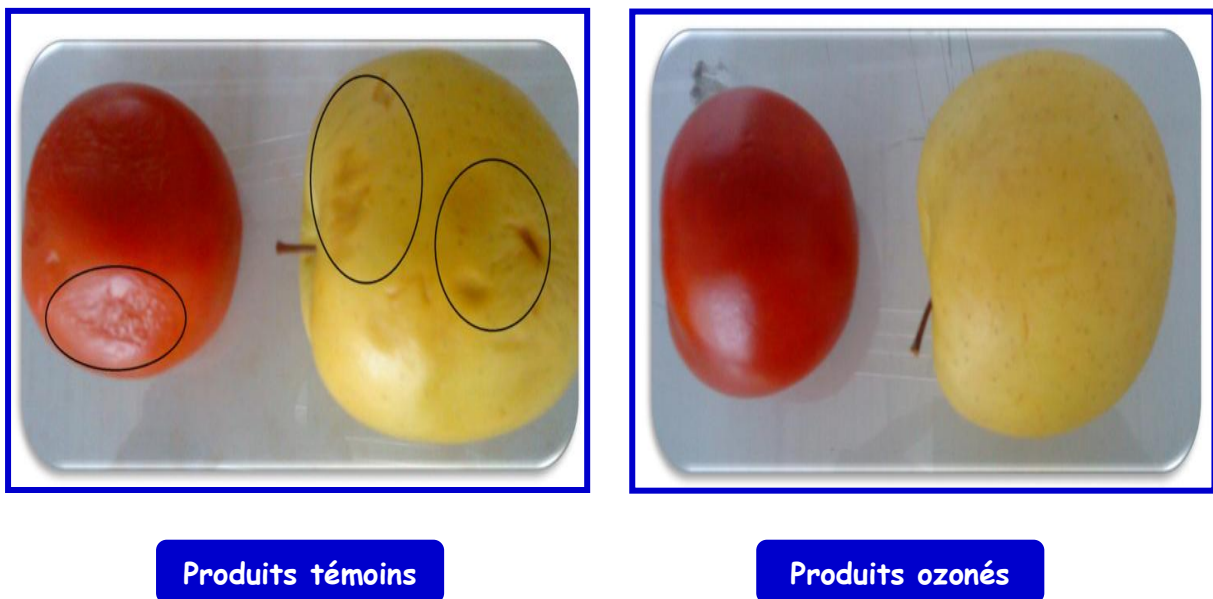


Figure 4. 30 : Produits (10^{ème} jour de traitement).

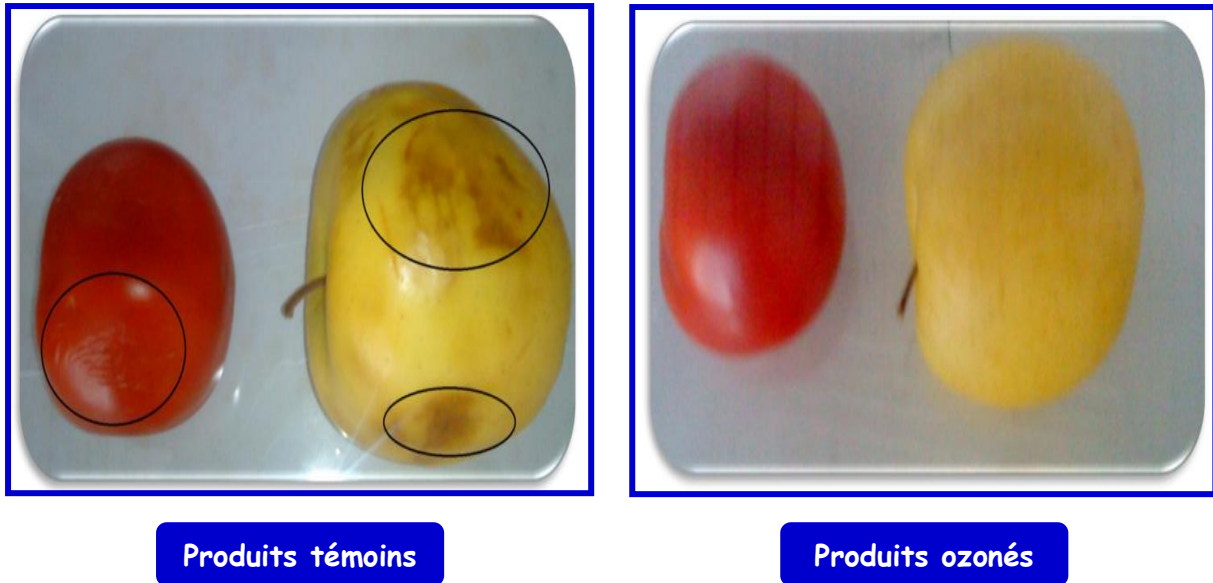


Figure 4. 31 : Produits (15^{ème} jour de traitement).

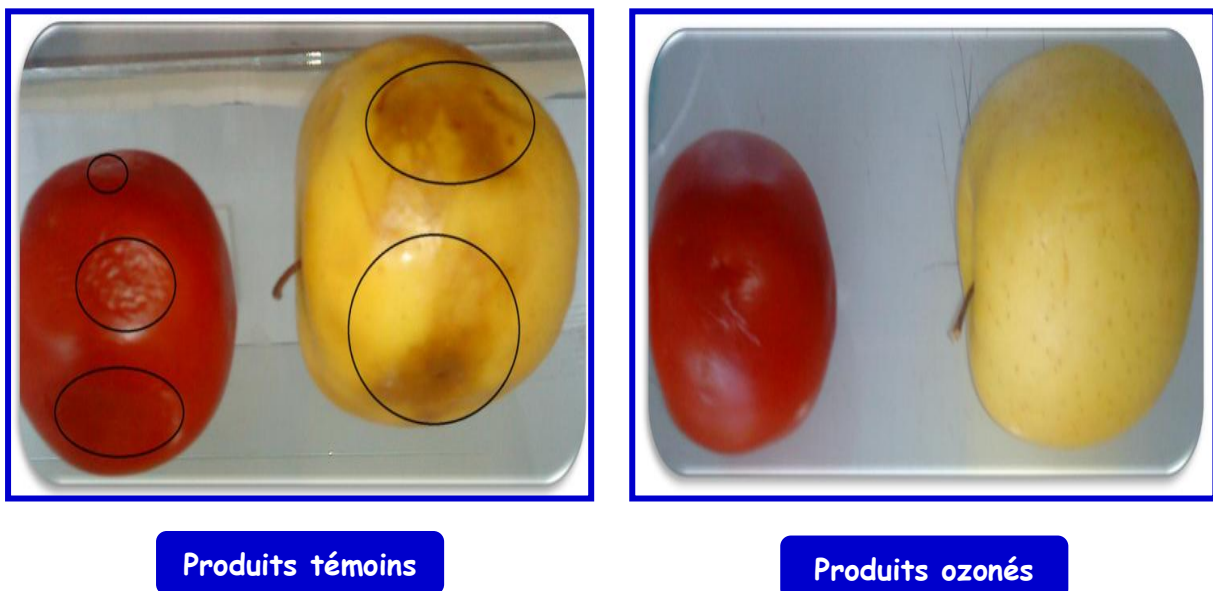


Figure 4. 32 : Produits (20^{ème} jour de traitement).

Au **dixième jour** de l'expérience, la nature périssable du plateau non ozoné est nettement visible d'où une augmentation des taches marron au niveau de la pomme et la tomate montre des signes de pourrissement avec perte d'eau. Aucune modification significative du côté produits ozonés n'a été signalée.

Dès le **quinzième jour** et jusqu'au **vingtième jour** de traitement, les propriétés nutritives et de comestibilité du plateau "témoins" se sont dégradées et ces dégradations provoquent des modifications de texture, de couleur et de goût, et peuvent rendre ces deux

produits impropres à la consommation. De fait, le plateau ozoné est parfaitement apte à la consommation après **vingt jours** en chambre "air + ozone". Néanmoins, une prolongation nette de la durée de conservation du plateau par l'emploi de l'air ozoné était constatée : cette prolongation pouvant être évaluée à trois ou quatre jours de plus que la durée normale de conservation de notre échantillon témoin préservé en chambre ordinaire.

4. 8. Conclusion

Nous avons réalisé une étude paramétrique pour mieux comprendre les mécanismes de la DBD surfacique. Les paramètres étudiés sont les suivants : la tension appliquée, la nature de l'électrode haute tension, l'épaisseur et la nature du diélectrique. L'effet de ces paramètres sur les propriétés électriques de la décharge a été présenté.

L'action hautement bactéricide de l'ozone est hors de doute grâce aux nombreuses expériences qui ont été réalisées sur cette application. Il ressort de ces expériences l'efficacité de l'ozone produit par DBD surfacique qui permet une conservation des légumes et fruits, lors de leur stockage en éliminant les bactéries et en stoppant leur développement. Nous recommandons l'utilisation de cette technologie de désinfection dans les chambres froides de stockage qui n'est pas utilisée en Algérie.

Le chapitre suivant abordera la conception de plusieurs réacteurs DBD volumique type cylindre-cylindre et la caractérisation électrique de leur comportement, ainsi que leur application au traitement de l'eau.

5. 1. Introduction

La décharge à barrière diélectrique (DBD) volumique a été déjà beaucoup étudiée notamment pour des applications telles que la modification de surface de polymères, le contrôle de pollution, la source lumineuse, la production d'ozone, etc. Et créer le plasma près de la surface du diélectrique présente de nombreux intérêts. La proximité avec la surface permet d'abaisser la tension de claquage, parce que l'on supprime le gap inter-électrodes. Il s'agit de la décharge à barrière diélectrique surfacique. Elle appartient quand à elle au domaine de contrôle d'écoulement, traitement de l'air, la conservation des produits agroalimentaires, etc.

Ce chapitre est consacré aux moyens expérimentaux et de modélisation utilisés pour réaliser le travail présenté dans cette thèse. Nous aborderons en premier lieu, une étude électrique paramétrique de la DBD volumique dans le cadre d'une caractérisation par des "expériences – un facteur à la fois". L'objectif est d'étudier l'influence des différents paramètres opératoires (distance entre pointes, distance inter-électrodes, tension appliquée et épaisseur du diélectrique). L'influence de chaque paramètre a été étudiée indépendamment : lorsqu'un paramètre variait les deux autres étaient maintenus constants. Cependant, cette approche ne nous permet pas de prédire les meilleures conditions pour l'optimisation de notre procédé. Nous avons donc décidé d'utiliser la méthodologie des plans d'expériences en employant une matrice composite qui permettait de modéliser et d'optimiser le réacteur.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons nous pencher à l'étude des réacteurs plasma avec les différentes options de chaque dispositif expérimental : choix du réacteur, caractéristiques des différentes versions du réacteur et caractéristiques physiques du réacteur et des électrodes, puis les différents outils employés pour la caractérisation du plasma. Au cours de cette thèse nous avons pu développer de nouveaux réacteurs.

Nous décrirons brièvement l'alimentation haute tension réalisée dans ce travail, dont tout un chapitre lui a été consacré (chapitre III).

5. 2. Domaine d'application dominant : Production d'ozone

Lorsqu'on fait une recherche bibliographique sur les décharges à barrière diélectrique en volume, on rencontre de nombreuses publications sur la production d'ozone. En effet, le développement des streamers lors d'une décharge en volume correspond au modèle des

décharges pointe-plan, multipointes-plan ou plan-plan. Plusieurs types de décharges en volume existent et peuvent générer cet ozone (figure 1. 15 : (a) à (c)).

5. 3. Domaine de thèse : Traitement d'eau

La dépollution de l'eau est un domaine d'application vaste des plasmas froids. La production d'ozone fut l'objet de nombreuses recherches finalisées qui aboutirent à la réalisation de réacteurs industriels largement utilisés de nos jours. L'ozone est principalement utilisé pour le traitement de l'eau pour la rendre potable.

5. 4. Dispositif expérimental

La cellule pour la décharge en volume est schématisée à la figure 5. 1. Elle est constituée de deux électrodes multipointes-plan dont l'une des électrodes est recouverte d'un diélectrique solide. Afin de mener cette étude paramétrique, il a été nécessaire de concevoir plusieurs plaques. Nous avons ainsi regardé l'influence de la distance entre pointes (trois plaques), épaisseur du diélectrique (trois plaques) et de l'espace inter-électrodes.

L'électrode active consiste en une plaque où sont logées des pointes distantes de **1 cm**, **2 cm** et **3 cm** comme le montre la figure 5. 2.

Une plaque en verre rectangulaire de **30 cm** de longueur, **20 cm** de largeur et d'épaisseur variable " e " constitue la barrière diélectrique. L'électrode passive constituant une bande d'aluminium adhésif de **26 cm** de longueur, **16 cm** de largeur plaquée à la surface de la plaque en verre est reliée à la masse par l'intermédiaire d'une résistance de mesure de faible valeur ohmique $R = 100\Omega$ (figure 5. 3). La distance " d_e " entre les deux électrodes pointes-diélectrique est réglable.

Le tableau 5. 1 résume les grandeurs variables étudiées.

Tableau 5. 1 : Les grandeurs variables de la cellule de décharge volumique.

DBD volume	Distances entre pointes	Distance inter-électrodes	Épaisseur du diélectrique
	d_p (mm)	d_e (mm)	e (mm)
	10	5	3
	20	6	4
	30	7	5

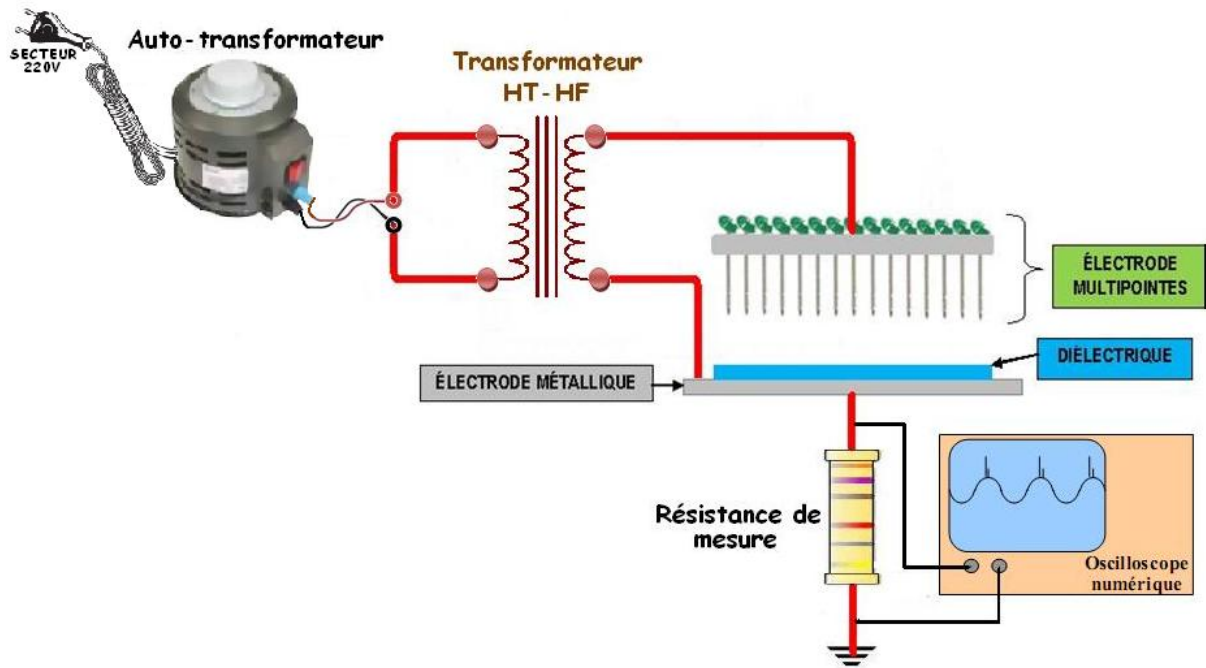


Figure 5. 1 : Cellule multi-pointes pour la décharge en volume.

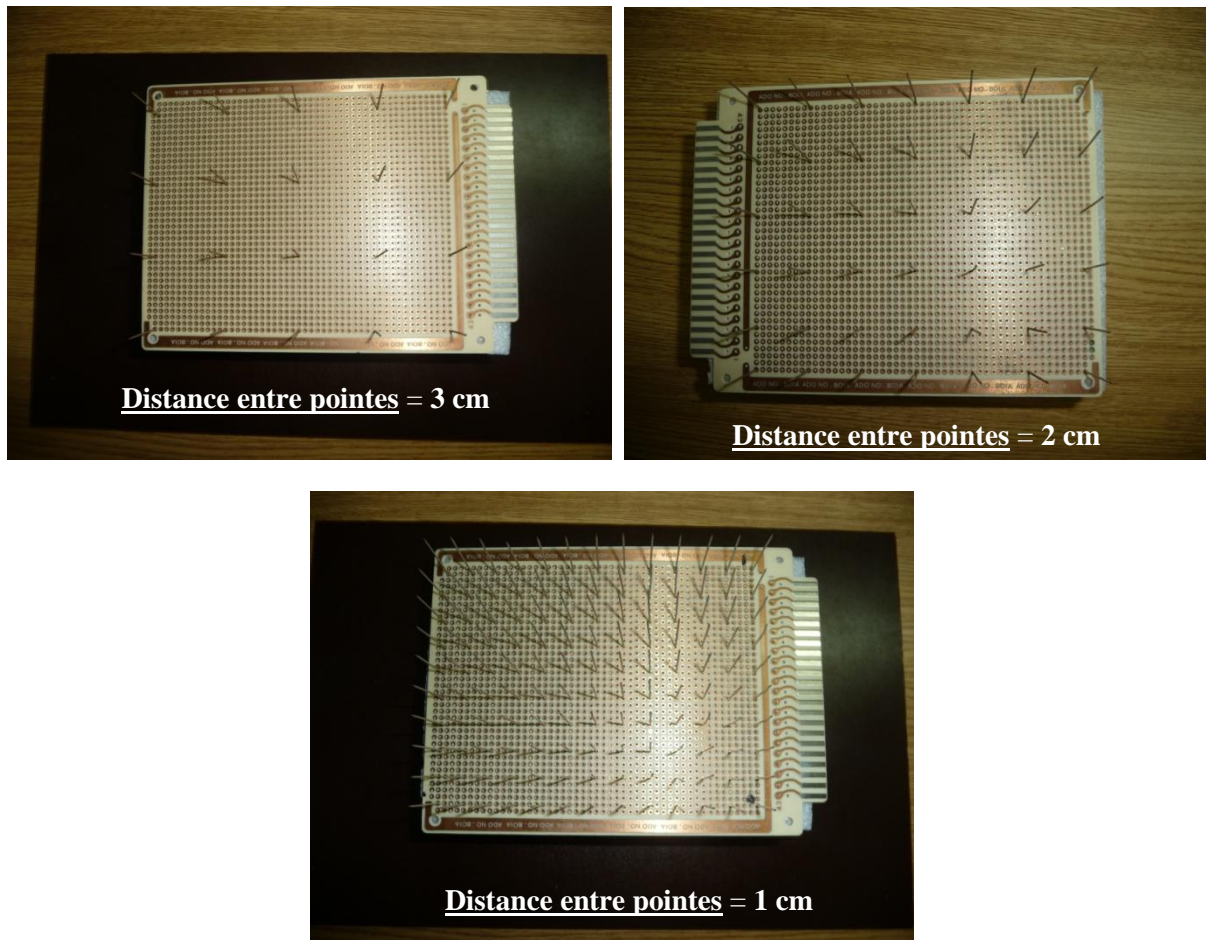


Figure 5. 2 : Photographie des trois plaques multi-pointes.

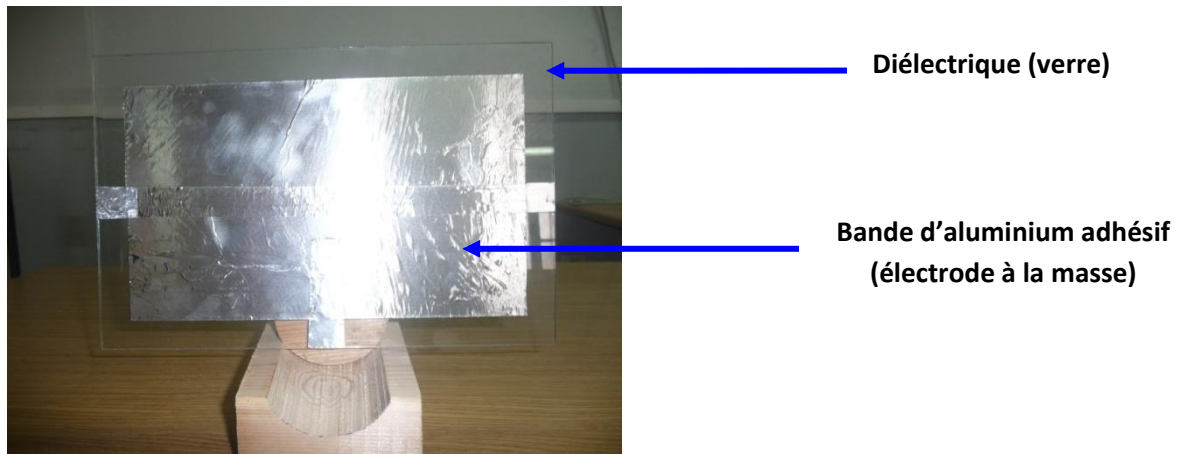


Figure 5. 3 : Photographie de l'électrode passive et du diélectrique.

Deux prises de vue de la cellule sont présentées dans la [figure 5. 4](#) et une photo du banc expérimental est illustrée sur la [figure 5. 5](#).

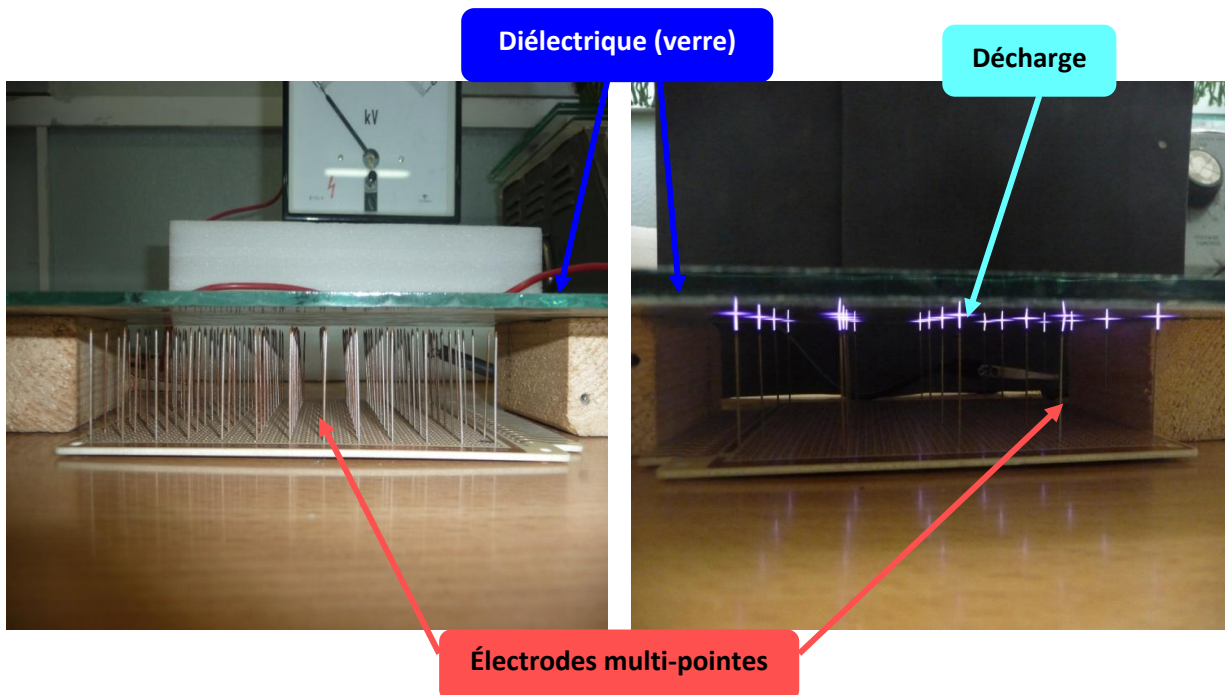


Figure 5. 4 : Photographie de la cellule pour la décharge en volume.

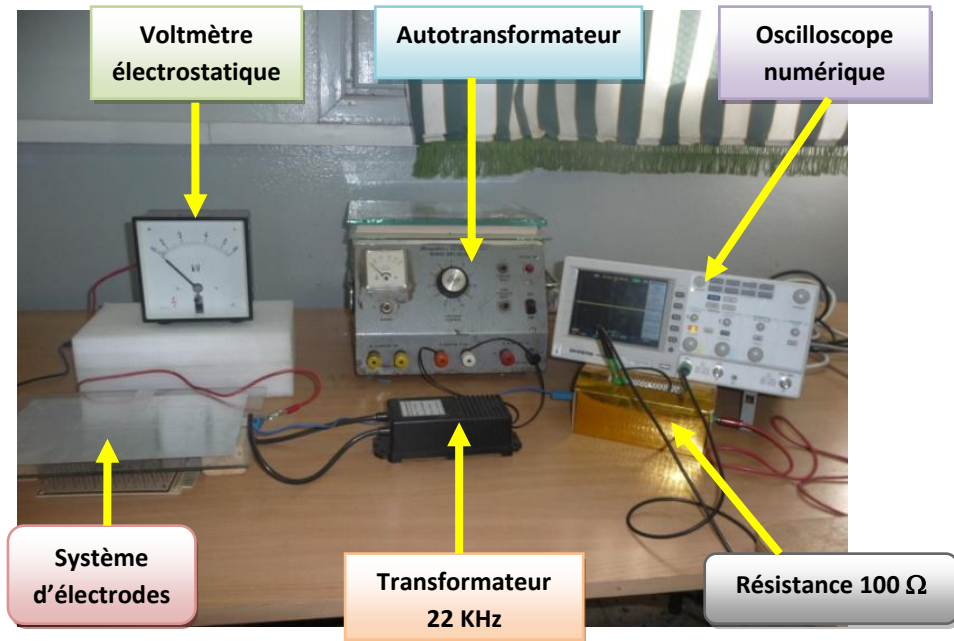


Figure 5. 5 : Photographie du banc expérimental (DBD volumique).

5. 5. Caractérisation de la décharge

Nous nous sommes focalisés sur la caractérisation électrique de la décharge. En effet, un moyen simple et rapide de caractériser le régime de décharge dans des conditions données est d'analyser le courant de décharge I_d et la tension appliquée sur le gaz V_g . Cependant, dans le cas d'une décharge contrôlée par barrière diélectrique, ces grandeurs ne sont pas directement mesurables : elles doivent être déduites à partir des mesures du courant I_m circulant dans la cellule de décharge et de la tension V appliquée sur la cellule de décharge.

La haute tension nécessaire est générée par la source de tension alternative (HAMPDER ENGINEERING CORPORATION, 0-220V. AC-2,5A). D'une manière générale, l'amplitude de la HT est comprise entre **1 kV** et **6 kV** et la fréquence maximale du signal est **22 kHz**.

Dans un premier temps, nous présenterons les mesures électriques réalisées. Les grandeurs électriques mesurées sont la tension appliquée et le courant instantané.

- ✘ La tension appliquée est mesurée par l'intermédiaire d'un voltmètre électrostatique (LEYBOLD-HERAEUS) disposé entre l'électrode active et la masse.

- ✗ Les signaux de courant instantané produits par la décharge sont mesurés au moyen de la résistance de mesure de 100Ω . Puis, ils sont visualisés sur l'oscilloscope numérique.

5. 5. 1. Caractérisation par des "expériences – un facteur à la fois "

Nous allons exposer ici successivement les résultats concernant l'influence d'un paramètre électrique (tension appliquée) et d'autres paramètres géométriques (distance entre pointes, épaisseur du diélectrique et gap inter-électrodes).

5. 5. 1. 1. Influence de la tension appliquée

L'influence de la tension appliquée a été étudiée au moyen de la cellule à DBD muni de l'électrode active multi-pointes distantes de **3 cm**. La barrière diélectrique est d'une épaisseur de **3 mm** et l'intervalle entre les pointes et l'électrode passive est de **3 mm**. Sur la [figure 5. 6](#) de l'oscillogramme sont représentées l'amplitude de courant et l'amplitude des micro-décharges.

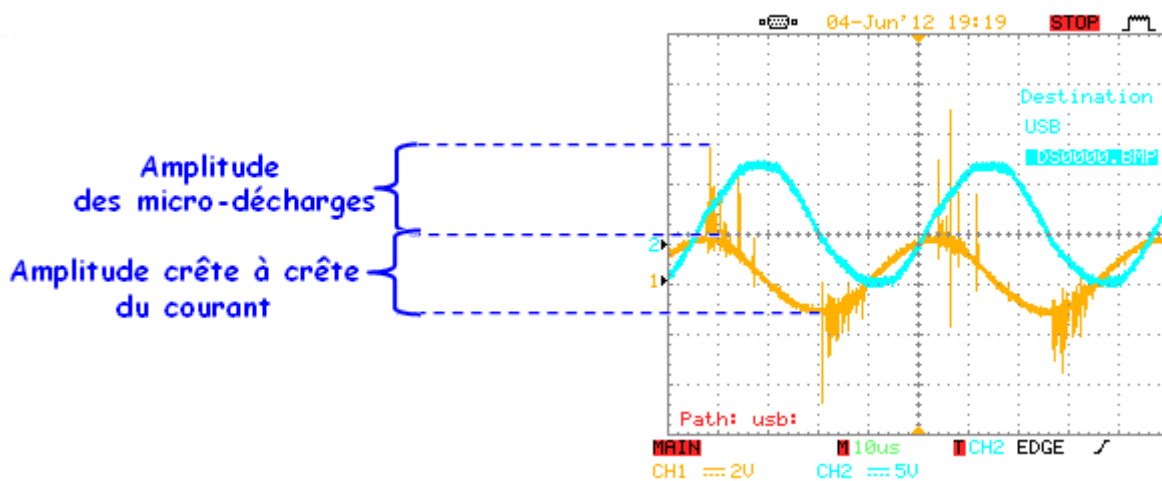


Figure 5. 6 : Visualisation de l'amplitude de courant et l'amplitude des micro-décharges.

La [figure 5. 7](#) donne l'amplitude de courant et l'amplitude des micro-décharges en fonction de la tension appliquée pour une distance entre pointes " $d_p = 3 \text{ cm}$ ", un intervalle " $d_e = 3 \text{ mm}$ " et une épaisseur de diélectrique " $e = 3 \text{ mm}$ ". Les caractéristiques de la [figure 5. 7](#) montrent que l'amplitude des micro-décharges et l'amplitude de courant augmentent avec la

tension appliquée. Pour une tension comprise entre 1 et 3,5 kV, il a été difficile d'allumer la décharge. Cet essai semble montrer qu'il existe une certaine tension U appliquée entre les deux électrodes à partir de laquelle la décharge s'amorce correctement comme le montre la figure 5. 8.

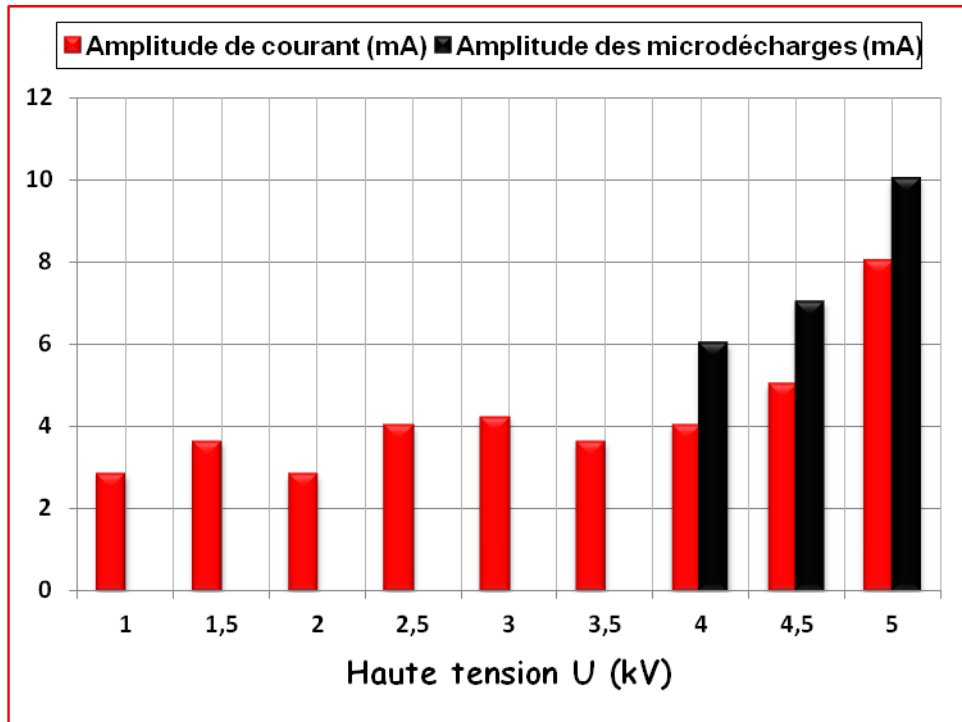


Figure 5. 7: Amplitude de courant et amplitude de micro-décharges en fonction de la tension appliquée.

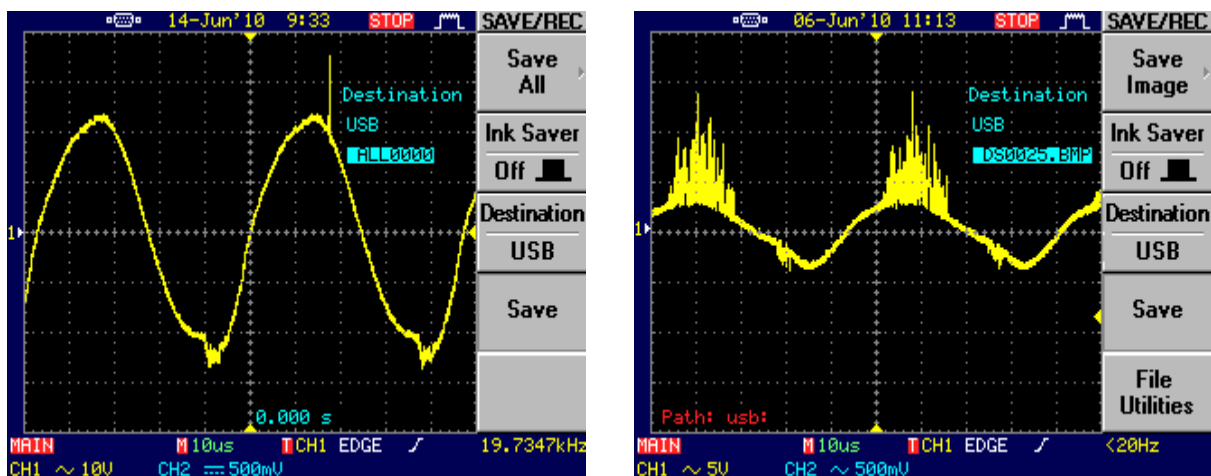


Figure 5. 8: Oscillogrammes du courant : Sans DBD (à gauche), avec DBD (à droite).

5. 5. 1. 2. Influence de la distance entre pointes

L'influence de la distance entre pointes a été étudiée au moyen de la même cellule à DBD muni de l'électrode active multi-pointes à distances variables (1, 2 et 3 cm). La barrière diélectrique est d'une épaisseur de 3 mm, la tension appliquée est de 4,5 kV et l'intervalle entre les pointes et l'électrode passive est de 3 mm.

La figure 5. 9 représente des colonnes de l'amplitude de courant et l'amplitude des micro-décharges pour trois valeurs de la distance entre pointes. Cette figure montre que la valeur de l'amplitude du courant est pratiquement constante, par contre l'amplitude des micro-décharges semble être influencée par la distance entre pointes. En effet, quand cette distance augmente, le courant des micro-décharges diminue. Il en résulte donc que la quantité des micro-décharges qui sont à l'origine de la production d'O₃, est d'autant plus grande que le nombre de pointes est élevé. Ceci s'explique par le fait que chaque pointe est le siège de plusieurs micro-décharges.

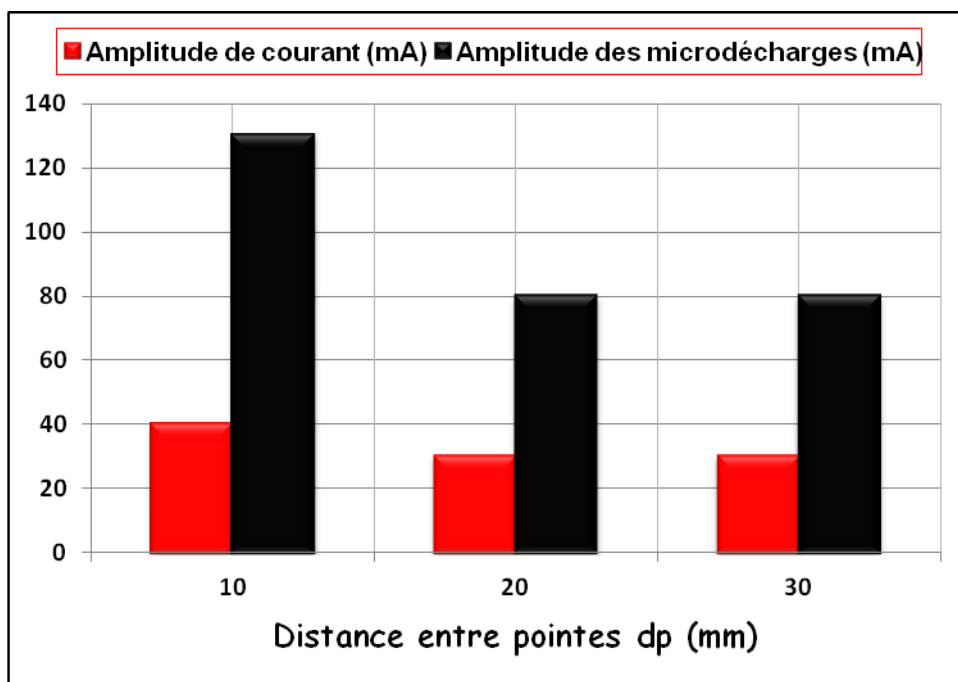


Figure 5. 9 : Amplitude de courant et amplitude des micro-décharges en fonction de la distance entre pointes.

5. 5. 1. 3. Influence de l'épaisseur du diélectrique

L'influence de l'épaisseur du diélectrique a été étudiée au moyen de la même cellule à DBD muni de l'électrode active multi-pointes à distance fixe (3 cm). La tension appliquée est

de **4,5 kV** et l'intervalle entre les pointes et l'électrode passive est de **3 mm**. La barrière diélectrique est d'une épaisseur variable (**3, 4 et 5 mm**).

On remarque qu'une augmentation de l'épaisseur " e " produit moins de nombre de micro-décharges du fait que le courant des micro-décharges diminue, par contre l'amplitude du courant reste constante (figure 5. 10). En effet, lorsque l'épaisseur augmente, la résistance du diélectrique devient plus grande ce qui a pour conséquence de limiter l'amplitude des micro-décharges.

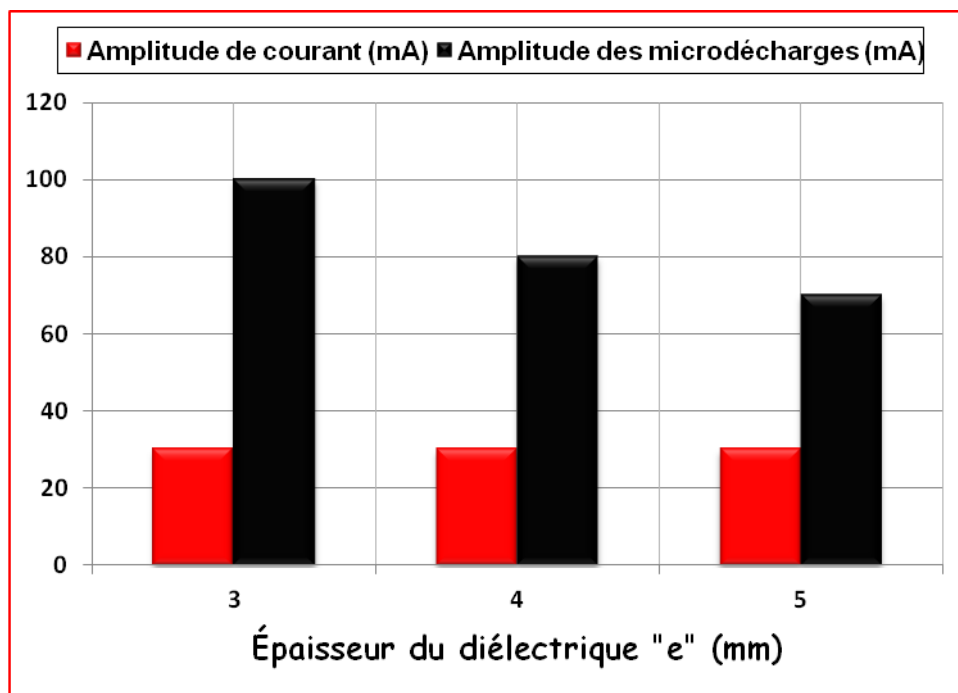


Figure 5. 10 : Amplitude de courant et amplitude des micro-décharges en fonction de l'épaisseur du diélectrique.

5. 5. 2. Modélisation expérimentale par plans d'expériences

La méthodologie des plans d'expérience permet de déterminer le nombre d'expériences qui seront réalisés conformément à un objectif bien défini, afin d'étudier plusieurs facteurs simultanément, à réduire la dispersion associée à des mesures, d'apprécier les effets de couplage entre les facteurs et enfin d'évaluer les influences respectives des facteurs et leurs interactions. De nombreux articles ont été écrits sur l'application de cette méthodologie dans les processus électriques et électrostatiques.

Nous présenterons les principes de base de la modélisation expérimentale de la DBD avec le logiciel MODDE 5. 0 [112] que nous avons utilisés pour modéliser la DBD.

5. 5. 2. 1. Développement de la méthode

Quelques rappels sur le principe des plans d'expériences [113]

A. Vocabulaire utilisé

1) . Réponses, facteurs, niveaux

Avant d'aborder le principe des plans d'expériences, il est important de préciser le vocabulaire utilisé.

Les phénomènes étudiés sont mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(U_{ij}) \quad (5. 1)$$

Où **Y**, la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur, est appelée **la réponse**,

U_{ij}, les variables (naturelles) qui influencent un phénomène, sont appelées **les facteurs**.

f est une fonction mathématique qui prédit les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux **U_{ij}** : en principe il s'agit d'un polynôme du premier ou deuxième degré dans le cas des plans d'expériences.

Lorsque l'on étudie un facteur **U_{ij}**, on définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes qui sont appelées **niveau bas** et **niveau haut**. On désigne le niveau bas (codé -1) par le signe (-) et le niveau haut (codé +1) par le signe (+).

2) . Variables codées

Pour pouvoir comparer entre eux les "poids" des paramètres, on préfère ne pas utiliser les valeurs des variables naturelles **U_{ij}** qui dépendent des unités utilisées. Pour surmonter cette difficulté, on utilise les valeurs des **variables codées X_{ij}** dont l'origine correspond au centre du domaine expérimental. Les valeurs des variables codées sont définies de la manière suivante :

$$X_{ij} = (U_{ij} - U_j^0) / \Delta U_j \quad (5. 2)$$

avec **X_{ij}** : valeur de la variable codée j pour l'expérience i ;

U_{ij} : valeur de la variable naturelle j à l'expérience i ;

U_j⁰ : valeur de la variable naturelle au centre du domaine ;

ΔU_j : pas de variation de la variable naturelle j (moitié de l'écart entre la valeur maximum et la valeur minimum de la variable).

Trouver des modèles mathématiques de bonne qualité avec un minimum d'efforts dépend de la façon dont les intervalles des facteurs sont sélectionnés. Cette méthode peut être utilisée comme suit :

- ✓ Sélection des facteurs les plus intéressants et influents.
- ✓ Détermination des valeurs maximales, minimales et centrales de chaque facteur.
- ✓ Réalisation d'une matrice d'expériences avec tous les états possibles et les réponses correspondantes.

Avant de commencer les expériences, il est nécessaire de définir le meilleur plan approprié qui permet de modéliser le processus avec le plus de précision possible. Dans ce qui suit, nous choisissons le plan composite double à faces centrées (CCF) qui donne des modèles quadratiques. Il est possible de déterminer une relation quadratique entre la fonction de sortie afin de l'optimiser (réponse) et les variables d'entrée u_i ($i = 1, \dots, k$) (facteurs):

$$y = f(u_i) = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ii} u_i^2 \quad (5.3)$$

Sachant que Δu_i et u_{i0} sont respectivement le pas de variation et la valeur centrale du facteur i , les valeurs centrales réduites des facteurs peuvent être définies par la relation suivante:

$$x_i = (u_i - u_{i0}) / \Delta u_i \quad (5.4)$$

Avec ces nouvelles variables, la fonction de sortie devient:

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (5.5)$$

Les coefficients peuvent être calculés ou estimés par un programme de traitement de données, de manière à avoir un écart minimum entre le modèle mathématique prédictif et les résultats expérimentaux.

5. 5. 2. 2. Logiciel MODDE 5.0

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 qui est un programme Windows pour la création et l'évaluation de modèles expérimentaux. Le programme aide l'utilisateur à l'interprétation des résultats et la prévision des réponses. Il calcule les coefficients du modèle mathématique et identifie les meilleures adaptations des facteurs permettant d'optimiser le processus.

En outre, le programme calcule deux importants critères statistiques qui permettent de valider ou non le modèle mathématique, symbolisé par R^2 et Q^2 . Le premier est appelé la

qualité de l'ajustement, et est une mesure de la façon dont le modèle peut être adapté à des données brutes, il varie entre 0 et 1 , où 1 indique un modèle parfait et 0 indique aucun modèle. Le deuxième critère est appelé la qualité de prédiction, et estime la puissance prédictive du modèle. Comme R^2 , Q^2 a une limite supérieure 1 , mais sa limite inférieure est moins l'infini ($-\infty$). Pour qu'un modèle puisse passer le test de diagnostic, les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de $0,2$ à $0,3$.

5. 5. 2. 3. Modélisation de la DBD pointe-plan

La figure 5. 11 montre les expériences d'un plan simple composite à faces centrées (CCF) avec 3 facteurs. Il se compose de 8 expériences situées au sommet du cube (points carrés A, B ... H), 6 expériences situés dans les centres des faces du cube (points ronds a, b ... f) et 3 expériences identiques dans le point central M (point étoile). Ainsi, un plan d'expériences CCF avec 3 facteurs comprend (2x17) expériences.

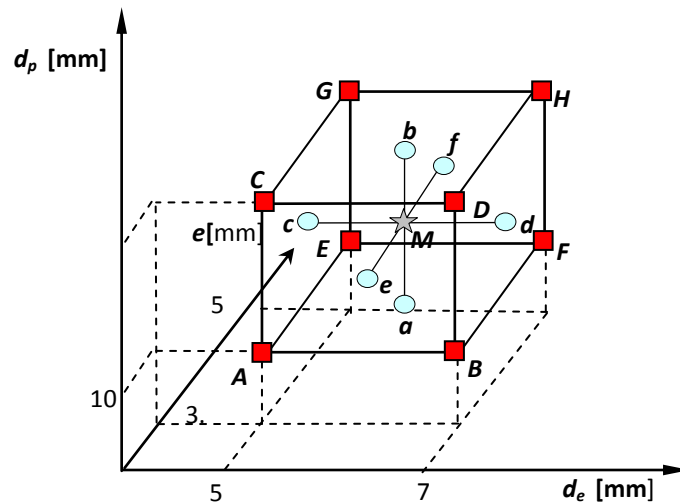


Figure 5. 11 : Schéma représentatif d'un plan CCF avec 3 facteurs :
 d_p : distance entre pointes; d_e : intervalle inter-électrodes; e : épaisseur du diélectrique.

Selon les expériences préliminaires, trois facteurs ont été considérés comme les plus influents, dont nous déterminons les limites de variation de chaque facteur :

- Distance entre pointes adjacentes d_p : $d_{pmin} = 10$ mm et $d_{pmax} = 30$ mm;
- Intervalle inter-électrodes d_e : $d_{emin} = 5$ mm et $d_{emax} = 7$ mm;
- Épaisseur de la barrière diélectrique en verre e : $e_{min} = 3$ mm et $e_{max} = 5$ mm.

5. 5. 2. 4. Estimation de la puissance

Le calcul de la puissance est obtenu en effectuant le produit de la haute tension mesurée à l'aide d'un voltmètre électrostatique par l'amplitude du courant de décharge visualisé sur l'oscilloscope.

Les résultats obtenus de la puissance **P** sont donnés dans le [tableau 5. 2](#). Une fois les valeurs expérimentales de la puissance **P** sont estimées, le logiciel MODDE 5.0 vérifie si les résultats expérimentaux sont "raisonnables", il offre la possibilité de détecter tout résultat "douteux" de mesure. Le graphique représenté à la [figure 5. 12](#) montre que toutes les expériences sont situées à l'intérieur des limites de validation et permet de valider les résultats expérimentaux.

5. 5. 2. 5. Résultats et discussions

Les tests statistiques conduisent à un modèle mathématique validé puisque les deux critères R^2 et Q^2 atteignent des valeurs élevées :

$$R^2 = 0,94 \text{ et } Q^2 = 0,88.$$

Le modèle mathématique proposé par MODDE 5.0 est le suivant :

$$P = 74.2 - 24.52 d_p^* - 7,72 d_e^* - 0,12 e^* + 9,11 d_p^{*2} + 3.51 d_e^{*2} + 1.91 e^{*2} + 12.45 d_p^* d_e^* + 1.62 d_p^* e^* - 0.25 d_e^* e^* \quad (5. 6)$$

Les valeurs des coefficients associés aux facteurs dans le modèle mathématique montrent le degré d'influence de chaque facteur. Le tracé des coefficients est représenté à la [figure 5. 13](#). Il découle du modèle mathématique proposé que dans les limites de la variation des intervalles choisis, la distance entre les pointes adjacentes d_p est celle qui a le plus d'effet. L'épaisseur du diélectrique semble avoir peu d'influence en comparaison avec les autres facteurs. Tous les coefficients des facteurs sont négatifs, ce qui signifie que la réduction de la distance entre pointes d_p , l'intervalle inter-électrodes d_e et l'épaisseur du diélectrique e conduit à des valeurs plus élevées de la puissance. Parmi les différentes interactions entre les facteurs, il est notable de constater qu'il existe une forte interaction entre d_p et d_e et une faible interaction entre d_e et e .

Le programme dispose également d'une option d'optimisation qui donne les valeurs optimales des facteurs pour obtenir la puissance maximale. Les valeurs optimales proposées sont : $d_p = 10 \text{ mm}$, $d_e = 5 \text{ mm}$ et $e = 3 \text{ mm}$.

Tableau 5. 2 : Résultats du plan CCF double.

<i>Exp.</i> N°	d_p [mm]	d_e [mm]	e [mm]	P [W]
1	10	5	3	144,0
2	10	5	3	136,0
3	10	7	3	64,0
4	10	7	3	51,2
5	10	5	5	92,8
6	10	5	5	92,8
7	10	7	5	64,0
8	10	7	5	67,2
9	30	5	3	132,0
10	30	5	3	136,0
11	30	7	3	70,4
12	30	7	3	57,6
13	30	5	5	92,8
14	30	5	5	89,6
15	30	7	5	64,0
16	30	7	5	67,2
17	20	6	4	102,4
18	20	6	4	102,4
19	20	6	4	70,4
20	20	6	4	54,4
21	20	6	4	80,0
22	20	6	4	70,4
23	20	5	4	76,8
24	20	5	4	80,0
25	20	7	4	76,8
26	20	7	4	73,6
27	20	6	3	76,8
28	20	6	3	73,6
29	20	6	5	73,6
30	20	6	5	73,6
31	10	6	4	76,8
32	10	6	4	76,8
33	30	6	4	73,6
34	30	6	4	76,8

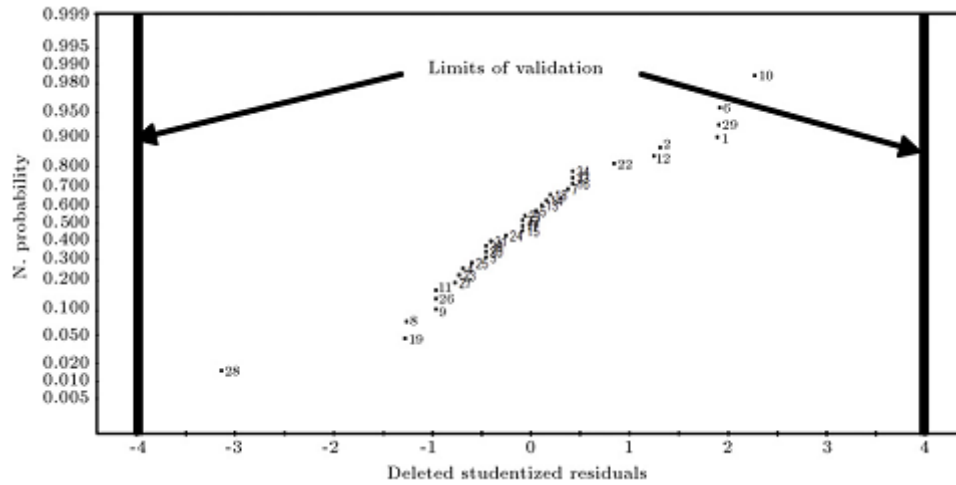


Figure 5. 12 : Graphique pour la validation des mesures.

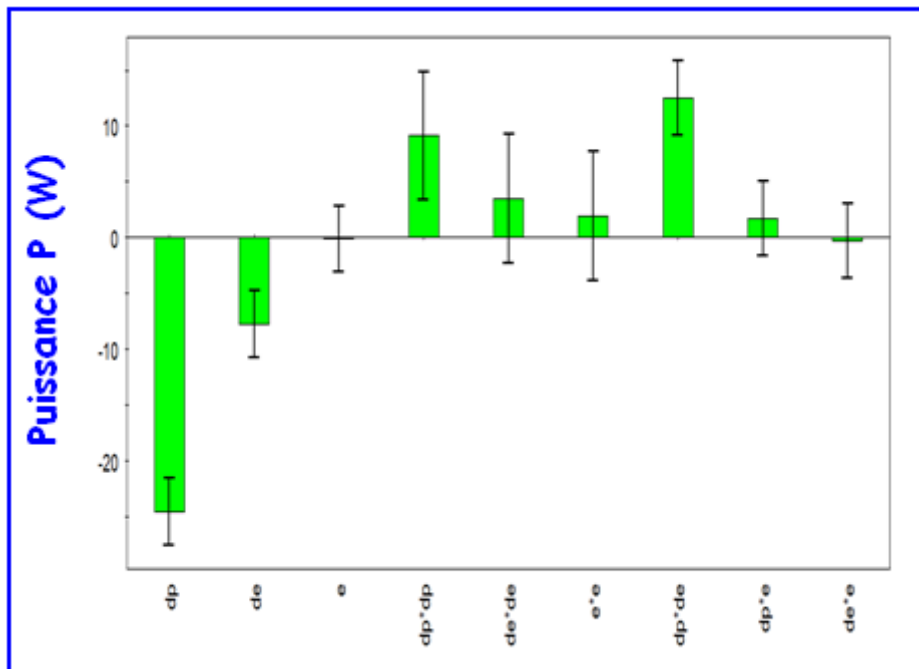


Figure 5. 13 : Tracé des contours iso-réponses pour la modélisation de puissance.

Les tracés de contours obtenus avec MODDE 5.0 sont représentés à la [figure 5. 14](#). Ces courbes illustrent que la puissance est très influencée par les facteurs " distance entre points " et " intervalle inter-électrodes". Par contre, elle semble être très peu influencée par l'épaisseur du diélectrique en comparaison à l'influence de l'intervalle.

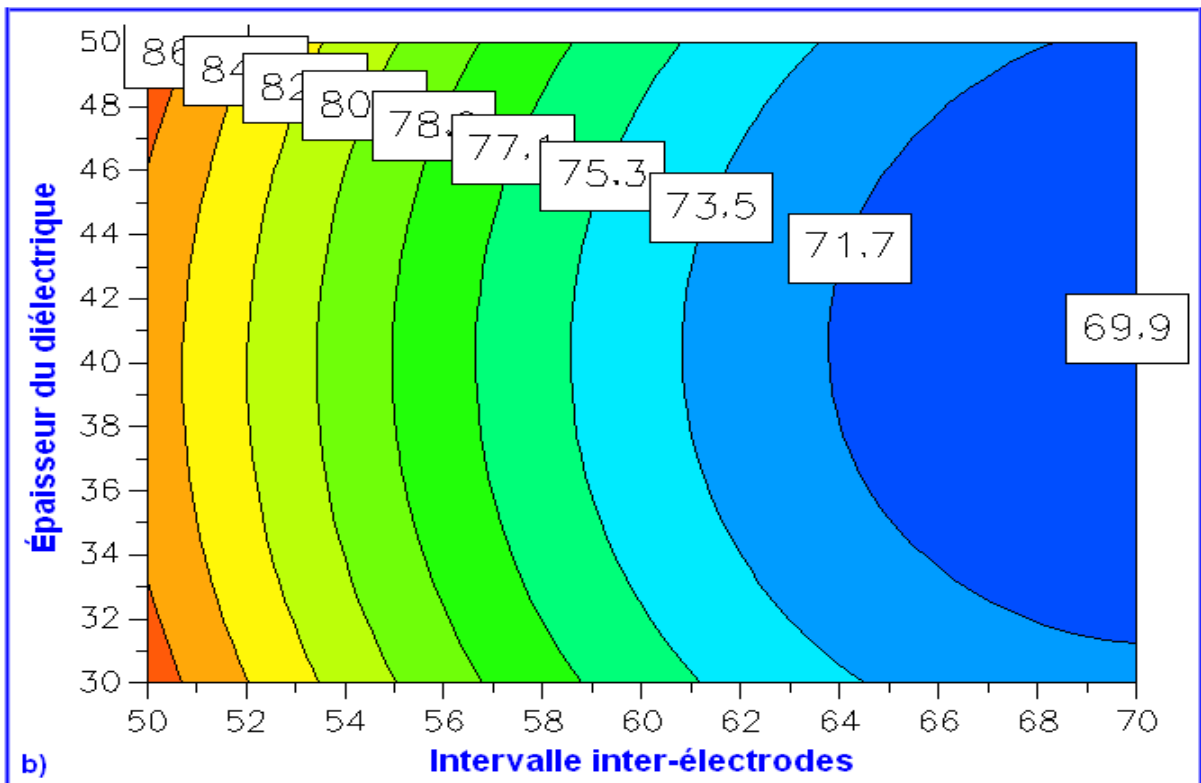
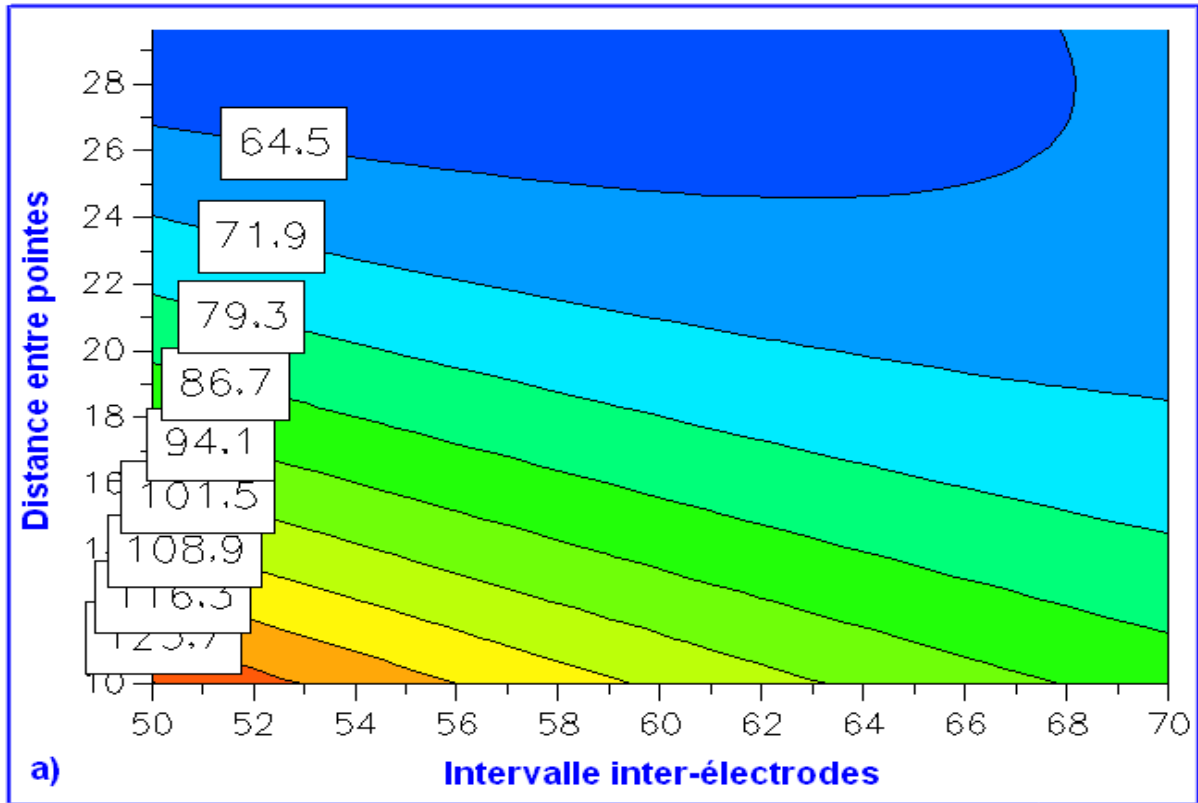


Figure 5. 14 : Tracés des contours iso-réponses du modèle :
 a) Distance entre pointes en fonction de l'intervalle inter-électrode ;
 b) Épaisseur du diélectrique en fonction de l'intervalle inter-électrode.

5. 6. Description des réacteurs DBD réalisés

5. 6. 1. Choix du réacteur

Nous avons choisi de produire l'ozone avec des réacteurs à décharge car ce type de décharge est facile à mettre en œuvre et permet de travailler à pression atmosphérique. Ces réacteurs comprennent en outre une barrière diélectrique qui évite le passage en régime d'arc. Le choix de la géométrie s'est porté sur une configuration de type cylindre–cylindre. Le corps des réacteurs est en acier inoxydable (figure 5 .15).

La plupart des réacteurs de DBD peuvent être assemblés à partir de matériaux simples. Par exemple, une décharge cylindrique peut-être facilement obtenue à partir d'éléments tels que grille, tige filetée, tube en verre. Les décharges pointe-plan sont plus délicates à mettre en place car dans ce cas il faut contrôler le rayon de courbure de la pointe.

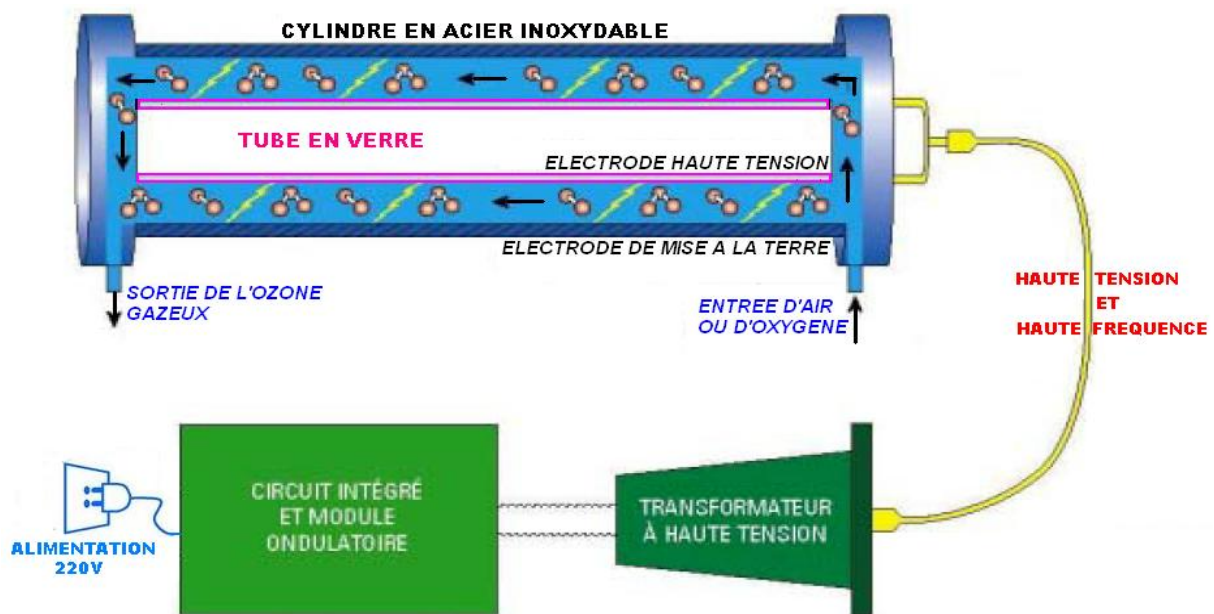


Figure 5. 15 : Configuration cylindre-cylindre du réacteur et son alimentation.

5. 6. 2. Différentes versions du réacteur "cylindre-cylindre" réalisées

5. 6. 2. 1. Choix des matériaux

Le choix de type de décharge et de son régime commande les mécanismes de production des espèces actives et peut orienter la nature des produits formés.

a. Matériau du diélectrique

Le rôle du diélectrique est multiple : sa constante diélectrique conditionne le comportement électrique du réacteur en modifiant, par exemple, la tension de claquage de la décharge, le courant moyen ou la puissance consommée. La nature chimique du diélectrique, sa structure, et sa surface spécifique peuvent, quand à elles, avoir une grande influence sur les propriétés catalytiques de ce support. La température du diélectrique, qui contrôle sa réactivité de surface, est enfin affectée par le comportement électrique du système.

Nous voyons donc la complexité du choix du diélectrique puisqu'il influence, par ses paramètres interdépendants, le comportement du réacteur à tous les niveaux (électrique, catalytique ou thermique).

Dans le cadre de cette étude, nous avons principalement utilisé le verre. C'est un bon diélectrique et il résiste bien aux forts champs électriques ainsi qu'à l'ozone.

b. Matériau des électrodes

La nature de l'électrode haute-tension peut avoir une influence sur la tension de claquage (facilité plus ou moins grande à émettre des électrons secondaires par impact des ions sur les atomes de l'électrode). Pour nos travaux, nous avons utilisé des électrodes usinées dans différents métaux comme l'acier inoxydable, l'aluminium et le cuivre.

5. 6. 2. 2. Caractéristiques physiques du réacteur et des électrodes

1. Géométrie des réacteurs

Plusieurs corps de réacteur ont été utilisés afin de répondre à différentes options opératoires (essais avec différents diamètres de réacteurs, différentes épaisseurs du diélectrique...) ou pour corriger certains défauts de conception (changement peu aisé de l'électrode haute-tension, sortie du gaz au niveau du cylindre extérieur...). Le corps de chaque réacteur est en acier inoxydable. Il forme un cylindre d'un diamètre intérieur fixe de **4,1 cm** pour longueur de **26 cm** comme le montre la [figure 5. 16](#).

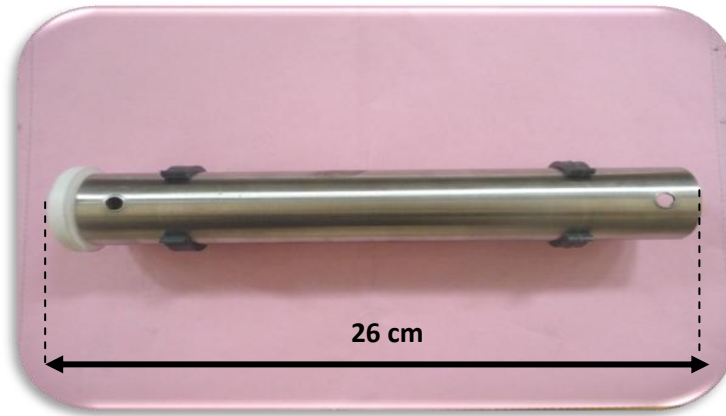


Figure 5. 16 : Forme cylindrique du réacteur.

Nous avons utilisé trois types différents d'électrodes hautes tension placées à l'intérieur du diélectrique en verre.

Réacteur 1 : Électrode HT en fil de cuivre

Le réacteur pour la décharge en volume consiste en un fil en cuivre (électrode HT) enroulé en hélice et plaqué à la surface d'un tube en verre lui-même placé à l'intérieur d'un tube en acier inoxydable à la masse (figure 5. 17). Les caractéristiques du montage sont fournies dans le schéma de la figure 5. 18. Ce réacteur a été peu utilisé car son comportement électrique n'était pas satisfaisant dû à un échauffement excessif en quelques points causé par la non uniformité du contact de l'électrode avec le tube de verre. Il nous a toutefois permis d'observer la décharge filamentaire.

Réacteur 2 : Électrode HT en inox "grillagé"

Ce réacteur nous a permis d'étudier le comportement de la décharge surfacique sur la production d'ozone. Ce réacteur est constitué d'une grille d'acier (électrode haute tension) enroulé et plaqué à la surface d'un tube en verre (diélectrique) lui-même entouré d'aluminium adhésif (électrode à la masse) comme le montre la figure 5. 19. Les caractéristiques du montage sont fournies dans le schéma de la figure 5. 20.

Ce réacteur est destiné à produire de l'ozone pour être injecté dans un espace pour la stérilisation de l'air. C'est ce type de réacteur qui est utilisé dans les applications de désinfection dans les chambres frigorifiques.

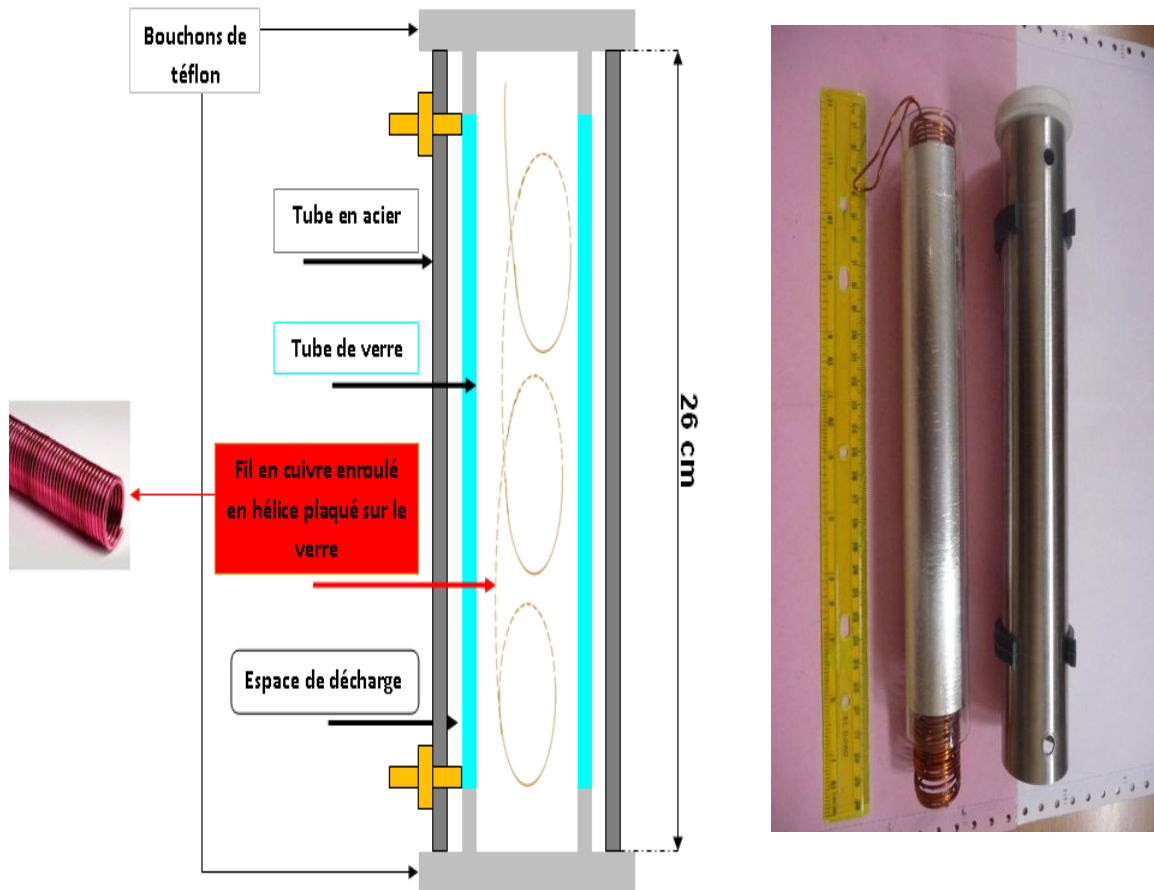


Figure 5.17 : Réacteur à électrode H. T. en cuivre (fil enroulé en hélice).

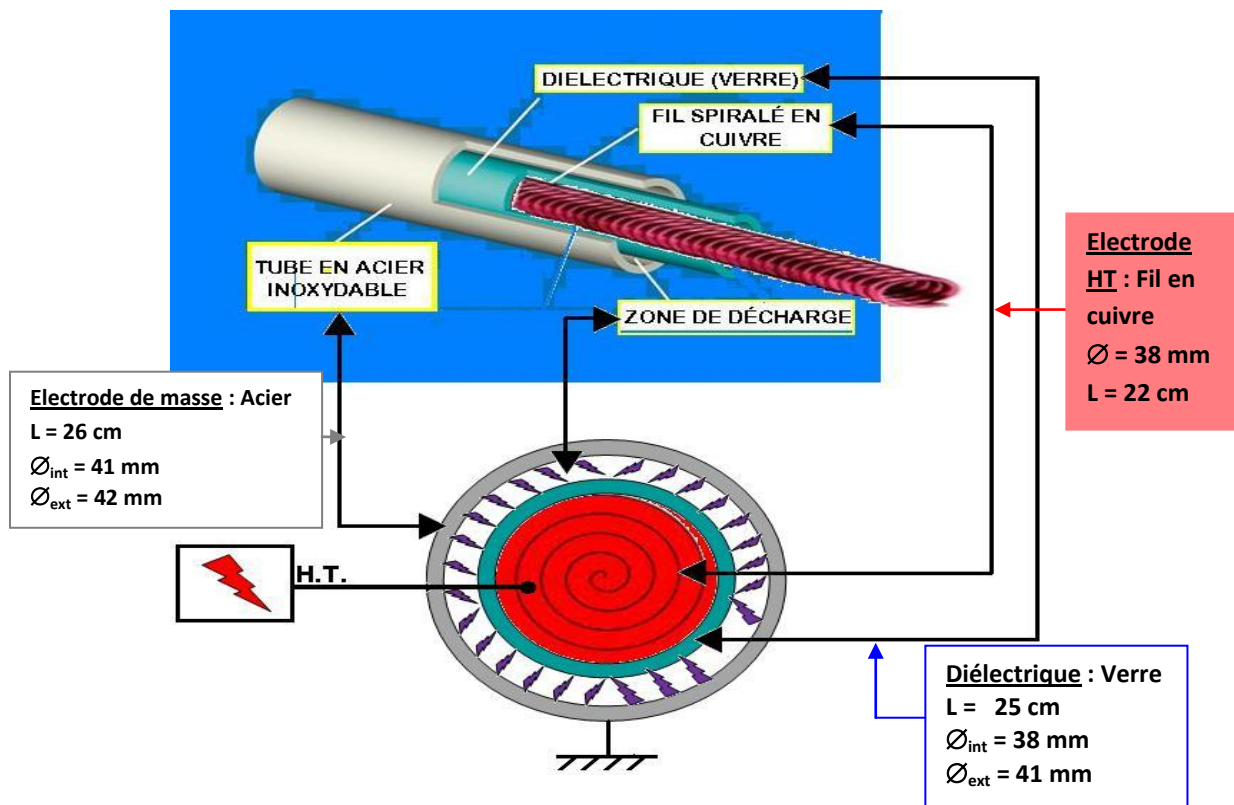


Figure 5.18 : Schéma de la cellule de décharge en volume.

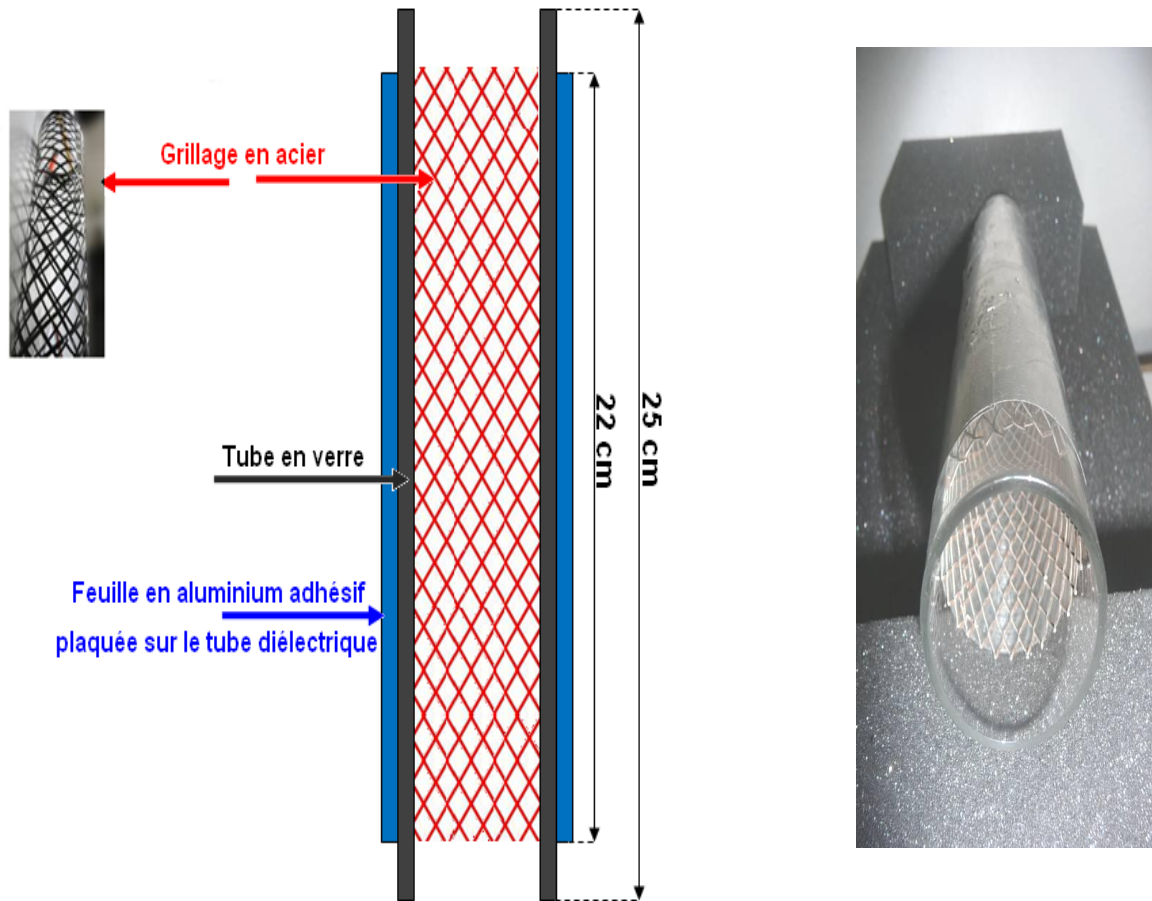


Figure 5. 19 : Réacteur à électrode H.T. en acier (grille).

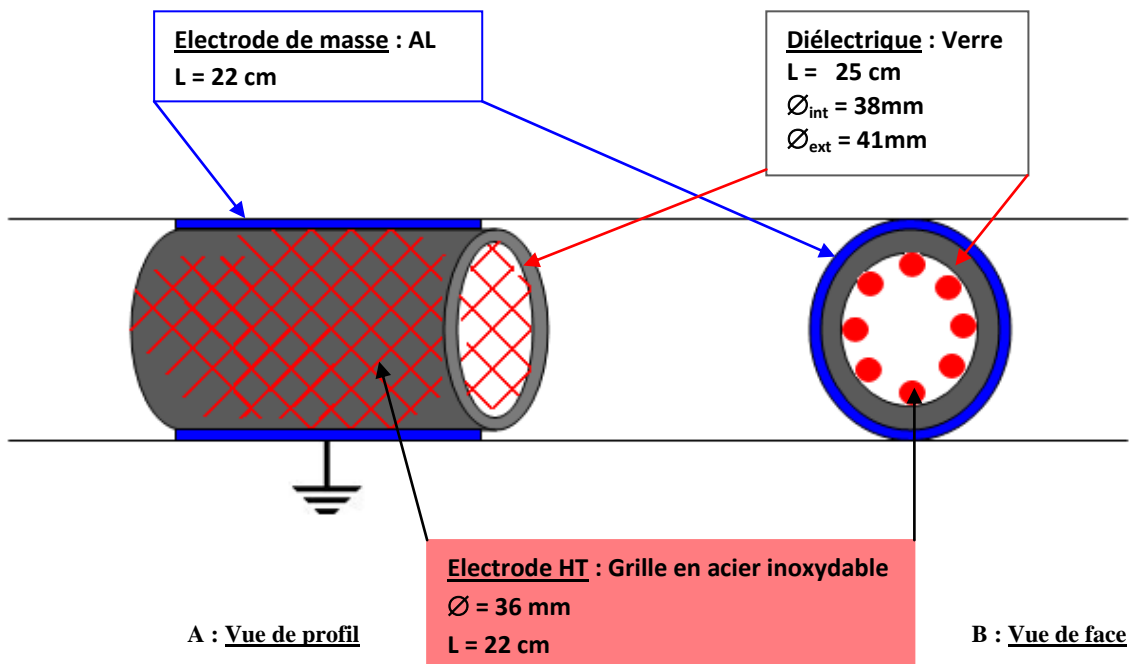


Figure 5. 20 : Schéma de la cellule de décharge de surface.

Réacteur 3 : Électrode HT en aluminium adhésif

Les études réalisées avec le précédent réacteur pour la décharge en volume, utilisant une électrode HT en fil de cuivre, incitent à la réalisation d'un autre réacteur autorisant l'obtention d'une décharge DBD homogène tous le long du tube cylindrique en acier.

Ce réacteur pour une décharge en volume consiste en une bande d'aluminium adhésive (électrode HT) enroulée et plaquée à la surface d'un tube en verre lui-même placé à l'intérieur d'un tube en acier inoxydable relié à la masse (figure 5. 21). Les caractéristiques dimensionnelles de ce réacteur sont fournies dans le schéma de la figure 5. 22.

Ce réacteur a été utilisé dans un premier temps, ensuite nous avons remarqué un échauffement excessif des orifices d'admission de l'air et de sortie d'O₃, causé par l'échauffement de l'électrode en inox après un fonctionnement d'une durée de 10 minutes. Pour cette raison, une autre version a été réalisée comprenant en plus un système de refroidissement à eau.

Réacteur 4 :

Pour remédier au problème d'échauffement des deux orifices, quelques modifications ont été apportées au troisième réacteur. Les deux orifices en téflon servant à l'admission de l'air et à la sortie d'ozone, qui se trouvaient au niveau de l'électrode en inox, ont été déplacés aux deux extrémités, eux-mêmes en téflon, du réacteur afin d'établir les raccords avec les tuyaux servant à l'introduction de l'air et l'évacuation de l'ozone. Ce dernier réacteur reprend les mêmes dimensions que le précédent (abandon du téflon au niveau de l'électrode à la masse)

La deuxième forme de ce réacteur est illustrée sur la figure 5. 23.

5. 6. 3. Caractérisation du réacteur DBD

Le suivi des paramètres électriques de la décharge est effectué grâce à notre oscilloscope numérique 2 voies échantillonnant à 250 MHz. Nous pouvons donc effectuer un bilan électrique et mesurer la puissance consommée par le réacteur 4.

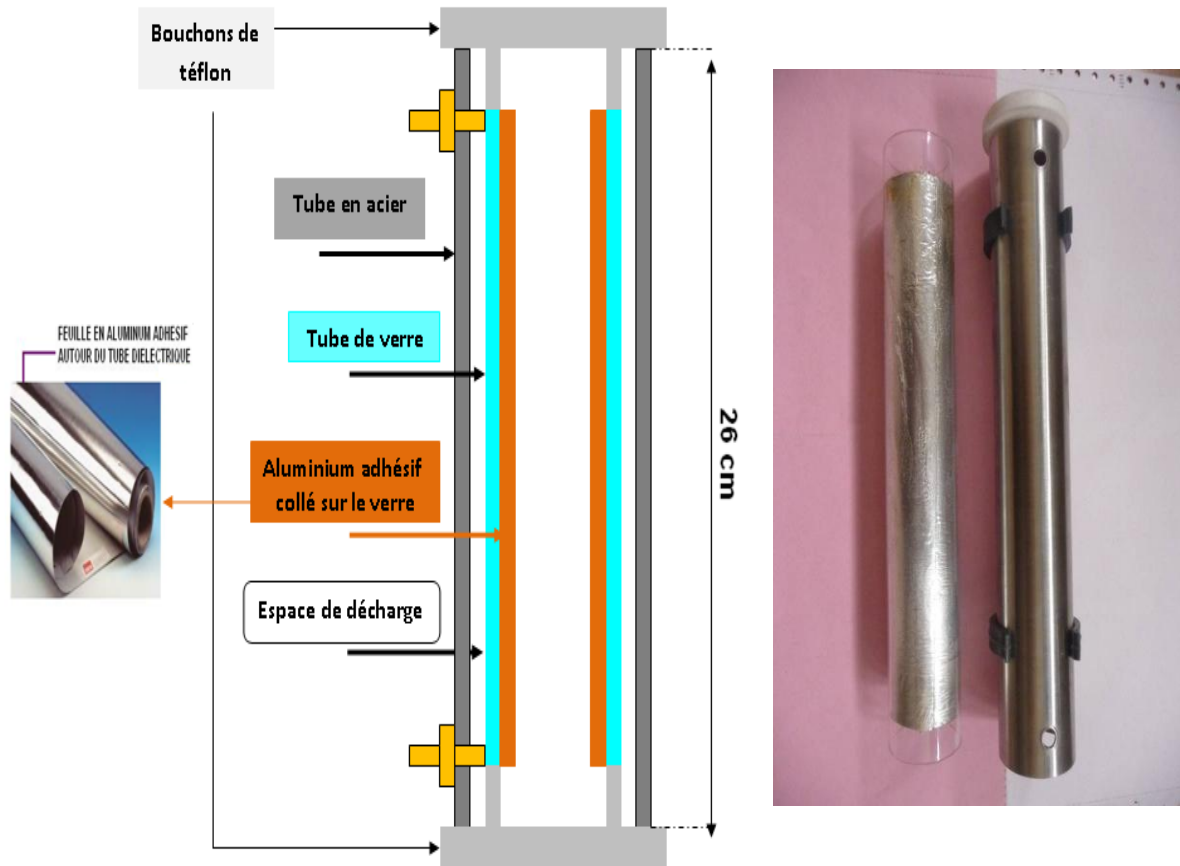


Figure 5. 21 : Réacteur à électrode H.T. en aluminium
(Avec les deux orifices au niveau du tube en acier)

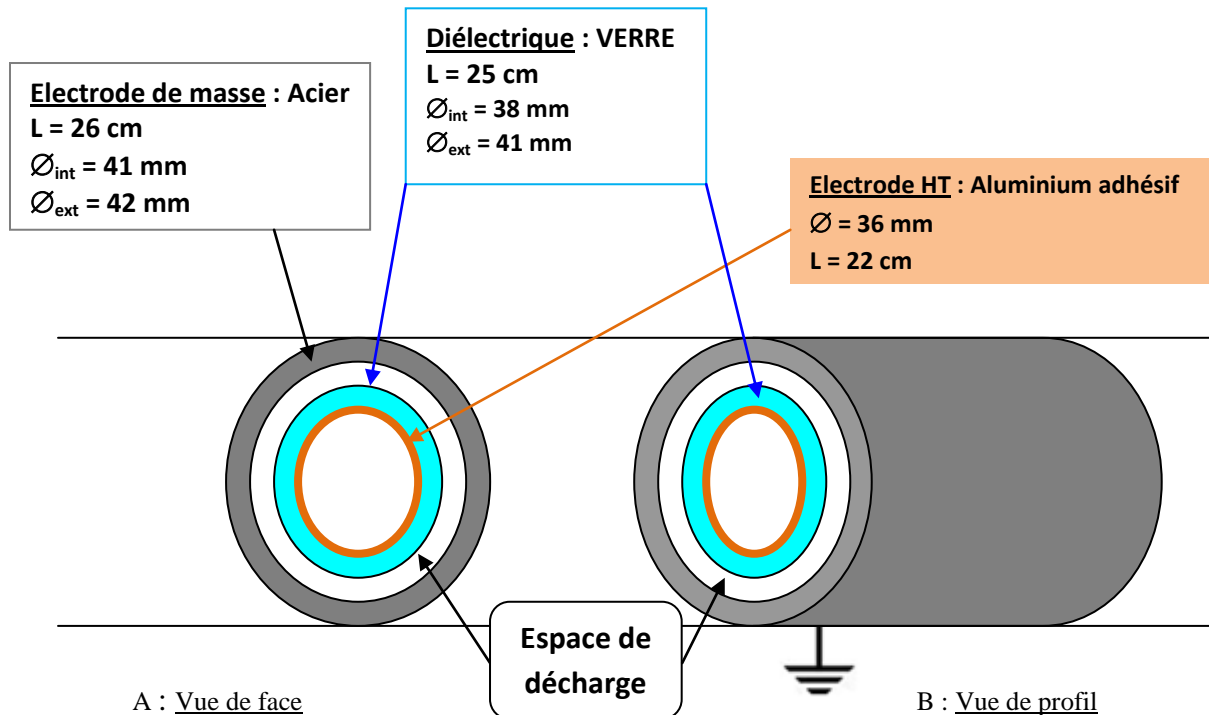


Figure 5. 22 : Schéma de la cellule de décharge des réacteurs 3 et 4 de type DBD en volume.

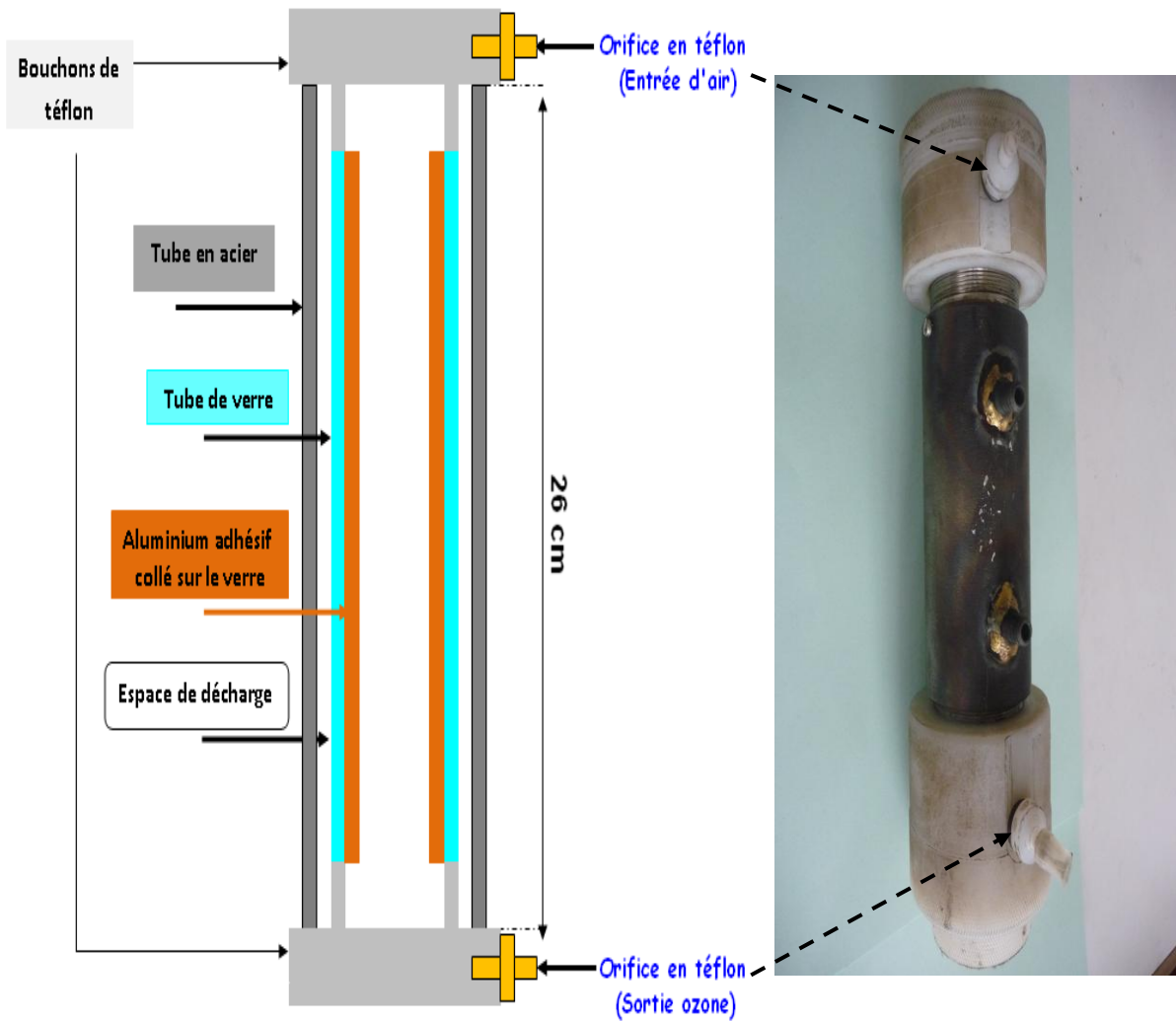


Figure 5. 23 : Réacteur à électrode H.T. en aluminium
(Avec les deux orifices au niveau des bouchons de téflon).

5. 6. 3. 1. Mesure des signaux électriques

La mesure de la tension instantanée appliquée à l'électrode haute-tension se fait au moyen d'une sonde haute-tension (sonde TEKTRONIX, réduction du signal : 1/1000, tension maximale **13 kV**, impédance de 100 M Ω) connectée à la voie 1 de l'oscilloscope. Le courant de décharge instantané est mesuré aux bornes d'une résistance de **120 Ω** connectée à l'électrode de masse par un câble. L'autre extrémité du câble est reliée à la voie 2 de l'oscilloscope. Le circuit peut être ainsi schématisé à la [figure 5. 24](#) et la valeur de la haute tension appliquée est de **5,2 kV**.

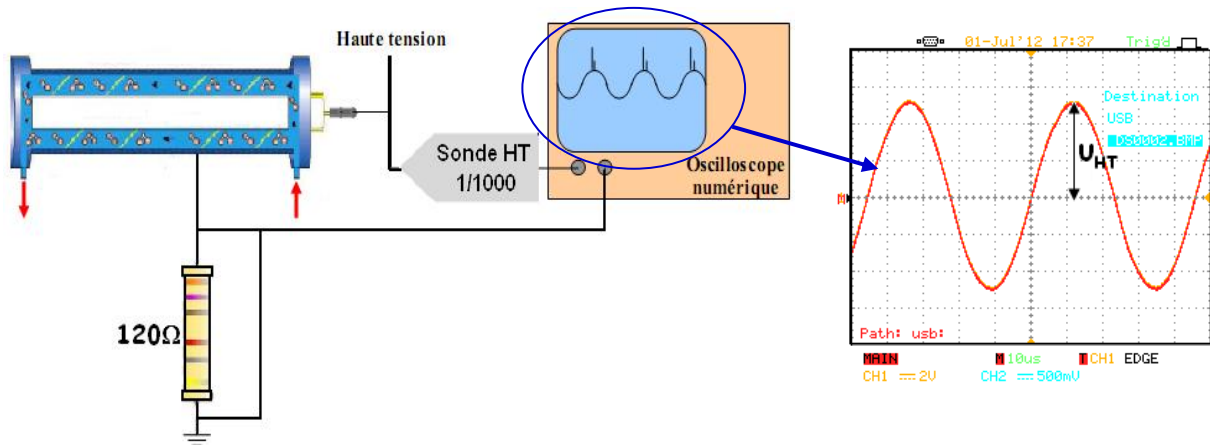


Figure 5. 24: Schéma du dispositif de mesure du courant et de la tension dans le réacteur et zoom sur le signal de la tension appliquée.

5. 6. 3. 2. Mesures de courant

Le courant a été mesuré avec la résistance de 120Ω . Sur une période, conformément à ce type de décharge, il y a une décharge durant l'alternance positive et l'alternance négative. Le signe des impulsions de courant suit celui de la tension appliquée. Ces impulsions de courant sont la somme des courants des micro-décharges. On peut constater qu'il y a deux composantes dans le courant de décharge (figure 5. 25) :

1. La première composante est l'ensemble des impulsions de courant. Ces impulsions correspondent aux micro-décharges dans l'espace inter-électrodes. C'est le **courant impulsionnel**, somme des impulsions "streamers" pour les alternances positives et des impulsions de "Trichel" lors des alternances négatives.
2. Le **courant synchrone**, continu et en phase avec la tension appliquée. Dans une décharge alternative, il est dû à l'arrivée d'espèces chargées contre l'électrode lorsque le champ électrique est élevé.

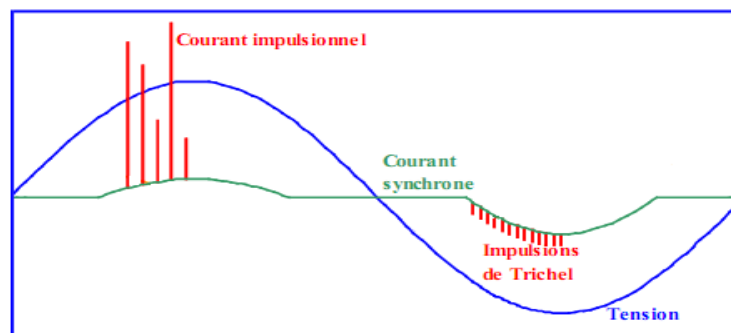


Figure 5. 25 : Différentes composantes du courant dans le cas d'une décharge pointe-plan pour une alimentation électrique alternative [5].

✿ Mesure d'un pic de courant

Dans le cas idéal un pic de courant comporte un front de montée rapide suivi d'une décroissance plus lente, qui peut être perturbée par quelques oscillations de circuit. Pour exemple, la [figure 5. 26](#) présente le signal d'un pic de courant obtenu dans une DBD cylindrique :

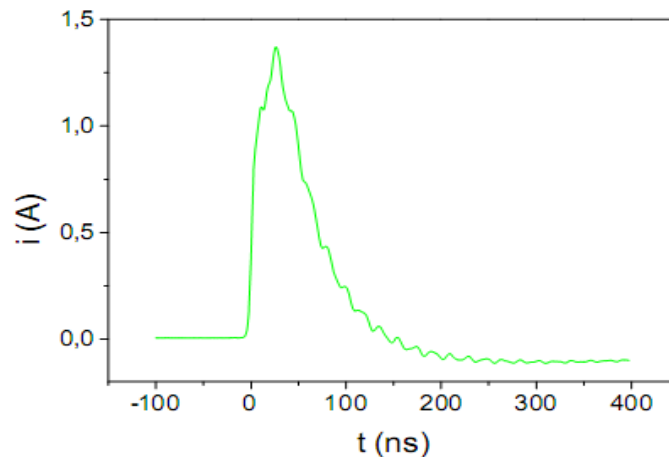


Figure 5. 26 : Signal d'un pic de courant positif obtenu dans une DBD cylindrique (plasma d'air) [21].

✿ Évolution des pics sur une période : les extrema

Les extrema, comme leur nom l'indique, représentent l'amplitude maximale atteinte par les pics de courants. Ils permettent de visualiser l'évolution de l'amplitude des pics au cours de la période.

Sur une période de la tension appliquée, le signal de courant est constitué d'un grand nombre de pics comme le montre la [figure 5. 27](#). Cette dernière montre un exemple typique de l'évolution de la tension et du courant de décharge en fonction du temps et la caractéristique courant-tension en configuration cylindre-cylindre. Durant une période, deux décharges se présentent pendant les alternances positive et négative. Dans le cas de la configuration DBD volumique, le signal est fortement dissymétrique. Pour visualiser l'évolution de l'intensité des pics de courant en fonction de la tension appliquée, on utilise les extrema.

Sur le signal de courant, nous pouvons constater que durant l'alternance positive des pics négatifs de courant de décharge sont présents, ceux-ci sont certainement des oscillations liées à l'instrument de mesure de courant. Puisque physiquement, il n'est pas possible d'avoir des courants de décharge négatifs durant l'alternance positive. À notre avis, les pics de courant positifs durant l'alternance négative sont certainement des oscillations liées à l'instrumentation.

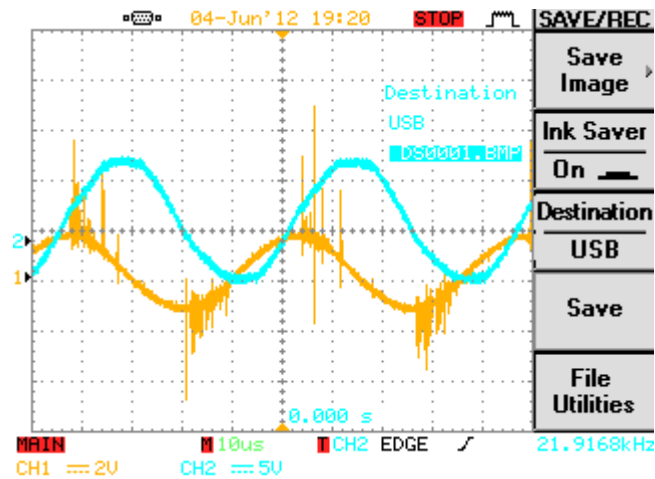


Figure 5. 27 : Formes d’ondes typiques de la tension et du courant de décharge dans la configuration cylindre-cylindre.

Conditions expérimentales : Tension = 6 kV, fréquence = 22 kHz.
Signal tension : 5 kV/div., Signal courant : 2 V/div., 10 μ s/div.

5. 6. 3. 3. Physique de la décharge

La décharge est différente durant les deux alternances : pendant l’alternance positive le courant de décharge est composé de micro-impulsions très fortes ; pendant l’alternance négative, le courant de décharge présente des amplitudes de pics plus faibles.

En effet, au début de *l’alternance positive*, avant la décharge, l’espace inter-électrodes gazeux peut être considéré comme un diviseur capacitif. Quand la tension aux bornes de la cellule croît, la tension appliquée au gaz croît aussi jusqu’à ce que le champ électrique atteigne la valeur requise pour initier une avalanche. Cette valeur particulière de la tension du gaz est appelée tension d’amorçage. Le début de la micro-décharge correspond à l’apparition de l’avalanche initiale dans le gaz, lorsque la tension appliquée à ce dernier est égale à la tension d’amorçage.

L’ionisation conduit au développement d’une avalanche électronique qui se propage vers l’anode. Comme la mobilité des ions est nettement inférieure à celle des électrons (environ **1000** fois plus faible), ces derniers sont accélérés avec une plus grande vitesse vers l’anode. Ils laissent derrière eux les ions positifs quasiment immobiles. Cette phase est appelée "**phase de Townsend**". La localisation des charges positives et négatives lors de la progression de cette avalanche électronique initiale entraîne une augmentation du champ électrique en tête (côté anode) et en queue de l’avalanche (côté cathode). Par conséquent, il en résulte une diminution du champ électrique axial dans le corps de l’avalanche car le champ axial induit par la charge d’espace s’oppose au champ appliqué. On parle alors de distorsion du champ électrique.

En tête de l'avalanche, chargée négativement, le champ électrique radial est négatif, ce qui correspond bien à l'étalement du nuage électronique observé du côté de l'anode. Dans le corps de l'avalanche, le champ électrique radial est positif. Dans ce cas, les électrons se dirigent vers l'axe central, ce qui provoque une constriction de la charge d'espace. À partir d'un certain temps (quelques nanosecondes), des charges négatives commencent à se déposer sur la surface diélectrique de l'anode, entraînant une diminution locale du champ électrique axial. Cet instant correspond à la diminution du courant qui est observé sur la [figure 5. 27](#).

La poursuite de la micro-décharge au-delà de cet instant s'explique par la création de nouveaux électrons à l'arrière de l'avalanche. Durant l'avalanche initiale, des photoélectrons, générés près de la cathode, sont accélérés par le champ local, et provoquent des avalanches secondaires. Les électrons rapides produits, se déplacent vers la zone de charge d'espace positive, laissant derrière eux des ions positifs. Il en résulte un déplacement apparent des charges positives vers la cathode. Cette phase est appelée "**phase de streamer positif**". C'est la raison pour laquelle le courant de décharge croît de nouveau.

À un certain moment, un canal conducteur est décelé entre l'anode et la cathode. Ceci correspond probablement à l'instant d'arrivée du front d'ionisation sur la cathode. Au-delà de cet instant, le courant croît et il atteint son maximum. Les charges qui s'accumulent sur la surface du diélectrique ne se relaxent pas aussitôt ; elles induisent un champ électrique qui s'oppose au champ appliqué extérieur dans l'espace inter-électrodes. Le champ électrique axial dans l'air a tendance à décroître, ceci conduit à une diminution de la vitesse de croissance du courant, ce qui éteint la décharge. La tension du gaz est trop faible pour maintenir la décharge. L'**extinction de la décharge** débute du côté de l'anode. Ceci peut-être expliqué par la réduction du champ axial local du côté de l'anode due aux charges accumulées sur sa surface. Aucune luminescence n'est plus observée dans la région anodique jusqu'au début de l'alternance négative.

En effet, lorsque *l'alternance* devient *négative*, les charges déposées sur le diélectrique pendant l'alternance précédente subsistent toujours et induisent un champ électrique qui ne s'oppose plus au champ électrique extérieur mais le renforce. Ce renforcement est à l'origine de décharges suivantes, appelées **décharges retour** (backward discharges dans la littérature). Ces nouvelles décharges s'initient à des tensions bien inférieures à la tension d'amorçage de la décharge et c'est la surface du diélectrique qui constitue une zone de stockage durable des charges. Cet "**effet mémoire**" de la surface se rajoute, et même prédomine sur celui du gaz. C'est lui qui est en partie dû à la modification de la composition du gaz d'une alternance à l'autre de l'alimentation mais il est surtout une

conséquence des charges adsorbées. Cet effet est très important dans les DBDs. C'est lui qui explique que des filaments puissent être amorcés à des tensions appliquées bien inférieures à la tension d'amorçage normalement requise.

5. 6. 3. 4. Influence de la fréquence de l'alimentation électrique

Ces expériences ont été réalisées avec l'alimentation que nous avons réalisée. Le comportement du système dépend de la distance inter-électrode et de la fréquence de l'alimentation électrique si un champ alternatif est appliqué au gaz. En effet, si le temps de parcours du gap par le gaz est inférieur au temps d'inversion de la polarité, alors les charges d'espace créées par une décharge auront quitté l'espace inter-électrode avant l'apparition de la décharge suivante.

L'allure des oscillogrammes caractérisant le comportement électrique du réacteur cylindre-cylindre est représenté sur la [figure 5. 28](#) pour deux fréquences : 16 et 25 kHz.

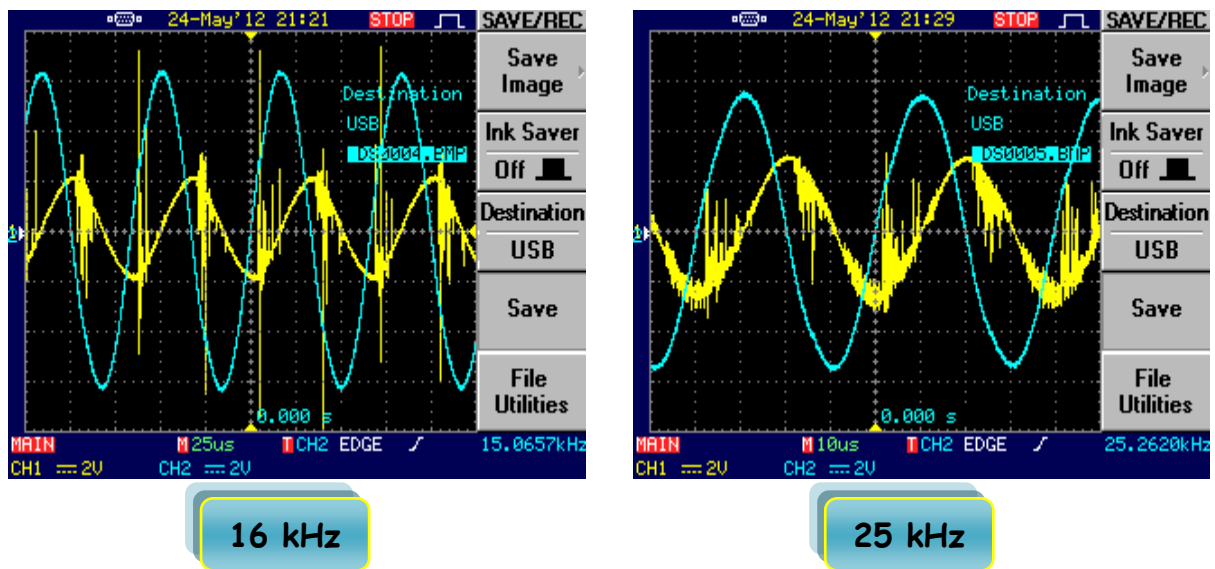


Figure 5. 28 : Oscillogrammes de courant et de la tension pour deux fréquences.
Signal tension : 2 kV/div., Signal courant : 2 V/div.

Nous observons sur la [figure 5. 28](#), que le courant de décharge composé de micro-impulsions, augmente en fonction de la fréquence dans le cas d'une tension et distance inter-électrode fixée. L'amplitude de courant augmente, elle aussi, avec la fréquence. En effet, la valeur moyenne du courant est proportionnelle à la fréquence selon la relation suivante :

$$\langle i(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt = f \int_0^T i(t) \cdot dt \quad (5. 7)$$

Avec : T : période de la tension appliquée,
 f : fréquence de la tension appliquée,
 i(t) : courant.

De plus, pour une fréquence et une distance inter-électrodes données, le courant de la décharge augmente aussi avec la tension appliquée, parce que dans le même temps le champ augmente et par conséquent l'efficacité d'ionisation augmente.

Interprétation physique

Dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées, ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance inter-électrodes d_e limites reliées par l'expression suivante [23] :

$$d_{e_{max}} = \frac{\mu \cdot E_0}{\pi \cdot f} \Leftrightarrow f_{max} = \frac{\mu \cdot E_0}{\pi \cdot d_e} \quad (5.8)$$

avec μ la mobilité des ions et E_0 l'amplitude du champ électrique. Si l'excitation est supérieure à cette fréquence f_{max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc.

Si l'on augmente la fréquence du signal électrique, la charge d'espace résiduelle persistera dans l'espace inter-électrode, favorisant le déclenchement de la décharge suivante. Ce phénomène peut se traduire par le maintien de la décharge avec une tension d'alimentation légèrement inférieure à la tension de claquage de la décharge.

Conséquemment, l'opération de DBD à **faible fréquence** a tendance à distribuer les micro-décharges sur la surface disponible du diélectrique tandis que les **hautes fréquences** tendent à "rallumer" les anciennes micro-décharges exactement aux mêmes endroits à chaque demi-période.

5. 7. Production d'ozone

Dans cette partie nous détaillons l'installation expérimentale dans sa totalité pour la production d'ozone, ce qui nous amène à décrire les divers modules qui la constituent. Le schéma descriptif du dispositif de production d'ozone que nous avons utilisé est illustré sur la [figure 5. 29](#). Il est constitué de différents modules, décrits en détails dans les paragraphes suivants. Une photo du dispositif est illustrée à la [figure 5. 30](#).

5. 7. 1. Description du dispositif expérimental

Le module d'alimentation électrique

Il comporte les alimentations électriques, les organes de visualisation et d'acquisition de signaux et la cellule de mesure de courant. Chacun de ces différents organes fait l'objet d'une description détaillée.

A. Alimentations électriques

Lors de cette étude, nous avons utilisé l'alimentation haute tension à haute fréquence réalisée au sein du laboratoire et qui a fait l'objet de tout un chapitre. Cette alimentation est à base d'un convertisseur (onduleur) constitué de quatre IGBTs. L'alimentation continue de l'onduleur est délivrée par un générateur de marque LEYBOD-HERAEUS, 0-250V, 6A. Un transformateur élévateur de tension, dont le primaire est alimenté par le signal carré de l'onduleur, fournit le signal HT sinusoïdal au générateur DBD.

B. Organes de visualisation et d'acquisition

L'oscilloscope de marque GW INSTRON GDS-840C utilisé pour la visualisation et l'enregistrement des signaux, a une bande passante de 250 MHz. Le signal HT, en provenance du transformateur, passe préalablement par une sonde haute tension de marque Tektronix modèle P6015 A, de rapport 1/1000, tension maximale 13 kV, impédance de 100 M Ω .

C. Cellule de mesure électrique

La cellule de mesure électrique est une boîte "faradisée" comportant une résistance de **120 Ω** pour visualiser le courant.

Le module d'alimentation en air

Il est constitué d'un compresseur d'air. La régulation et la mesure du débit d'air sont assurées par un débitmètre de calibre 5L/min.

Le module générateur d'ozone à DBD

Ce module comporte le générateur d'ozone à DBD. Il est relié aux autres modules par des connexions électriques et pneumatiques. Les détails du générateur sont décrits dans le paragraphe 5. 6. 2.

Le module d'analyse d'ozone

Le dispositif de mesure d'ozone est un analyseur d'ozone de marque LONGLIFE TECHNOLOGY, modèle LF-2000.

De l'air propre provenant du compresseur est introduit dans le générateur d'ozone. La haute tension appliquée entre les deux électrodes cylindriques produit un plasma volumique qui forme l'ozone, rompant l'oxygène de la source d'air comprimé qui traverse l'espace inter-électrodes. À la sortie du générateur, l'ozone produit est mesuré grâce à l'analyseur d'ozone.



Figure 5. 30 : Photo du dispositif global.

1- Alimentation continue, **2-** Alimentation HT (onduleur), **3-** Transformateur élévateur de tension, **4-** Générateur d'ozone, **5-** Boîte faradisée où siège la résistance de mesure, **6-** Sonde HT, **7-** Oscilloscope numérique, **8-** Analyseur d'ozone, **9-** Compresseur.

5. 7. 2. Taux d'ozone

Comme il a déjà été signalé au deuxième chapitre, l'action de l'ozone se réalise aussi bien sur les constituants des enveloppes des microorganismes que sur les constituants intraviraux (ADN, ARN) prouvant ainsi la capacité désinfectante de l'ozone. À cet égard, la couche entourant la bactérie ne les protège pas de l'action de l'ozone. la lyse des structures bactériennes ou virales n'a lieu qu'à fortes doses en ozone dissous. L'efficacité de la

désinfection dépend de la dose d'ozone ; cette dernière peut être calculée à l'aide de la formule suivante : $D = 60 \times U \times d$ [mg/heure] (5. 9)

avec **d** : dose requise d'ozone en **mg/litre**, mesurée par l'analyseur d'ozone.

U : débit d'air en **litre/min** qu'indique le débitmètre.

Les concentrations en ozone relevées à la sortie du réacteur en utilisant les quatre transformateurs, avec un débit d'air constant (**3 l/min**), lors de la formation d'O₃ dans la décharge à barrière diélectrique sont indiquées sur la [figure 5. 31](#).

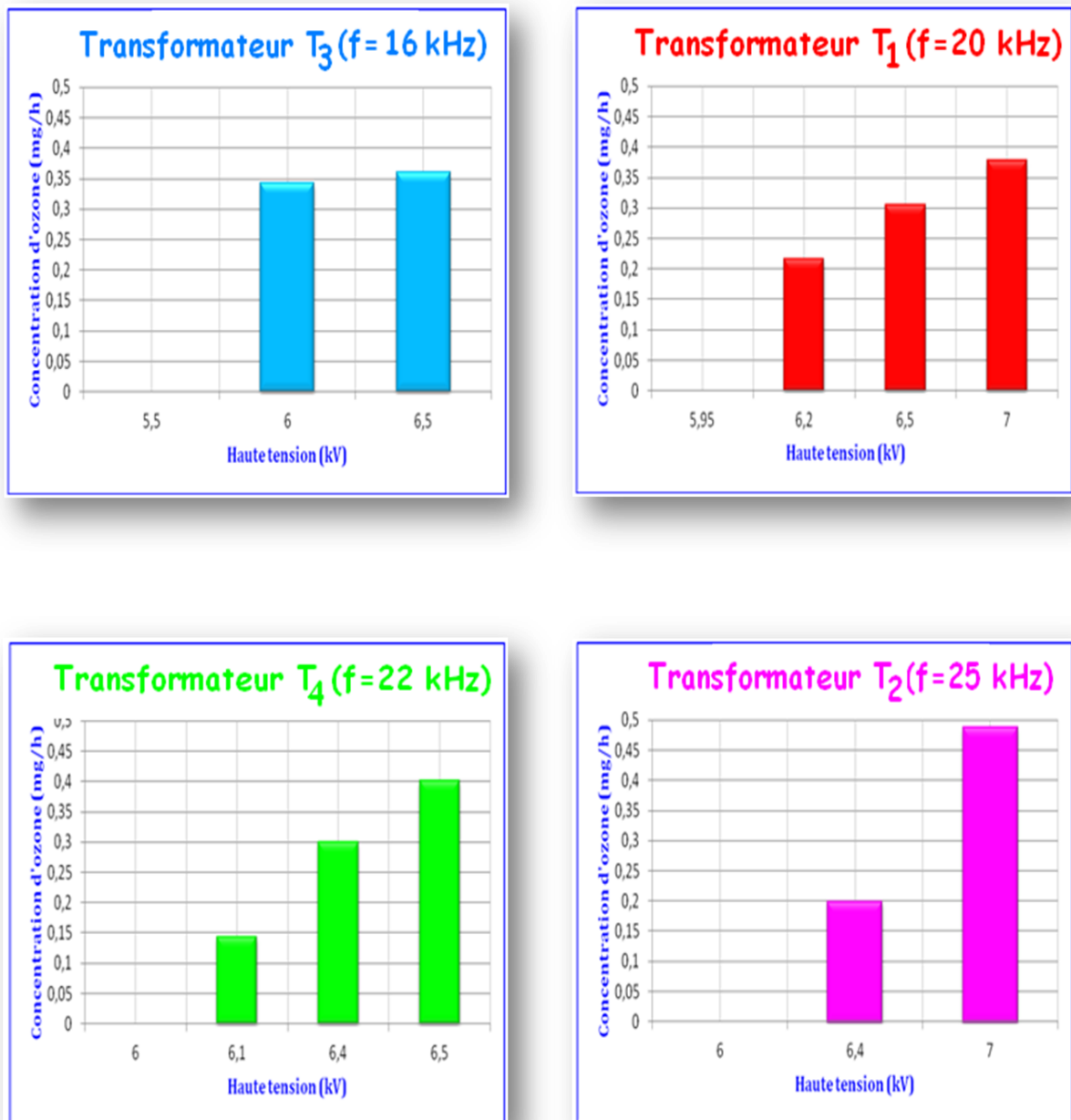


Figure 5. 31 : Histogrammes des concentrations d'ozone en fonction de la haute tension appliquée pour les quatre transformateurs utilisés.

Nous pouvons remarquer dans un premier temps que l'évolution de la concentration augmente avec la haute tension appliquée pour chaque transformateur. Cela signifie que l'élévation de la haute tension contribue à l'augmentation du taux d'ozone, bien que le débit d'air (l/min) est constant et demeure le facteur primordial du moment qu'il est proportionnel à la dose d'ozone (mg/min). Nous pouvons remarquer, dans un deuxième temps, que chaque transformateur possède sa propre fréquence de fonctionnement qui permet de générer un taux d'ozone élevé par rapport aux trois autres.

5. 8. Application à la dépollution d'eau

Les nouvelles technologies de traitement de l'eau (eau potable et eaux usées) présentent toutes de puissantes propriétés anti-microbiennes : les champs électriques pulsés, traitement par ultraviolet et ozone. L'utilisation de ce dernier comme traitement permet la solubilisation de la matière et une forte augmentation de la biodégradabilité anaérobie. Cependant, il n'est pas nécessaire d'utiliser une dose d'ozone trop importante. En effet, au-delà d'une dose seuil, la biodégradabilité n'est plus améliorée. Ceci s'explique par le fait que l'ozone entraîne, outre un phénomène de solubilisation de la matière particulière, un phénomène de minéralisation de la matière soluble. L'objectif de cette partie est d'étudier la faisabilité du procédé plasma DBD pour la dépollution d'eau.

5. 8. 1. Système de purification de l'eau

Rappelons que la description du réacteur utilisé a été présentée au début de ce chapitre. Néanmoins, nous rappelons ci-dessous le schéma expérimental pour la purification de l'eau. Le procédé plasma est réalisé grâce à un réacteur (réacteur 3) tubulaire en acier inoxydable de **260 mm** de longueur et **42 mm** de diamètre (figure 5. 32).

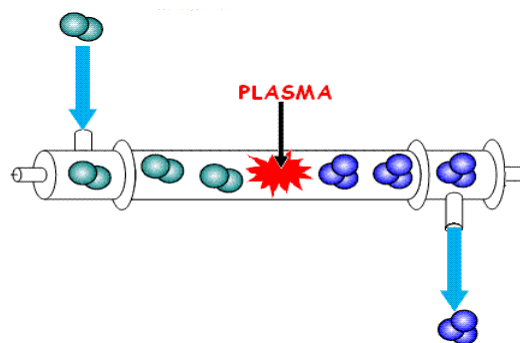


Figure 5. 32 : Réacteur pour la dépollution de l'eau.

Dans le montage de la [figure 5. 33](#) l'ozone est produit par exposition de l'oxygène à une décharge électrique. Le générateur d'ozone transforme l'oxygène de l'air en ozone. La fabrication d'ozone et l'apport de cet oxydant dans l'eau ne se fait pas par injection mais par aspiration (*effet venturi*). Une pompe à eau sert à aspirer l'eau contaminée contenue dans un réservoir et force son passage au travers d'une buse "venturi". L'air ozoné est aspiré lui aussi par effet venturi. La turbine de la pompe va obligatoirement mélanger intimement l'ozone à l'eau et de ce fait, optimiser la désinfection en détruisant instantanément toutes matières organiques provoquant une augmentation du développement bactériale dans le système, puisque ce sont des nutriments des bactéries. L'eau sera renvoyée dans le réservoir d'eau parfaitement désinfectée.

L'avantage de l'ozone est qu'une fois avoir agi sur les bactéries et les virus, il retourne naturellement à sa forme originelle, c'est à dire, l'oxygène. Ainsi, il ne laisse pas de trace dans l'eau comme la plupart des autres principes de traitement de l'eau.

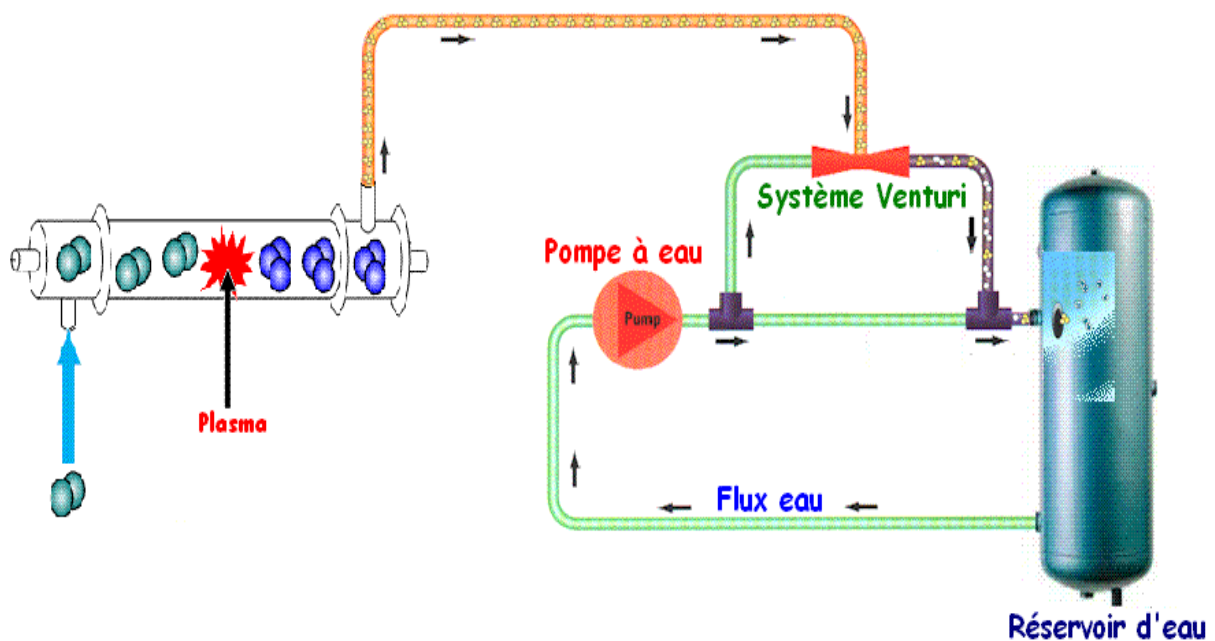


Figure 5. 33 : Système de désinfection d'eau.

On retrouve à la [figure 5. 34](#) une photo du montage utilisé pour les expériences effectuées pour la purification de l'eau.

5. 8. 2. Conditions opératoires

Les mesures sont effectuées en utilisant des eau usées et de l'eau infectée pour deux objectifs :

- ❁ On a voulu démontrer la possibilité de traiter ces deux types d'eau avec un générateur conçu au niveau de notre laboratoire,
- ❁ On a voulu vérifier l'efficacité de l'ozone comme moyen de désinfection.



Figure 5. 34 : Photo du montage pour la purification d'eau.
1- Générateur d'ozone, 2- Système venturi, 3- Pompe à eau, 4- Réservoir d'eau.

L'ozone, de par son pouvoir oxydant puissant, détruit les germes pathogènes **20 à 30** fois plus rapidement que le chlore. Il possède également une action sur les virus. Il suffit d'une dose de **0,1 à 0,2 mg/L** pendant **2 minutes** pour assurer l'action bactéricide et d'une dose de **0,4 mg/L** pendant **4 minutes** pour l'action virulicide. La difficulté de mise en œuvre réside dans le fait que l'ozone s'autodétruit rapidement dans l'eau.

Nos essais sont faits afin de déterminer expérimentalement l'efficacité de l'ozone. On a d'abord prélevé une quantité d'eau avant traitement en tant qu'eau témoin. On a fait ensuite une circulation d'eau ozonée dans le réservoir et on a relevé une quantité d'eau instantanément. La deuxième étape consistait à prélever une autre quantité d'eau en laissant agir l'ozone **5 minutes**. Une recirculation de **10 minutes** a été faite.

Une surchauffe du générateur peut survenir si la durée de l'allumage de la décharge est trop longue (au-delà de **20 minutes**), c'est pour cette raison que les temps de traitement que nous avons utilisés étaient de **5** et **10 minutes** pour les eaux usées mais pour l'eau infectée, nous sommes allés jusqu'à **15 minutes** de traitement.

Étant donné que l'objectif final était le traitement d'eau par ozone pendant une durée assez importante, il a été important d'envisager dans un futur proche, le design et la construction d'un nouveau générateur d'ozone avec un circuit de refroidissement par eau circulant autour de l'électrode à la masse (figure 5. 35). Le défi a été réalisé puisque la deuxième configuration du générateur (figure 5. 36) a aboutit à sa fin.

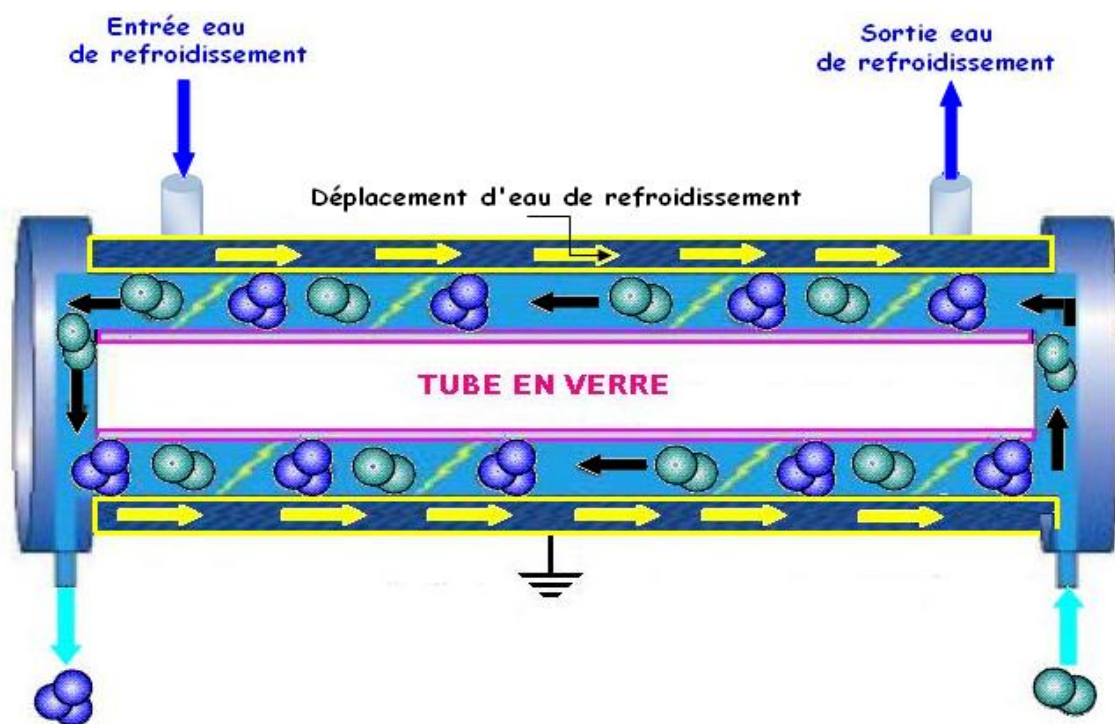


Figure 5. 35 : Système de refroidissement pour le générateur d'ozone.



Figure 5. 36 : Générateur d'ozone avec circuit de refroidissement.

1- Entrée air, 2- Sortie ozone, 3- Entrée eau de refroidissement, 4- Sortie eau de refroidissement.

5. 8. 3. Analyses bactériologiques

Des analyses bactériologiques ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse de la Qualité de la ville de Sidi-Bel-Abbès. Les échantillons d'eau à analyser doivent être mis dans des flacons à usage unique (flacons stériles) remis par le laboratoire, conservés au froid et remis au laboratoire dans les 24 heures qui suivent leur prélèvement ainsi que des instructions à suivre.

L'objectif de l'analyse bactériologique d'une eau n'est pas d'effectuer un inventaire de toutes les espèces présentes, mais de rechercher soit celles qui sont susceptibles d'être pathogènes, soit celles qui sont indicatrices de contamination fécales.

5. 8. 3. 1. Résultats des analyses

L'intégralité des résultats traités obtenus est disponible en **annexe B** et un récapitulatif de ces résultats figure sur le **tableau 5. 3**.

5. 8. 3. 2. Notion d'indicateur

Il n'est pas actuellement possible de rechercher systématiquement tous les germes pathogènes susceptibles d'être présentes dans l'eau, étant donné leur variété et l'irrégularité de leur présence ; ainsi que la diversité et le coût des analyses qu'il convient de mettre en œuvre pour les détecter.

Néanmoins, comme l'origine de la plupart des microorganismes pathogènes véhiculés par l'eau est fécale, le principe de contrôle de la qualité de l'eau repose sur la démonstration que l'eau distribuée ne contient pas de germes provenant de contaminations fécales. Pour cela, on recherche des **indicateurs de contamination fécale**, appelés aussi germes test ou germes témoins de contamination fécale. On parle également d'indicateurs de traitement qui permettent d'évaluer l'efficacité des différents traitements de potabilisation mis en œuvre vis-à-vis de différents germes.

En pratique, on cherche dans les eaux d'alimentation un panel d'indicateurs, témoins de la qualité microbiologique de l'eau.

Les principaux descripteurs de la qualité de l'eau sont disponibles en **annexe C**.

Interprétation

En traitant avec l'ozone, l'efficacité pour la désinfection a été prouvée. Ces résultats ont été obtenus avec un seul générateur. Cependant, en multipliant le nombre de générateurs d'ozone, la qualité de l'eau sera éminemment améliorée surtout lorsque l'ozone est appliqué avec une grande concentration.

L'évaluation du risque de contamination et l'efficacité de la désinfection sont généralement appréhendées via le dénombrement de germes indicateurs (coliformes totaux, coliformes fécaux, streptocoques fécaux).

5. 9. Réalisation d'un SKID mobile de traitement d'eau

Un modèle à grande échelle a été créé pour satisfaire la demande de purificateur d'eau dans les applications industrielles et commerciales. Cette unité peut fonctionner avec de l'air sec ou avec de l'oxygène. Une photo de ce SKID est illustrée à la [figure 5. 37](#).

Nous proposons le SKID de désinfection intégrant :

- ✘ Six générateurs d'ozone avec circuits de refroidissement à eau,
- ✘ Six transformateurs élévateurs de tension,
- ✘ Une bouteille d'oxygène alimentant les six générateurs,
- ✘ Un système d'injection venturi,
- ✘ Un réservoir de 100 litres avec flotteur.

La [figure 5. 38](#) représente le SKID mobile et tout le système de traitement d'eau.

5. 10. Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie une étude paramétrique de la décharge volumique à barrière diélectrique dans différentes configurations multi pointes-plan. Cette décharge constitue une technologie d'avenir pour des applications aussi nombreuses que diverses, où la puissance reste le premier critère demandé par les utilisateurs. Comme il est difficile de trouver une formule pour la puissance, car cela dépend de nombreux facteurs, l'objectif de la première partie consistait en la modélisation en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. Plusieurs facteurs ont été considérés dans cette étude: l'intervalle inter-électrodes, distance entre pointes et l'épaisseur de la barrière diélectrique en verre. Les résultats obtenus ont permis de proposer un modèle mathématique et d'analyser les différentes interactions entre ces facteurs.

Dans le souci de toujours augmenter les performances de la cellule pour la décharge en volume, nous devons constamment étudier la décharge afin de mieux cerner son fonctionnement. Nos efforts se concentrent essentiellement sur la stabilité de la décharge. En d'autres termes, l'objectif recherché de la deuxième partie de ce chapitre est d'analyser le comportement du courant de décharge, pour plusieurs configurations de réacteur et trouver ainsi une configuration optimale apte à être utilisée ensuite pour la génération d'ozone.

Le procédé de désinfection mis en œuvre dans cette étude fait appel à l'ozone. Grâce à sa forte capacité d'oxydation et au mécanisme de désinfection, l'ozone est très adapté au traitement de l'eau. Outre cette efficacité redoutable, nous savons également que l'ozone est sain à utiliser. Nos propres expériences nous l'ont montré chaque jour durant les essais. Ces expositions n'ont pas d'effets sur la santé humaine, excepté cette odeur relativement déplaisante d'air "sale". L'ozone offre un large spectre d'action. Il est efficace aussi bien contre les virus que contre les bactéries et agit avec un temps de courte durée (**10 min**).

L'ozone possède un pouvoir désinfectant très grand (plus efficace que le chlore). Il est instable et se décompose naturellement en oxygène, sans laisser de produits dérivés dans l'eau. Il est produit sur place (pas de transport de produits toxiques ni de consommable à changer régulièrement). Par contre, la production d'ozone consomme de l'énergie, le système est assez complexe et certains matériaux ne résistent pas à l'ozone. Ce système demande un investissement de départ assez important.

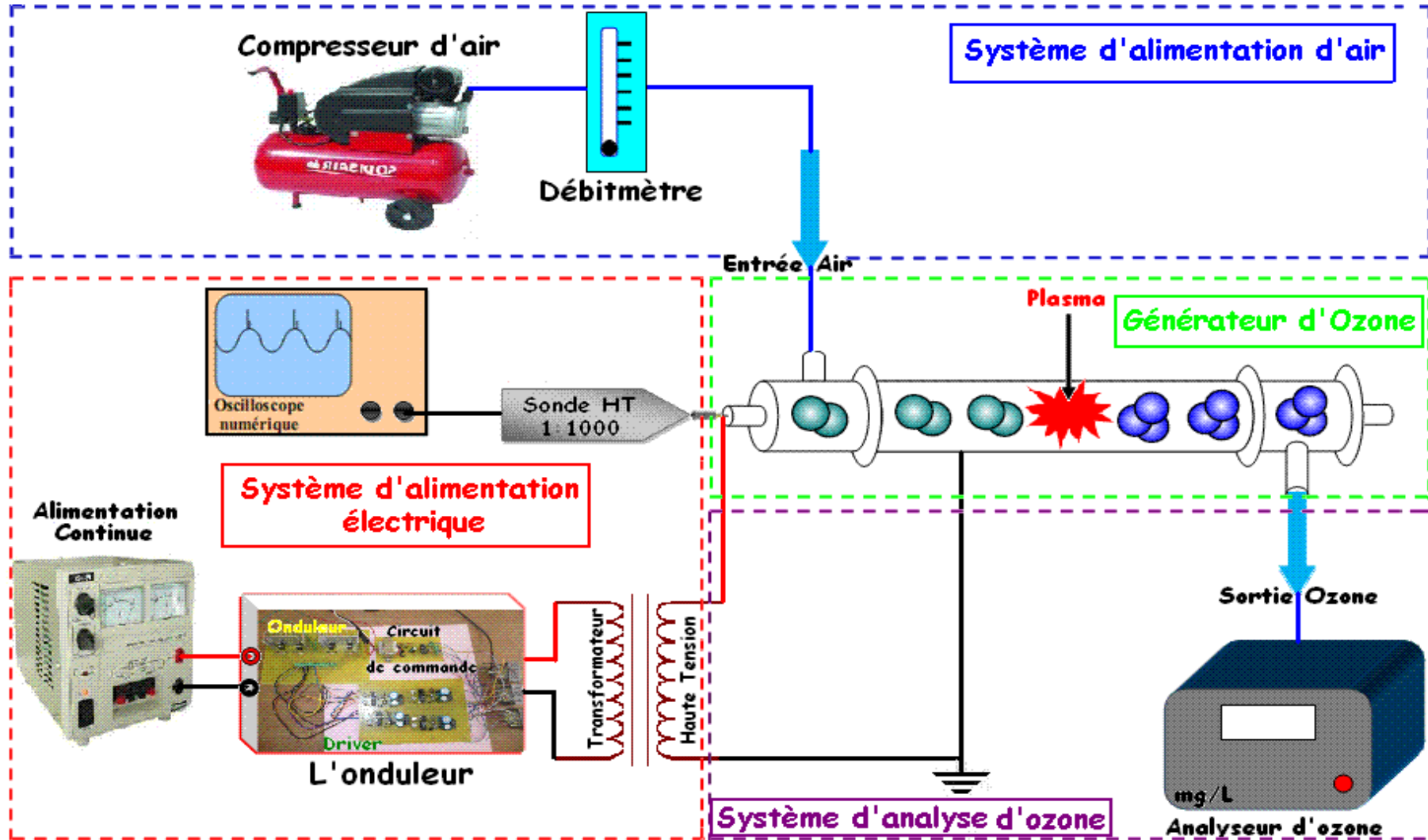
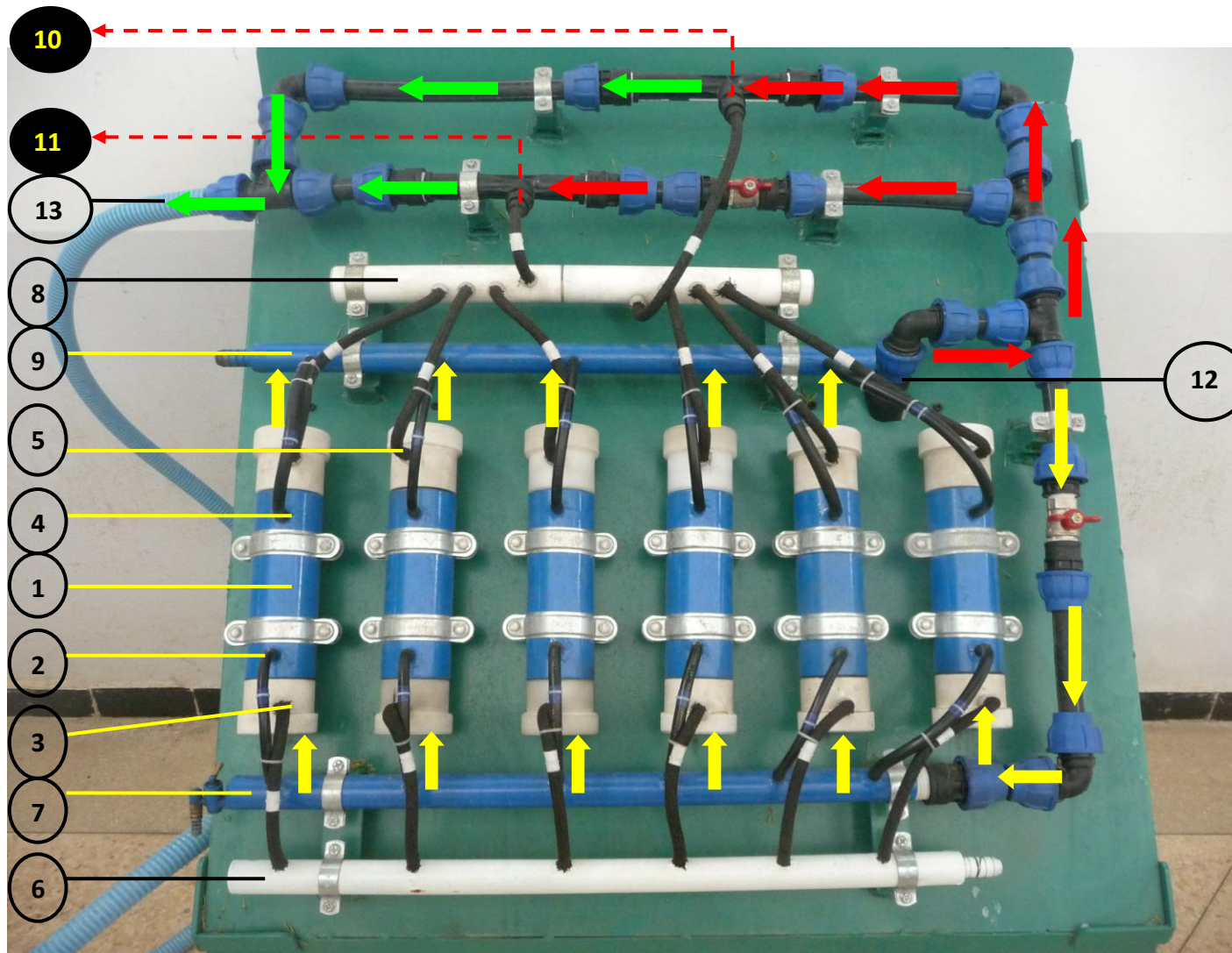


Figure 5. 29 : Schéma descriptif du dispositif expérimental de production d'ozone.



- 1- Générateur d'ozone.
- 2- Entrée d'eau de refroidissement.
- 3- Entrée de l'air dans le générateur.
- 4- Sortie d'eau de refroidissement.
- 5- Sortie de l'ozone du générateur.
- 6- Colonne d'entrée d'air.
- 7- Colonne d'entrée d'eau de refroidissement.
- 8- Colonne d'O₃ généré par les six générateurs.
- 9- Colonne d'évacuation d'eau de refroidissement.
- 10- Venturi d'aspiration 1.
- 11- Venturi d'aspiration 2.
- 12- Entrée d'eau à traiter.
- 13- Sortie eau ozonée.

- ➔ Chemin d'eau polluée à traiter.
- ➔ Chemin d'eau de refroidissement.
- ➔ Eau ozonée.

Figure 5. 37 : Photo du SKID.

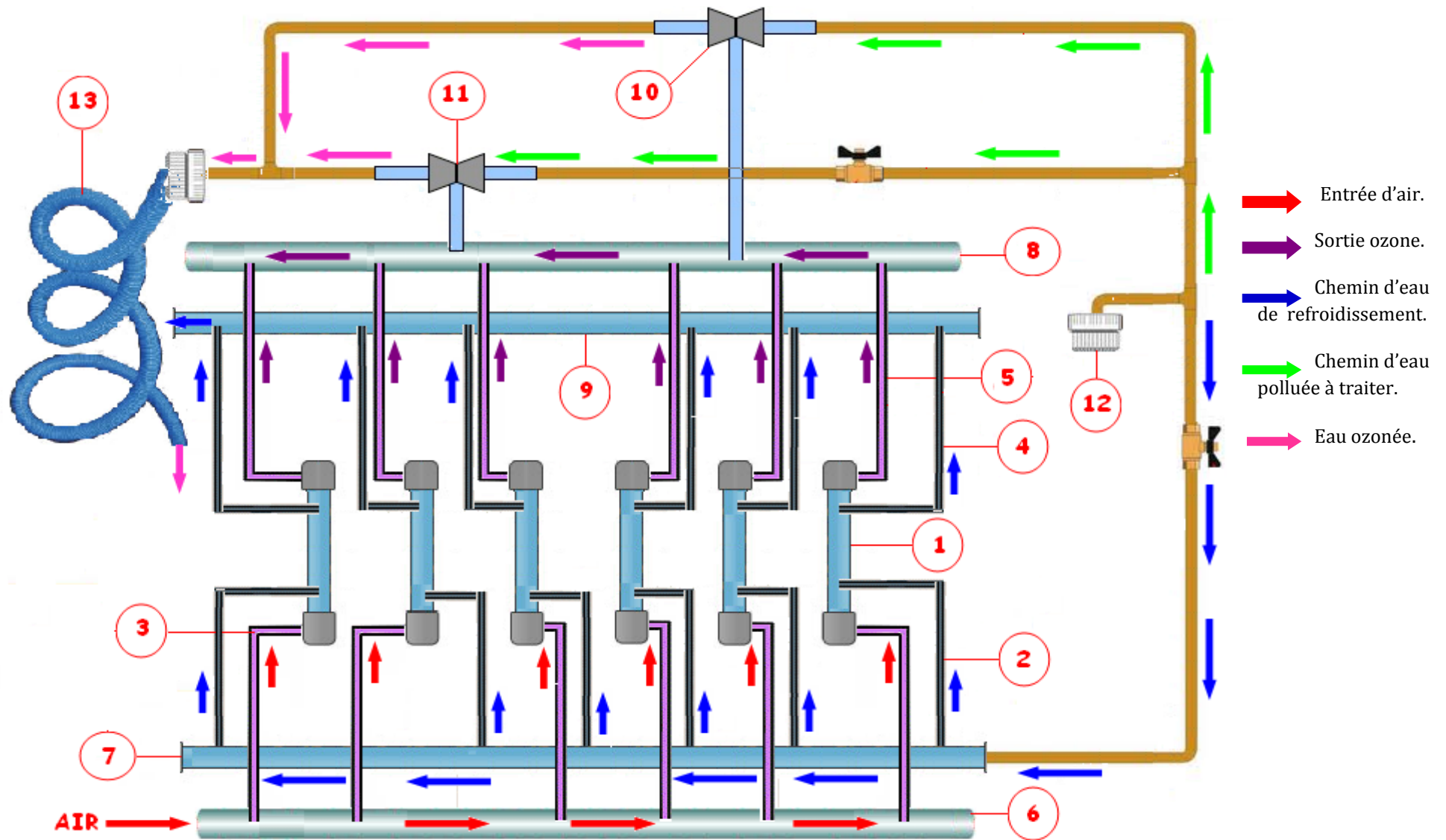


Figure 5. 38 : Le SKID mobile avec tout le système de purification d'eau.

Conclusion générale

Comme nous l'avons expliqué en introduisant ce manuscrit, le travail réalisé au cours de cette thèse se place en exclusivité au niveau de notre laboratoire dans le cadre de la recherche appliquée.

La thématique du traitement d'eau par le réacteur à plasma s'inscrit à la frontière de deux disciplines différentes : la physique des plasmas et l'électronique de puissance. Dans le cadre de cette thèse, le travail est plutôt sur la caractérisation des plasmas et le développement de plusieurs réacteurs à plasma pour produire de l'ozone que sur l'analyse de l'eau. Grâce à la collaboration avec un électronicien, on a pu travailler en équipe. Le travail de cette thèse consiste en plusieurs aspects : réalisation de plusieurs générateurs d'ozone sur plusieurs étapes pour aboutir à un modèle capable de traiter de l'eau à échelle industrielle, réalisation de plusieurs alimentations haute tension à haute fréquence, utilisation de plusieurs instruments, caractérisation des cellules de traitements par une mesure électrique.

Cette thèse consistait à évaluer le potentiel des plasmas à pression atmosphérique pour la dépollution de l'eau et la conservation des aliments pour déterminer s'ils pourraient devenir une alternative pour les systèmes plasma dans les deux domaines déjà cités. Il ne faut surtout pas confondre deux notions distinctes, la stérilisation des eaux et la désinfection des eaux. La stérilisation est l'élimination totale des microorganismes ; la désinfection consiste à la destruction ou l'élimination partielle des germes pathogéniques présents dans l'eau. Pour répondre à cette question, des chambres plasma de plusieurs réacteurs DBD de géométries différentes ainsi qu'un circuit d'alimentation haute tension à haute fréquence ont tout été conçus et réalisés pour obtenir une décharge contrôlée par barrière diélectrique (DBD). Ensuite, une validation a été effectuée à l'aide des diagnostics électriques pour s'assurer d'obtenir le mode de décharge filamentaire.

La revue bibliographique nous a montré la complexité des mécanismes présidant à la création des décharges de type DBD. C'est dans ce cadre, très large, que s'inscrit notre contribution visant à apporter les éléments nouveaux, expérimentaux et théoriques,

susceptibles d'enrichir notre compréhension de la physique des DBDs. Pour ce faire, nous avons conçu un dispositif expérimental, composé d'une cellule de type DBD cylindre-cylindre permettant de créer et d'entretenir une décharge à la pression atmosphérique, et utilisant essentiellement l'air.

Avant de présenter une synthèse de nos résultats, il convient de souligner les difficultés rencontrées au cours de l'étude expérimentale réalisée. Ces difficultés résultent, pour la majeure partie, du fait de la mise en œuvre de l'alimentation haute tension haute fréquence. Cette alimentation a été entièrement conçue et réalisée comme trois blocs associés en cascade : un bloc gérant la commande, un bloc gérant l'interface de puissance (Driver) et un bloc gérant l'étage de puissance (onduleur). Ce dernier permet de maintenir un courant moyen nul dans la DBD, condition nécessaire pour garantir le bon fonctionnement du convertisseur. L'onduleur a été réalisé à partir d'un pont en H et d'un transformateur élévateur. La plage des fréquences de fonctionnement choisies se situent à des valeurs élevées. Pour résoudre ce problème, nous avons conçu et mis en œuvre un onduleur, composant synthétisé à partir de quatre IGBTs, quatre diodes et d'une logique de contrôle pour gérer la fréquence de fonctionnement.

Notre travail a donc consisté, dans un premier temps, à étudier deux décharges électriques : la décharge à barrière diélectrique surfacique et la décharge à barrière diélectrique volumique. Puis dans un second temps, il s'agissait de valider leurs possibilités. **L'application de réacteur-plasma durant cette thèse était le traitement de l'eau et la désinfection de l'air.**

La décharge surfacique est établie entre deux électrodes disposées de part et d'autre d'un isolant. Une des deux électrodes (électrode active) est des fils d'aluminium collés sur une des faces du diélectrique. Il s'agissait d'obtenir une décharge homogène et stable dans le temps. Pour ce faire, nous avons caractérisé le courant de décharge et la puissance électrique à travers plusieurs paramètres, soit géométriques comme la configuration géométrique des électrodes, la nature de l'isolant et son épaisseur, soit électriques comme la tension appliquée. Cette étude a principalement montré qu'une décharge établie sur du verre avec des électrodes haute tension sous forme de **5** fils d'aluminium permettait d'atteindre l'effet désiré : un courant stable et une puissance plus importante. Nous avons remarqué que l'épaisseur du

diélectrique influence le comportement de la décharge. Il est recommandé d'utiliser des diélectriques aussi fins que possible pour générer plus d'ozone avec des puissances faibles.

La décharge volumique est établit en appliquant une haute tension alternative de valeur moyenne nulle entre deux électrodes séparées l'une d'elle par un isolant, le diélectrique. La tension généralement appliquée est de plusieurs kV avec une fréquence allant de 100 Hz à quelques dizaines de kHz. La décharge à barrière diélectrique surfacique semble plus stable que la décharge à barrière diélectrique volumique. Un inconvénient majeur de cette seconde décharge réside dans les forts pics de courant.

Un plan d'expériences a été mis en œuvre pour modéliser expérimentalement notre procédé DBD. Une caractérisation par des "expériences – un facteur à la fois" a été étudiée dans le cas d'un système pointe-plan où nous avons exposé les résultats concernant l'influence de la distance entre pointes d_p , l'intervalle inter-électrodes d_e et l'épaisseur du diélectrique e . L'influence de chaque paramètre a été étudiée indépendamment : lorsqu'un paramètre variait les deux autres étaient maintenus constants. Nous avons décidé d'utiliser le plan d'expériences en employant une matrice composite qui permettait de modéliser et d'optimiser le réacteur. Le modèle mathématique qui en a été déduit permettait de prévoir le paramètre qui a le plus d'effet par rapport aux deux autres. Les valeurs optimales que nous avons pu calculer dans cette étude sont en accord avec les résultats que nous avons obtenus avec le modèle.

Le second axe d'étude a ensuite consisté à appliquer le réacteur plasma pour conserver des aliments et surtout pour dépolluer l'eau. L'ensemble des résultats acquis au cours de cette partie permet d'affirmer que nous disposons désormais de deux systèmes capable de produire de l'ozone.

L'ensemble du dispositif de traitement d'eau fonctionne, d'après les résultats obtenus, de façon tout à fait satisfaisante, que ce soit du point de vue sécuritaire, du point de vue robustesse ou du point de vue simplicité d'utilisation.

Le problème qui reste à résoudre concerne le réacteur : nous avons utilisé le réacteur "sans système de refroidissement" qui n'est pas suffisant pour pouvoir traiter une grande quantité d'eau avec des temps assez longs.

Quelques essais ont été réalisés avec notre dispositif mais il faut résoudre le problème du réacteur si l'on veut intéresser les industriels.

Enfin, une analyse bactériologique de l'eau ozonée a été entamé. les résultats sont très probants et l'étude doit se poursuivre.

Le présent travail a permis d'établir de solides bases sur lesquelles pourront s'appuyer les travaux futurs dans le domaine.

En prolongement de ma thèse, un SKID mobile de traitement d'eau a été monté suivant le principe de la DBD qui représente une alternative avantageuse aux méthodes classiques de décontamination. Concernant ce SKID, nous l'avons entièrement conçu et réalisé : installation d'un système de canalisation d'eau à traiter y compris le système d'eau de refroidissement, mise en place de toute la partie électrique ainsi que la partie " mécanique " associée : nouvelles électrodes haute tension et nouveaux générateurs d'ozone, dotés chacun de son propre système de refroidissement. Ce SKID est un atout important du point de vue industriel, en donnant un outil performant pour traiter rapidement l'eau.

Enfin, d'un point de vue fondamental, pour l'intérêt de la connaissance et pour les possibilités d'amélioration que celle-ci peut apporter sur le plan applicatif, il reste à exploiter ce pilote d'ozonation sur le terrain.

Perspectives

Nous ne pourrions achever ce manuscrit sans mentionner les nouvelles voies de recherche ouvertes lors de cette étude. De nombreux chemins restent inconnus et des questions restent en suspend.

Pour commencer, nous avons vu que la décharge à barrière diélectrique volumique possédait son propre inconvénient. Les importants pics de courant observés constituent un handicap non négligeable. Par conséquent, il faut encore approfondir l'étude du générateur d'ozone sur plusieurs points. Nous devons tester d'avantage l'influence du matériau, de la configuration des électrodes et des caractéristiques du signal HT appliqué.

Pour satisfaire entièrement nos exigences, d'autres études restent encore à faire. Tout d'abord, il conviendra d'étudier l'action du circuit de refroidissement par eau circulant autour des électrodes prévu dans notre générateur d'ozone. Le circuit de refroidissement absorbe l'excès de chaleur produite par la décharge. Faute de temps, l'utilisation de ce circuit n'a pas pu être menée, mais elle fait partie des prochaines étapes indispensables.

Une autre suite à donner à ce travail qui nécessite un coût d'investissement élevé est l'utilisation des alimentations pulsées. On utilise généralement une tension alternative avec une fréquence de quelques kHz pour générer un plasma réactif assez riche en espèces actives car l'emploi des fréquences électriques élevées améliore notablement le rendement de production d'ozone. Mais pour une source d'espèces actives encore plus efficace, on peut aussi utiliser des sources pulsées en particulier mono-polaires (tension uniquement positive par exemple) où l'inversion des charges se produit non pas lorsqu'on passe de l'alternance positive à l'alternance négative comme dans les DBDs classiques mais lorsqu'on passe de la partie montante à la partie descendante de l'impulsion de tension.

ANNEXE A : ALIMENTATIONS COMPLÉMENTAIRES HAUTE TENSION À HAUTE FRÉQUENCE À BASE DU CIRCUIT INTÉGRÉ NE555

1. Alimentation haute tension à base d'un circuit intégré NE555

La photographie de l'alimentation à base d'un seul CI NE555 est illustrée à la [figure A-1](#). Elle est composée de:

- ✚ deux alimentations, une de **12V** pour le CI **NE555** (partie commande) et une autre de **30V** pour la partie puissance,
- ✚ partie puissance où sont logés le MOSFET et la diode de puissance.

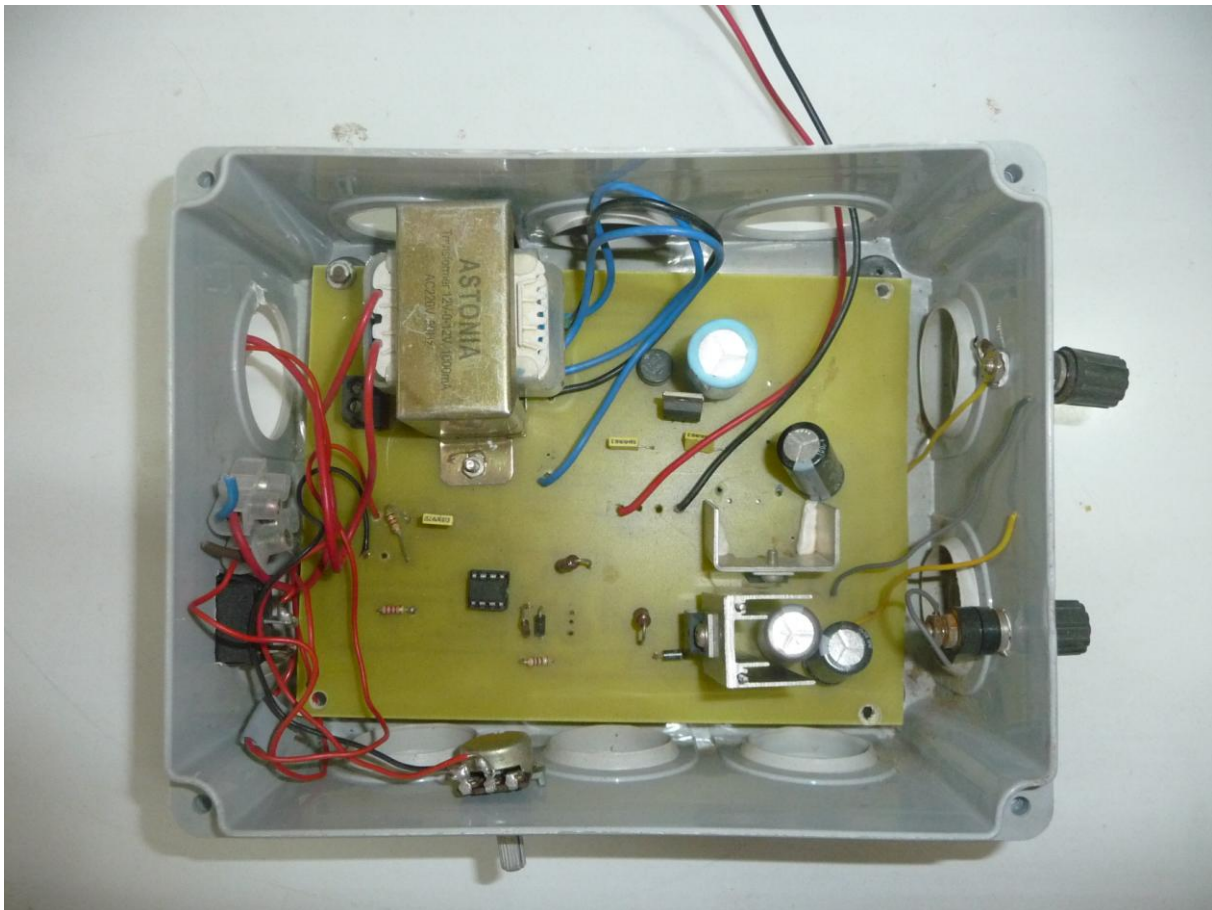


Figure A-1 : L'alimentation haute tension à base du CI NE555.

Le schéma électrique de l'alimentation haute tension à base du CI NE555 est décrit en détail dans la [figure A-2](#).

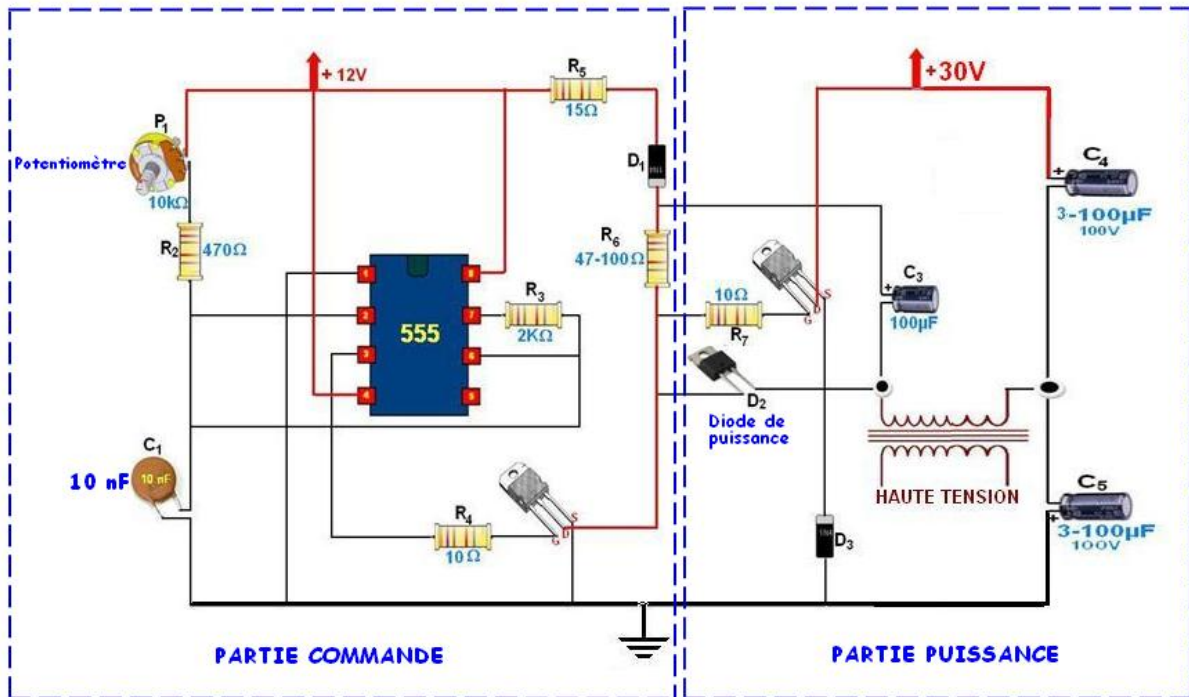


Figure A-2 : Circuit électrique de l'alimentation haute tension à base du CI NE555.

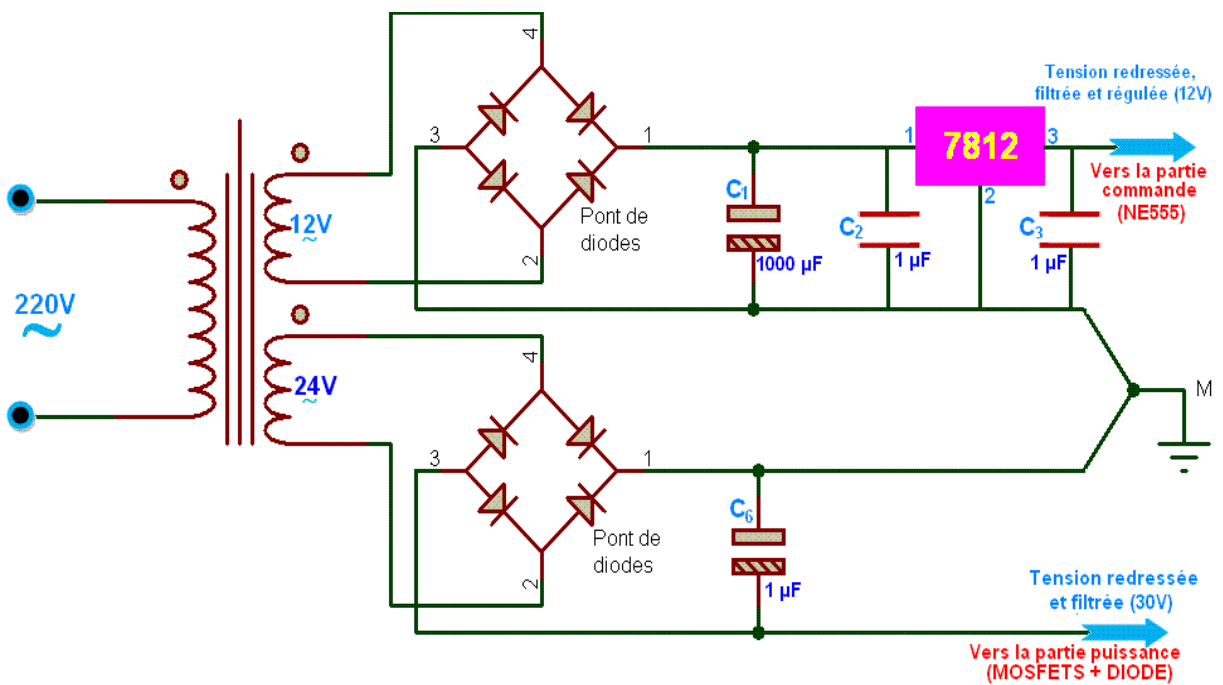


Figure A-3 : Alimentation de la partie commande (NE555) et la partie puissance.

2. Alimentation haute tension à base de deux circuits intégrés NE555 (oscillateur et temporisateur)

La photographie de cette alimentation est illustrée à la [figure A-4](#).

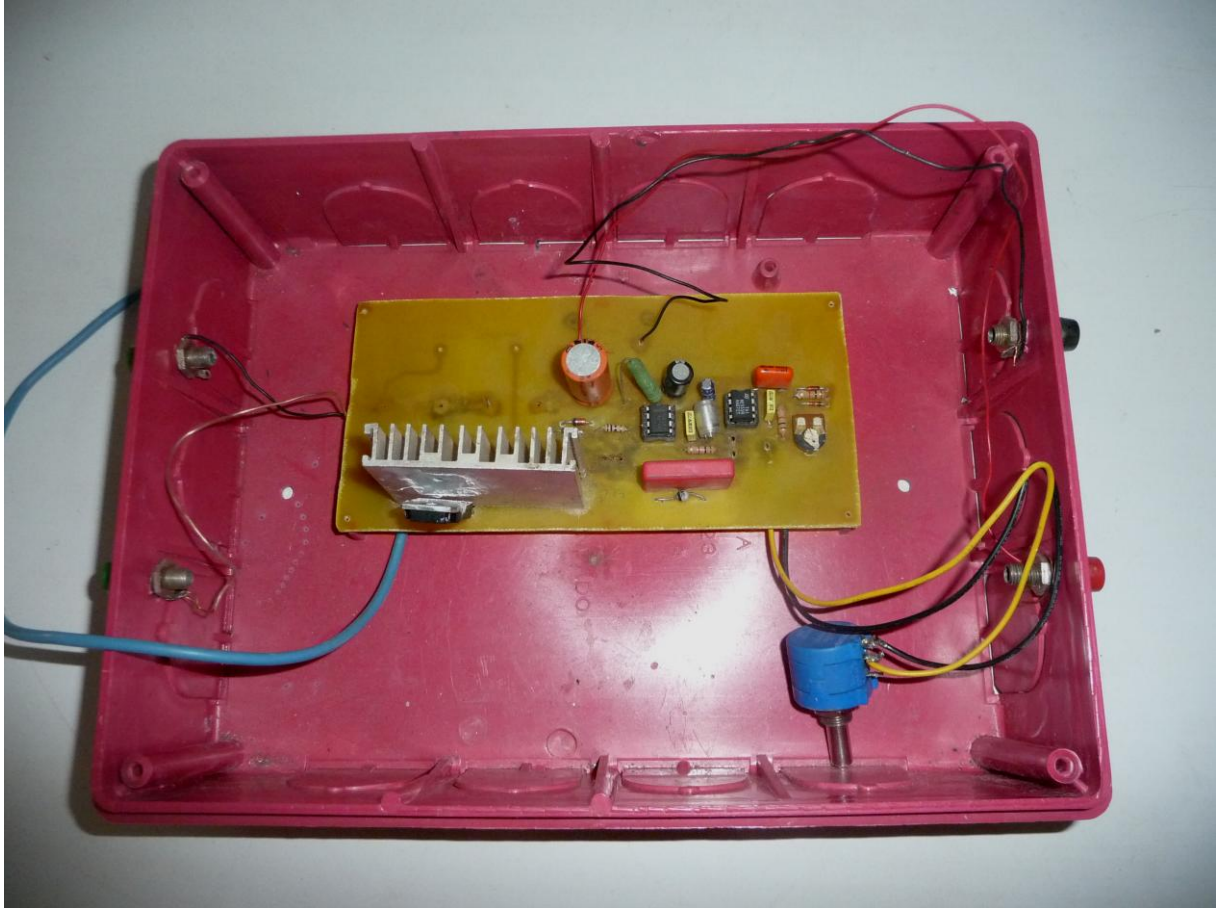


Figure A-4 : Photo de l'alimentation haute tension à base des deux CI NE555.

Le schéma électrique de l'alimentation est décrit en détail dans La [figure A-5](#).



Figure A-5 : Schéma électrique de l'alimentation haute tension à base des deux CI NE555 (Oscillateur et temporisateur).

ANNEXE B : RÉSULTATS DES ANALYSES BACTÉRIOLOGIQUES

ANNEXE C : LES PRINCIPAUX DESCRIPTEURS DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Il n'est pas actuellement possible de rechercher systématiquement tous les germes pathogènes susceptibles d'être présentes dans l'eau, étant donné leur variété et l'irrégularité de leur présence ; ainsi que la diversité et le coût des analyses qu'il convient de mettre en œuvre pour les détecter.

Néanmoins, comme l'origine de la plupart des microorganismes pathogènes véhiculés par l'eau est fécale, le principe de contrôle de la qualité de l'eau repose sur la démonstration que l'eau distribuée ne contient pas de germes provenant de contaminations fécales. Pour cela, on recherche des **indicateurs de contamination fécale**, appelés aussi germes test ou germes témoins de contamination fécale. On parle également d'indicateurs de traitement qui permettent d'évaluer l'efficacité des différents traitements de potabilisation mis en œuvre vis-à-vis de différents germes [114].

Ces indicateurs doivent répondre à des exigences de nature :

- ✚ Épidémiologique : il doit exister une relation entre un indicateur et l'apparition d'infections dans une population.
- ✚ Écologique : il doit être spécifique d'une contamination fécale : systématiquement rencontré lorsqu'il y a présence de fèces d'animaux à sang chaud et toujours absent dans les milieux non pollués.
- ✚ Bactériologique : il ne doit pas se multiplier dans l'eau.
- ✚ Technique : il doit être facile et rapide à détecter, et ce, à moindre coût.

En pratique, on cherche dans les eaux d'alimentation un panel d'indicateurs, témoins de la qualité microbiologique de l'eau.

Les principaux descripteurs de la qualité de l'eau

Les paramètres microbiologiques

a. Les microorganismes aérobies

Le principe consiste à mettre en évidence les bactéries qui se développent à **22°C** – favorisant ainsi les germes spécifiques de l'eau – et celles qui se développent à **37°C** - favorisant ainsi les germes issus de l'homme et des animaux " à sang chaud " -. Cela n'indique en rien le degré de pureté de l'eau, car toutes les eaux – y compris potable et embouteillées – contiennent une flore spécifique, et ce, quelle que soit leur origine. L'examen d'un échantillon isolé ne présente donc aucune valeur et c'est l'évolution de la flore

microbienne dans le temps et l'espace (dans les réseaux de distribution d'eau) qui apportent un éclairage sur sa qualité. Dans les eaux de captage, ce paramètre permet de suivre l'effet des pluies ou des crues ; de manière à mettre en existence une contamination. Dans les usines de potabilisation, il permet de contrôler l'efficacité des différentes étapes du traitement et en particulier de la filtration. Dans les réservoirs et les châteaux d'eau, on suit les effets de stockage et de la stagnation sur la qualité de l'eau [114].

b. Les coliformes

On les recherche traditionnellement dans l'eau potable, car leur origine fécale est connue depuis très longtemps. On parle souvent de *coliformes totaux* qui constituent un groupe de bactéries que l'on retrouve fréquemment dans l'environnement, par exemple dans le sol ou la végétation, ainsi que dans les intestins des mammifères, dont les êtres humains. Les coliformes totaux n'entraînent en général aucune maladie, mais leur présence indique qu'une source d'approvisionnement en eau peut être contaminée par des microorganismes plus nuisibles.

E. coli est le seul membre du groupe des coliformes totaux que l'on trouve exclusivement dans les intestins des mammifères, dont les humains. La présence d'*E. coli* dans l'eau indique une contamination récente par des matières fécales, et peut indiquer la présence possible de pathogènes responsables de maladies, comme des bactéries, des virus et des parasites. Les coliformes totaux et l'*E. coli* servent d'indicateurs pour mesurer le degré de pollution et la qualité de l'eau.

Dans l'eau, les bactéries coliformes n'ont ni goût, ni couleur ; de plus, elles ne peuvent être détectées que par une analyse faite au laboratoire (figure C-1).

Selon les *Recommandations Algériennes pour la qualité de l'eau potable en Algérie*, la concentration maximale acceptable de coliformes fécaux dans l'eau potable a été établie à "**aucun microorganisme détectable par volume de 100 ml**". Cela signifie donc que pour se conformer aux directives en vigueur : la présence des coliformes fécaux ou d'*E. coli* ne doit pas être détectée dans un volume de **100 ml** d'eau potable. C'est la raison pour laquelle on retrouve dans les tableaux des résultats : **coliformes fécaux/100 ml**.

c. Les streptocoques fécaux

Les streptocoques s'apparentent aux coliformes fécaux, ils sont donc des bactéries pathogènes, c'est-à-dire dangereuses pour la santé. Presque toujours reliés à la contamination

fécale, les streptocoques fécaux résistent beaucoup aux substances aseptiques qui devraient empêcher leur croissance. Certains streptocoques peuvent se transformer en germes initiateurs de plusieurs maladies telles que les angines, les otites, les méningites et d'autres toutes aussi sérieuses. Les streptocoques sont en forme de cocci oblongues et ovales, souvent associées par paires ou en chaînes très courtes (figure C-2).

Le terme "streptocoques fécaux" désigne les streptocoques généralement présents dans les fèces de l'homme et des animaux. Les streptocoques fécaux appartiennent à un groupe de streptocoques qui ne sont pas tous d'origine fécale : **groupe D**, d'où l'apparition de la lettre **D** dans les tableaux des résultats. Leur dénombrement est réalisé selon une norme : méthode de filtration d'un échantillon de **50 ml** sur membrane. Toutefois, leur recherche associée à celle des coliformes fécaux constitue un bon indice de contamination fécale. Ils témoignent d'une contamination d'origine fécale ancienne tandis que les coliformes fécaux témoignent d'une contamination d'origine fécale récente.

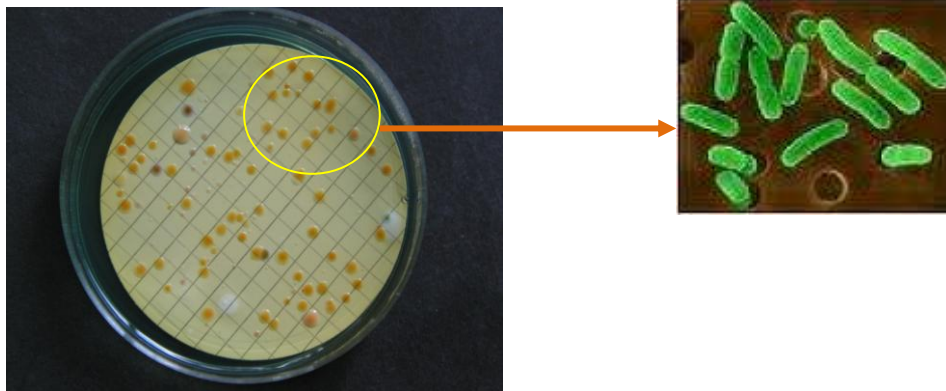


Figure C-1 : Comptage de coliformes de couleur jaune-orangée sur filtre et zoom sur ces coliformes [115].

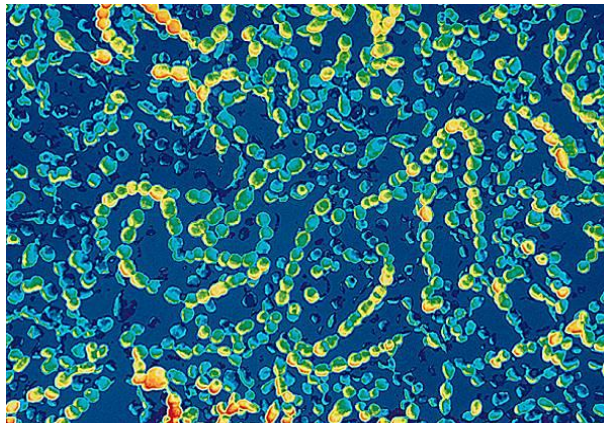


Figure C-2 : Streptocoques (en chaîne).

d. Les bactéries anaérobies sulfito-réductrices

Les bactéries anaérobies sulfito-réductrices ou les *Clostridium sulfito-réducteurs*, voire encore *Clostridium perfringens* (figure C-3) ne sont pas tous des indicateurs de contamination fécale. *Clostridium perfringens* – bien qu’effectivement présent dans les matières fécales – est un germe assez ubiquiste. L’intérêt de la recherche de tels indicateurs réside dans la propriété qu’ils ont de sporuler, ce qui les rend particulièrement résistants aux traitements de désinfection. Ils permettent en fait de mesurer l’efficacité de la filtration, seul étage de traitement capable de les arrêter. Ils sont actuellement considérés comme de bons indicateurs de l’efficacité des traitements vis-à-vis des parasites.

Leur analyse se pratique selon une norme : méthode par filtration d’un échantillon de **20 ml** sur membrane et l’incubation est réalisée à **46°C** en anaérobiose pendant **48 heures**.



Figure C-3 : Clostridium perfringens.

- [1] R. Perito Cardoso, "Plasmas micro-ondes en cavité résonnante à la pression atmosphérique : Étude des plasmas d'hélium et applications au traitement des matériaux", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy-Université, 2007.
- [2] J. Larbre, "Décontamination de surface par un procédé plasma à pression atmosphérique", Thèse de Doctorat de l'Université Paris Sud XI, 2006.
- [3] A. Abahazem, "Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [4] C. S. Bournet, "Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surface dans le domaine des biomatériaux", Mémoire de Maître Ès Science de l'Université Laval de Québec, 2007.
- [5] A. Vincent, "Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par isotope", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Pierre et Marie Curie, 2002.
- [6] N. Dubus, "Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2009.
- [7] C. Noël, "Plasma micro-ondes d'argon à la pression atmosphérique : Diagnostics et applications au nettoyage des surfaces", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [8] A. Sublet, "Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de couches d'oxyde de silicium", Thèse de Doctorat Ès Sciences de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [9] I. Enache, "Étude expérimentale et modélisation du transfert de matière dans des décharges de Townsend à pression atmosphérique en mélange HMDSO-N₂O-N₂ et SiH₄-N₂O-N₂", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2007.
- [10] M. A. Djibrillah, "Éléments de conception d'un générateur électrique pour l'alimentation d'un dispositif à décharge à barrière diélectrique", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.
- [11] Y. Lagmich, "Diagnostic et modélisation d'une décharge à barrière diélectrique pour le contrôle d'écoulement", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2007.
- [12] L. Martin, "Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Pierre et Marie Curie, 2005.

- [13] G. Jabbour, "Étude des excimères de krypton et de xénon par TALIF. Applications aux décharges à barrière diélectrique dans le krypton", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [14] C. Larricq-Fourcade Dit Lêride, "Étude de la pulvérisation assistée en air d'une nappe liquide et influence d'un vent ionique sur les instabilités hydrodynamiques", Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2006.
- [15] M. A. Valt, "Étude de deux procédés de polymérisation d'un précurseur gazeux dans un plasma radiofréquence basse pression et liquide déposé sur un substrat activé par décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique : Application aux propriétés antifouling", Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 2008.
- [16] R. Diez Medina, "Alimentation de puissance d'une lampe exiplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.
- [17] N. Naude, "Étude électrique de la physique d'une décharge de Townsend à la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur : modèle et expérience", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2005.
- [18] U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli, "From ozone generators to flat television screens: History and future potentiel of dielectric-barrier discharges", *Pure Appl. Chem.*, Vol. 71, No. 10, pp. 1819-1828, 1999.
- [19] J. Koprnický, "Electric conductivity model of discharge lamps", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [20] M. Hairour, "Étude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension", Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II, 2007.
- [21] K. Allégraud, " Décharge à barrière diélectrique de surface : Physique et procédé", Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique, 2008.
- [22] N. Balcon, "Atmospheric pressure Radio Frequency discharges, diagnostic and numerical modeling", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2007.
- [23] A. Labergue, "Étude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2005.
- [24] A. Berchtikou, " Décharge à barrière diélectrique dans l'hélium et le néon à la pression atmosphérique ", Maîtrise Ès Sciences Appliquées de l'Université de Montréal, 2010.
- [25] B. Dong, "Étude et caractérisation de plasmas destinés au contrôle actif d'écoulements gazeux subsoniques", Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, 2008.
- [26] N. Merbahi, "Luminescence de l'argon et du xénon dans les décharges à barrières diélectriques mono-filamentaires. Analyses électrique et cinétique", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.

- [27] R. Gouri, "Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-carré – Application aux particules submicroniques", Thèse de Doctorat de l'Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2012.
- [28] LENNTECH, "Water Treatment Solutions", <http://www.lenntech.fr>
- [29] Ozone Solutions, Inc., <http://ozonesupplies.com/>
- [30] La chimie de l'ozone stratosphérique, http://www.atmosphere.mpg.de/enid/2_ozone/-ozone_stratosph_risque_28r.html
- [31] A. Yousef, "Ozone inactivation of microorganisms: Kinetics and mechanisms", Ozone-V Conference, California, 2007.
- [32] OZONEX, <http://www.ozonex.fr>
- [33] La couche d'ozone, <http://F:\ozone\La couche d'ozone.htm>
- [34] Memotec n°29, L'utilisation de l'ozone pour le traitement de l'eau destiné à la consommation humaine", <http://www.gls.fr>
- [35] Généralités sur l'ozone, <http://www.geocities.com/>
- [36] Propriétés de l'ozone, <http://www.ca.airliquide.com/fr/>
- [37] S. Carruthens, "Introduction to ozone generation".
- [38] O₃ZOMAX, <http://www.epa.gov>
- [39] Ozone, <http://www.airnow.gov>
- [40] APPA Nord – Pas de Calais -, <http://www.appanpc.fr>
- [41] S. Wayne, "Principles of ozone generation", Watertec Engineering Pty Ltd.
- [42] Ozone 101, "Introduction to ozone", <http://www.delozone.com>
- [43] INNOVATECII, innovate-rheinbach.de
- [44] Degremont Technologies, <http://www.degremont-technologies.com>
- [45] T. Rich, "A basic comparison of ozone technologies", Water Technology Magazine, 1994.
- [46] OZY-3, <http://www.kal-tech.co.uk/ozone-generator.html>
- [47] Biozon, <http://www.basktek.com.mx/ozonof.html>
- [48] L'ozone et la décontamination, <http://ozomax-france.com>
- [49] Environmental Technology Initiative ETI, "Ozone disinfection", 1998, <http://www.nsfc.wvu.edu>
- [50] TRIO₃ Industries, Inc, "Ozone use in agriculture, the food industry, and related sectors".
- [51] EPA Guidance Manual – Alternative disinfectants and oxidants -, "Ozone", 1999.
- [52] A. Arbor, "Handbook of ozone technology and applications", Science Publishers, 1982.

- [53] ITT Water & Wastewater, <http://www.wedeco.com>
- [54] AirTree Ozone Technology Co., Ltd, <http://www.airtree.com>
- [55] Les applications – Les spécialistes de l'eau et de l'ozone -, http://F:\appareil-ozone\ozone_ch
- [56] E. Riboni, "Une introduction à l'ozone", <http://www.ozone.ch>
- [57] L. P. La chauvinière, "Les convertisseurs statiques", Communication technique.
- [58] "Éléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques", JMROUSSEL©Copyright, pp. 1-15, 1998.
- [59] D. Violaine, "Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques", HESPUL, 1997.
- [60] G. Sow, E. Sylla, "Les interfaces statiques de puissance pour la gestion et la mise en forme de l'énergie électrique", Séminaire de renforcement de capacité de formation en énergie renouvelable, Option : Système hybride (solaire/diesel, îles du Saloum, 2007.
- [61] N. Rasmussen, "Les différents types d'onduleurs", Livre blanc n°1, ©2004 American Power Conversion.
- [62] "Onduleurs autonomes de tension", STS Electrotechnique.
- [63] "Les composants de l'électronique de puissance", © YC/RN – ENPU 1–Composants, 2004.
- [64] P. Loglisci, "Le microcontrôleur PIC 16F84".
- [65] J-P. Salanne, "Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [66] W. Mi, "Extraction des paramètres et domaine de validité du modèle d'un composant de puissance", Thèse INSA de Lyon.
- [67] C. Bougrier, "Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique : Application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées", Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 2005.
- [68] K. Driss, "Modélisation des réactions au Break point dans une conduite de distribution d'eau potable", Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2008.
- [69] G. Olive, "Chimie Industrielle, Tome 2 – l'eau -, École Industrielle et Commerciale de la ville de Namur, 2008.
- [70] N. Lebleu, "Désinfection des eaux par procédés membranaires : étude des mécanismes de transfert des bactéries", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2007.
- [71] S. Pekárek, J. Rosenkranz, "Ozone and nitrogen oxides generation in gas flow enhanced hollow needle To plate discharge in air".

- [72] E. É. Nicoué, J-P. Émond, J-C Vuilleumard et M. C. do Nascimento Nunes, "Destruction de *Rhizopus stolonifer* et de *Botrytis cinerea* par des traitements ozone/ions", *PHYTOPROTECTION* 85 (2), pp. 81-87, 2004.
- [73] L. M. Da Silva, W. F. Jardim, "Trends and strategies of ozone application in environmental problems", *Quim. Nova*, Vol. 29, No. 2, 310-317, 2006.
- [74] S-G. Park, G-S Kim, J-E Park, Y. Einaga, A. Fujishima, "Use of boron-doped diamond in ozone generation", *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 8, pp. 65-68, 2005.
- [75] R. J. Strittmatter, B. Yang, D. A. Johnson, "Application of ozone in cooling water systems", presented at the National Association of Corrosion Engineers Corrosion '92 Meeting, Nashville, Tennessee, 27 avril au 1 mai, 1992.
- [76] H-S. Ahn, N. Hayashi, S. Satoh, C. Yamabe, "Ozone generation characteristics of superimposed discharge with surface and DC discharge", *Reports of the Faculty of Science and Engineering, Saga University*, Vol. 30, No. 1, 2001.
- [77] G. R. Rice, P. K. Overbeck, "Ozone and the safe drinking water act", *Water Quality Association, Annual Conference*, 1998 : <http://www.gdt-h2o.com>
- [78] G. R. Rice, P. K. Overbeck, K. Larson, "Ozone Treatment of Small Water Systems", *International Ozone Association Pan american Group*, Vancouver, British Columbia, Canada, 1998 : <http://www.mazzei.net>
- [79] G. R. Rice, P. K. Overbeck, K. Larson, "Ozone, an effective and affordable choice for Small Water Systems", *American Water Works Association, Annual Conference*, Chicago, Illinois, 1999.
- [80] A. L. Mazzei, R. M. Meyer, L. J. Bollyky, "Mass transfer of high concentration ozone with high efficiency injectors and degassing separators", *International Ozone Association Pan american Group, Annual Conference*, Cambridge, Massachusetts, 1995.
- [81] J. R. Jackson, P. K. Overbeck, "Ozone pipe-line gasification-degasification treatment (GDT™) performance in potable water treatments plants", *International Ozone Association Pan american Group*, Lake Tahoe, Nevada, pp. 317-332, 1997.
- [82] B. T. Stanley, "Electrolytic ozone generation and its application in pure water systems", *Ozonias Ltd*, Duebendorf, Switzerland
- [83] B. T. Stanley, "Feedgas for modern high-performance ozone generators", *Ozonias Ltd*, Duebendorf, Switzerland, 1999.
- [84] S. T. Summerfelt, J. N. Hochheimer, "Review of ozone processes and applications as an oxidizing agent in aquaculture", *The Progressive Fish-Culturist* 59, pp. 94-105, 1997.
- [85] S. T. Summerfelt, "Ozonation and UV irradiation – an introduction and examples of current applications", *Aquacultural Engineering* 28, pp. 21-36, 2003.
- [86] E. Wijnbladh, "Ozone technology for sludge bulking control", *Université d'Uppsala en Suède*, 2007.

- [87] E. Riboni, " Nouvelles technologies pour l'ozonisation et le dégazage", ozone.ch – Les spécialistes de l'eau et de l'ozone.
- [88] A. Schütze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, R. F. Hicks, "The atmospheric-pressure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources", IEEE Transactions On Plasma Science, Vol. 26, NO. 6, Decembre 1998.
- [89] A. Czernichowski, "Plasmas pour la destruction de l'H₂S et des mercaptans", Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 54, No. 3, pp. 337-355, 1999.
- [90] K. Teranishi, S. Suzuki, H. Itoh, "Dielectric barrier discharge generated by piezoelectric transformer in atmospheric pressure", IEEE Transactions On Plasma Science, Vol. 33, NO. 2, pp. 296-297, Avril 2005.
- [91] J-D. Moon, J-S. Jung, "Effective corona discharge and ozone generation from a wire-plate discharge system with a slit dielectric barrier", ScienceDirect, Journal of Electrostatics 65, pp. 660-666, 2007.
- [92] M. Kogoma, S. Okazaki, K. tanaka, T. Inomata, "Ozone, ammonia and NO_x destruction in corona discharge tubes coated with ozone catalyst", Thin Solid Films 386, pp. 200-203, 2001.
- [93] J-S. Chang, Y. Uchida, K. Urashima, R. Taylor, "Transient barrier discharge characteristics of parallel-plate-type, packed-bed, non-thermal plasma reactor under high-humidity conditions", Plasma Process. Polym, 3, pp. 721-726, 2006.
- [94] S-L. Park, J-D. Moon, S-H. Lee, S-Y. Shin, "Effective ozone generation utilizing a meshed-plate electrode in a dielectric-barrier discharge type ozone generator", ScienceDirect, Journal of Electrostatics 64, pp. 275-282, 2006.
- [95] X. Xu, "Dielectric barrier discharge – properties and applications", Thin Solid Films 390, pp. 237-242, 2001.
- [96] M. Miclea, K. Kunze, G. Musa, J. Franzke, K. Niemax, "The Dielectric Barrier Discharge – a Powerful Microchip Plasma for Diode Laser Spectrometry", Spectrochimica Acta Parts B 56, pp. 37-43, 2001.
- [97] C. Boonseng, V. Kinnares, P. Apriratikul, "Harmonic Analysis of Corona Discharge Ozone Generator Using Brush Electrode Configuration", 0-7803-5935-6/00/\$10.00 ©IEEE, pp. 403-408, 2000.
- [98] J. S. Chang, P. C. Looy, K. Urashima, A. D. Bryden, "Pulsed Arc Discharge in Water : Mechanism of Current Conduction and Pressure Wave Formations", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp-105-108, 2000.
- [99] Y. Kamase, M. Shimizu, T. Nagahama, and A. Mizuno, "Erosion of Spark Gap of Square-Wave High-Voltage Source for Ozone Generation", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 29, NO. 4, pp. 793-797, July/August 1993.
- [100] Y. Nomoto, T. Ohkubo, S. Kanazawa and T. Adachi, "Improvement of Ozone Yield by a Silent-Surface Hybrid Discharge Ozonizer", 0-7803-1462-x/93/\$03.00 ©IEEE, pp. 1995-1999, 1993.

- [101] J. A. Robinson, M. A. Bergougnou, W. L. Cairns, G. S. P. Castle, I. I. Inculet, " A New Type of Ozone Generator Using Taylor Cones on Water Surfaces", IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5-9, pp. 1797-1802, 1997.
- [102] J. D. Moon, S. T. Geum, "Discharge and Ozone Generation Characteristics of a Ferroelectric-Ball/Mica-Sheet Barrier", 0-7803-4067-1/97/\$10.00 ©IEEE, pp. 1829-1836, 1997.
- [103] Y. Konishi, S. P. Wang, M. Ishibashi, Y. L. Feng and M. Nakaoka, "Efficient Ozonizer Using PDM and PWM Controlled Resonant Inverter and its Performance Evaluations", 0-7803-3823-5/97/\$10.00 ©IEEE, pp. 971-976, 1997.
- [104] C. Ordiz, J. M. Alonso, M. A. Dalla Costa, J. Ribas and A. J. Calleja, " Development of a High-Voltage Closed-Loop Power Supply for Ozone Generation", 978-1-4244-1874-9/08/\$25.00 ©IEEE, pp. 1861-1867, 2008.
- [105] J. M. Alonso, C. Ordiz, M. A. Dalla Costa, J. Ribas and J. Cardesin, " High Voltage Power Supply for Ozone Generation Based on Piezoelectric Transformer", 0197-2618/07/\$25.00 ©IEEE, pp. 1901-1908, 2007.
- [106] U. Kogelschatz, "Atmospheric-Pressure Plasma Technology", Plasma Phys. Control. Fusion 46, pp. 63-75, 2004.
- [107] H. S. Ahn, N. Hayashi, S. Ihara and C. Yamabe, " Ozone Generation Characteristics by Superimposed Discharge in Oxygen-Fed Ozonizer", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42, Part 1, NO. 10, October, pp. 6578-6583, 2003.
- [108] C. Wang, X. He, "Effect of Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Air Plasma on Electrode Surface", Applied Surface Science 253, pp. 926-929, 2006.
- [109] M. M. Kuraica, B. M. Obradović, D. Manojlović, D. R. Ostojić, J. Purić, " Ozonized Water Generator Based on Coaxial Dielectric-Barrier-Discharge in Air ", Vacuum 73, pp. 705-708, 2004.
- [110] M. Takayama, K. Ebihara, H. Stryczewska, T. Ikegami, Y. Gyoutoku, K. Kubo, M. Tachibana, " Ozone Generation by Dielectric Barrier Discharge for Soil Sterilization ", Thin Solid Films 506-507, pp. 396-399, 2006.
- [111] " Ozone : Unités de concentration ", ozone.ch Sàrl, <http://www.ozone.ch/>
- [112] MODDE 5.0, "User guide and tutorial", Umetrics, 1999.
- [113] A. Danion, "Développement d'un réacteur à base de fibres optiques photocatalytiquement actives pour la dépollution de l'eau", Thèse de Doctorat de l'École Centrale de Lyon, 2004.
- [114] E. Jestin, " La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation des denrées alimentaires ", Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- [115] M. S. Hamdi, M. Aît Kaci, " Contribution à l'étude des paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'embouchure de l'oued Béni-Messous ", Mémoire du Diplôme des Études Universitaires Appliquées (DEUA) en Sciences de la Mer, 2008.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Publications Internationales

①. **N. HAMMADI**, R. OUIDIR, A. TILMATINE, S. M. REMAOUN, K. MEDLES, "**Experimental Investigation of the Dielectric Barrier Discharge using Design of Experiments**", Sharif University of Technology, Scientia Iranica, Transactions D:Computer Science & Engineering and Electrical Engineering, 1026-3098 © **2012**.

②. S. M. REMAOUN, A. TILMATINE, **N. HAMMADI**, F. MILOUA, K. MEDLES, "**Optimisation of one Stage Electrostatic Precipitator for Welding Fume Filtration**", Sharif University of Technology, Scientia Iranica, Transactions D:Computer Science & Engineering and Electrical Engineering, pp. 1861-1864, 1026-3098 © **2012**.

Publications Nationales

①. **N. HAMMADI**, A. W. BELARBI, S. M. REMAOUN, "**Traitement de Surface par Décharge Couronne dans un Remplissage d'Oxygène et d'Azote**", Algerian Journal Of Technology. N° spécial consacré à la 6^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Taghit, 05-07 novembre **2007**.

②. **N. HAMMADI**, R. OUIDIR, A. TILMATINE, S. M. REMAOUN, K. MEDLES, "**Étude et Modélisation Expérimentale de la Décharges à Barrière Diélectrique**", Algerian Journal Of Technology. N° spécial consacré à la 8^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tiaret, 09-11 mai **2011**.

③. S. M. REMAOUN, A. TILMATINE, **N. HAMMADI**, F. MILOUA, L. DASCALESCU, "**Optimisation d'un Filtre Electrostatique à un Étage pour la Filtration des Fumées de Soudage**", Algerian Journal Of Technology. N° spécial consacré à la 8^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tiaret, 09-11 mai **2011**.

④. **N. HAMMADI**, S-M. REMAOUN, M. ZEGRAR, Y. BELLEBNA, S. NEMMICH, A. TILMATINE, A. BENDAOU, "**Développement d'une Alimentation Haute Tension à Haute Fréquence pour la Génération d'Ozone**", Algerian Journal Of Technology. N° spécial consacré à la 9^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Laghouat, 09-11 avril **2013** (acceptée).

⑤. S. NEMMICH, Y. BELLEBNA, **N. HAMMADI**, R. OUIDIR, A. BENDAOU, A. TILMATINE, "**Étude Expérimentale de L'Influence des Paramètres sur l'Efficacité du Procédé de Génération d'Ozone par Décharge à Barriere Diélectrique**", Algerian Journal Of Technology. N° spécial consacré à la 9^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Laghouat, 09-11 avril **2013** (acceptée).

⑥. S-M. REMAOUN, F. MILOUA, Y. BRAHAMI, **N. HAMMADI**, D. BERRACHED, A. TILMATINE, "**Détermination des Valeurs Optimales d'un Filtre Électrostatique de Fumées à Deux Étages**", Algerian Journal Of Technology. N° spécial consacré à la 9^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Laghouat, 09-11 avril **2013** (acceptée).

Communications Internationales

①. **N. HAMMADI**, A. BELAÏDI, H. HADI, "**Oxydation et Nitruration de Silicium par Décharge Couronne en Atmosphère Contrôlée**", International Conference on Electrotechnics ICEL'2000, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie, novembre **2000**.

②. S. NEMMICH, A. TILMATINE, **N. HAMMADI**, D. ELMOKEDDEM, "**Réalisation d'un Générateur d'Ozone à Décharge à Barrière Diélectrique et Application pour le Traitement de l'Eau**", International Conference on Energy and Sustainable Development ICESD'11, November 29-30, **2011**, Adrar, Algeria.

③. S. M. REMAOUN, A. TILMATINE, **N. HAMMADI**, "**Identification of Optimal Values of a Two Stage Electrostatic Precipitator of Welding Fumes**", 4th International Conference on Electrical Engineering, 7-9 mai **2012**, Alger, Algérie.

④. **N. HAMMADI**, A. TILMATINE, S. M. REMAOUN, K. MEDLES, M. ZEGRAR, "**Development of High-Voltage High-Frequency Power Supply for Ozone Generation**", 8th Conference of the French Society of Electrostatics SFE-2012, Cherbourg-Octeville, France, July 3rd-5th **2012**.

⑤. S. M. REMAOUN, A. TILMATINE, F. MILOUA, **N. HAMMADI**, N. ZOUZOU, L. DASCALESCU, "**Réalisation d'un Filtre Électrostatique avec un Bon Rapport Qualité-Prix pour un Incinérateur de Déchets Médicaux**", 8th Conference of the French Society of Electrostatics SFE-2012, Cherbourg-Octeville, France, July 3rd-5th **2012**.

Communications Nationales

①. **N. HAMMADI**, "**Traitement de Surface par Décharge Couronne**", Electric and Electronics Engineering & Compus Conference EEE'2000, Institut de Génie Électrique, Centre Universitaire de Laghouat, **2000**.

②. **N. HAMMADI**, "**Analyse par Spectroscopie des Électrons AUGER et Spectroscopie des Pertes d'Énergies (ESCA) de Substrat de Silicium Traité par Décharge Couronne**", 1^{er} Séminaire National de Spectroscopie SNS'02, **2002**, Centre Universitaire T.Moulay, Saida.

Bulletin d'Analyse Microbiologie N°145/2011

Echantillon : Eau après 10 min de traitement Etat physique : Liquide N° de lot : Date de prélèvement : Date de réception : 09/06/2011 : 09/06/2011 Observation :	Réf. Client : LABORATOIRE DE RECHERCHE IRECOM Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines
--	--

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	01	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	01	<10 ²	ISO.6222
Coliformes	00	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	00	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	Abs	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/20ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
Conclusion : Eau analysée est de qualité microbiologique satisfaisante			
N.B: Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.			

Le Laboratoire

ن. س. ل. ا. ك.
 مخبر تحاليل النوعية
 2 شارع العقيد عثمان سيدي بلعباس
 س ت رقم: 04.127220

Bulletin d'Analyse Microbiologie N°144/2011

Echantillon	: Eau après 5min de traitement	Réf. Client : LABORATOIRE DE RECHERCHE IRECOM Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines
Etat physique	: Liquide	
N° de lot	:	
Date de prélèvement	: 09/06/2011	
Date de réception	: 09/06/2011	
Observation	:	

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	00	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	16	<10 ²	ISO.6222
Coliformes	21	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	00	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	Abs	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/20ml	Abs	Abs	ISO.6461/1

Conclusion : Eau analysée est de qualité microbiologique **non satisfaisante**

N.B: Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.

Le Laboratoire

مختبر تحليل النوعية
 2 شارع العقيد عثمان سبيدي بلعباس
 رقم: 1.04.127220

Bulletin d'Analyse Microbiologie N°143/2011

<p>Echantillon : Eau après 0 min de traitement Etat physique : Liquide N° de lot : Date de prélèvement : Date de réception : 09/06/2011 Observation :</p>	<p>Réf. Client : LABORATOIRE DE RECHERCHE IRECOM Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines</p>
---	--

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	04	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	26	<10 ²	ISO.6222
Coliformes	28	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	00	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	Abs	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/20ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
<p>Conclusion: Eau analysée est de qualité microbiologique non satisfaisante</p>			
<p>N.B: Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.</p>			

Le Laboratoire

ن. س. ل. ك
مخبر تجاليل النوعية
2، شارع الخطيب عثمان سيدي بلعباس
س ت رقم: 04، 127220

Bulletin d'Analyse Microbiologie N°0140/2011

Echantillon : Eau avant traitement Etat physique : Liquide N° de lot : Date de prélèvement : 09/06/2011 Date de réception : 09/06/2011 Observation :	Réf. Client : LABORATOIRE DE RECHERCHE IRECOM Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines
---	--

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	15	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	110	<10 ²	ISO.6222
Coliformes	28	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	00	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	03	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/20ml	Abs	Abs	ISO.6461/1
Conclusion : Eau analysée est de qualité microbiologique non satisfaisante			
N.B: Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.			

Le Laboratoire

مخبر تحاليل نوعية
 42 شارع 6 سبتة سبيدي تلمسان
 رقم: 04.04.127220

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA DÉPOLLUTION DE L'EAU ET LA DÉSINFECTION DE L'AIR PAR DÉCHARGE À BARRIÈRE DIÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ : Par définition, une **Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)** est une source de plasma froid hors équilibre caractérisée par la présence d'au moins un diélectrique entre deux électrodes métalliques. Le terme DBD regroupe, donc, les configurations de décharges pour lesquelles un courant transite entre les électrodes séparées par un gaz et par au moins une couche de diélectrique dont son introduction a pour but de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge afin d'éviter le passage au régime d'arc. La première et la plus importante des applications des DBDs est la **génération d'ozone** provenant de l'air ou de l'oxygène qui est principalement utilisé dans le traitement de l'eau pour la rendre potable et au cours de ces dernières décennies, les applications des décharges à barrières diélectriques ont été diversifiées. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de cette application, le travail est basé sur la caractérisation des plasmas et le développement de plusieurs réacteurs DBD pour produire de l'ozone. Plusieurs aspects ont été développés : réalisation de plusieurs générateurs d'ozone sur plusieurs étapes pour aboutir à un modèle capable de traiter de l'eau à échelle industrielle, réalisation de plusieurs alimentations haute tension à haute fréquence, utilisation de plusieurs instruments, caractérisation des cellules de traitements par une mesure électrique. Les premiers résultats constituaient une première approche de l'étude de la **DBD volumique** et la **DBD surfacique** et ouvraient la voie à des travaux complémentaires afin d'optimiser une cellule pour la **désinfection de l'air** (DBD surfacique) et la **dépollution de l'eau** (DBD volumique). Comme les décharges DBD requièrent l'utilisation de tension alternative pour fonctionner, une part prépondérante de cette étude a été consacrée à la conception et la réalisation d'une alimentation à haute fréquence de plusieurs kilovolts à base d'un bloc gérant un étage de puissance : onduleur à IGBTs et d'une logique de contrôle pour gérer la fréquence de fonctionnement. Le second axe d'étude a ensuite consisté à appliquer le réacteur plasma pour la stérilisation de l'air et la dépollution l'eau par l'ozone et de maîtriser un savoir-faire technologique dans les deux domaines déjà cités. L'ensemble des résultats acquis au cours de cette partie a permis d'affirmer que nous disposons désormais de deux bancs expérimentaux différents capable de produire de l'ozone à partir de la DBD. La faisabilité et l'efficacité de l'alimentation haute tension à haute fréquence, pour amorcer la DBD, ont été clairement démontrées.

المساهمة في دراسة عملية تطهير المياه و تنقية الهواء بواسطة التفريغ ذا حاجز عازل

ملخص:

بحكم التعريف، التفريغ ذو حاجز عازل (ت. ح. ع) هو مصدر البلازما الباردة العاجزة عن التوازن، حيث تتميز بوجود على الأقل عازل بين قطبين معدنيين. يشمل مصطلح ت. ح. ع، إذن، على كل تكوينات التفريغ الذي يشمل على الأقل طبقة عازلة بهدف مرور تيار بين الأقطاب مفصولة الغاز مع عرضه للحد من الطاقة التي تمر عبر كل قناة لتصريف منع الانتقال إلى نظام التفريغ الكهربي. يعتبر إنتاج الأوزون من الهواء أو الأكسجين الذي يستخدم في المقام الأول في علاج المياه الصالحة للشرب أول وأهم تطبيقات الت. ح. ع وعلى مدى العقود القليلة الماضية، قد تنوعت تطبيقات التفريغ ذات حاجز عازل. تعتبر هذه الدراسة جزء من هذا التطبيق ويستند العمل على توصيف البلازما وتطوير العديد من مولدات من نوع ت. ح. ع لإنتاج الأوزون. و عليه تم تطوير عدة جوانب من بينها : إنشاء عدة مولدات لإنتاج الأوزون على عدة مراحل لتحقيق نموذج قادر على معالجة المياه لإنتاج نطاق صناعي، تحقيق عدة طاقات كهربائية عالية الجهد والتردد، استخدام أجهزة مختلفة وتوصيف خلايا علاج عن طريق قياسات كهربائية. كانت النتائج الأولية على النهج الأول لدراسة ت. ح. ع من حيث الحجم و ت. ح. ع من حيث المساحة ومهد الطريق لمزيد من العمل لتحسين خلية لتنقية الهواء (ت. ح. ع للمساحة) وأخرى لتطهير المياه (ت. ح. ع للحجم). بما أن ت. ح. ع تتطلب استخدام جهدا متناوبا لاشتغالها، قد خصص جزء كبير من هذه الدراسة إلى تصميم وتنفيذ جهاز طاقة عالية التردد من عدة كيلو فولت مستند من طابق للاستطاعة عن طريق عاكس متضمن لأربع IGBT ومنطق تحكم لإدارة تردد التشغيل. تألق الجزء الثاني من هذه الدراسة في تطبيق مفاعل البلازما لتعقيم الهواء وتطهير المياه عن طريق الأوزون والتحكم في الداية في كل من المجالين المذكورين أعلاه. جميع النتائج التي تم الحصول عليها في هذا الجزء، تثبت أن لدينا حاليا جهازين مختلفين قادرين على إنتاج الأوزون بواسطة التفريغ ذو حاجز عازل. وقد أظهرت بوضوح مدى جدوى وفعالية جهاز الطاقة الكهربائية عالية التردد والجهد لتشغيل الت. ح. ع.

CONTRIBUTION TO STUDY OF WATER TREATMENT AND AIR DISINFECTION BY DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

ABSTRACT: A Dielectric Barrier Discharge (DBD) is defined as a source of no-equilibrium cold plasma characterized by the presence of at least one dielectric between two metal electrodes. The term DBD includes, therefore, the configurations of discharges for which a current passes between the electrodes separated by a gas and at least one dielectric layer is used to limit the energy that passes through each discharge channel to prevent the transition to arc regime. The first and most important applications of DBDs is the **ozone generation** from air or oxygen which is used primarily in water treatment, and over the few decades applications of dielectric barrier discharge have been diversified. This thesis is part of this application; the work is based on the characterization of the plasma and development of several DBD reactors to produce ozone. Several aspects have been developed: build-up of several ozone generators for treating water even at industrial scale, implementation of various high voltage high frequency power supplies, use of several instruments and the electrical characterization of DBD reactors. The initial results were a first approach to the study of the **volume** and **surface DBD** and paved the way for further work to optimize a cell for **air disinfection** (surface DBD) and **water treatment** (volume DBD). Such a DBD reactor requires the use of an AC voltage, a major part of this study has been devoted to the design and implementation of a high frequency power supply of several kilovolts based on a power block stage comprising IGBT inverter and control logic to manage the operating frequency. The second line of study then consisted in applying the plasma reactor for air and water treatment using ozone and control know-how in both areas mentioned above. All results obtained in this part show the high efficiency of such disinfection way. Furthermore, there are now two different experimental benches for producing ozone from the DBD.