

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :

YOUSFI Abdessamad  
SI YUCEF Mohammed Rachid

Thème

Réalisation d'une alimentation haute tension pour générateur  
d'ozone

Soutenu publiquement, le 23 /11/2020, devant le jury composé de :

M. Merad Lotfi	Prof	ESSA-Tlemcen	Président
M. Tilmatine Amar	Prof	Univ-SBA	Directeur de mémoire
M. Abdellaoui Ghouti	MCB	ESSA-Tlemcen	Examineur 1
M. Kerboua Abdelfetah	MCB	ESSA-Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019/2020

# Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

Ce mémoire a été préparé au sein de laboratoire de recherche **APELEC** de l'université de Sidi-Bel-Abbès.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement du Professeur **Mr TILMATINE Amar**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent à toute l'équipe du laboratoire de recherche **APELEC** de l'université de Sidi-Bel-Abbès en particulier **Mr DIAF Hichem**, **Mr SEMMAK Abdelkader** et **Mr MOKEDDEM Djilali** pour leur accueil et leur conseils ainsi que leur aide pour bien terminer ce modeste travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos **enseignants de l'Ecole Supérieure des sciences appliquées de Tlemcen** pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve, Nous les remercions non seulement pour le savoir qu'ils nous ont transmis, mais aussi pour la fierté et l'ambition que leurs personnes nous inspirent.

Nos sincères remerciements s'adressent aux membres du jury **Mr Merad Lotfi**, **Mr Abdellaoui Ghouti** et **Mr Kerboua Abdelfetah** qui nous ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Nous remercions aussi **nos familles** qui n'ont jamais hésité à nous offrir le meilleur qu'elles pouvaient et tous **nos camarades** de promotion ainsi que tous nos amis qui nous ont aidé de façon directe ou tout simplement par leurs présences et leurs soutiens moral.

Finalement, on tient à remercier, **Mr ROUISSAT Bouchrit** le directeur général de notre école pour ses efforts, ainsi que toute l'équipe pédagogique de l'ESSAT et les intervenants professionnels responsables de la formation de la filière « Electrotechnique option énergie et environnement », pour avoir assuré la partie théorique.

# Dédicace

*C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail :*

*A l'être le plus cher de ma vie, **ma mère** qui m'as arrosé de tendresse et d'espoirs, et m'as béni par ces prières.*

*A celui qui ma fait moi un homme, **mon père** qui m'as supporté et m'as dirigé vers la gloire*

*A mes chers sœurs (**Meriem, Nor el houda, Khadidja**) qui m'ont soutenus durant mes années d'études.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.*

*A mon cher binôme et frère **Si YUCEF Rachid.***

*A Rabie et chiheb, mon cousin **Imad Eddine.***

*A mes chers amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*A tous mes amis de promotion de 5<sup>ème</sup> année électrotechnique.*

*A toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

*Merci !*

*Abdessamad*

# Dédicace

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère mère,*

*A Mon cher père,*

*Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me  
soutenir*

*Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs,*

*A ma sœur **Safia,***

*A ma sœur **Cherifia et son mari,***

*Pour leurs conseils précieux tout au long de mes études,*

*A mon cher binôme et frère **YOUSFI Abdessamad,***

*Pour son entente et sa sympathie,*

*A mes chers amis particulièrement **Rabie et Chiheb***

*Pour leur indéfectible soutien et leur patience infinie,*

*Rachid*

# Résumé

## « Réalisation d'une alimentation haute tension pour générateur d'ozone »

Ce mémoire porte sur le développement d'une alimentation haute tension à haute fréquence pour alimenter des décharges à barrière diélectrique (DBD). La DBD est une décharge permettant de produire des plasmas froids à la pression atmosphérique qui peuvent avoir de nombreuses applications. Parmi ces applications, nous avons utilisé la DBD en tant que générateur d'ozone. Ce dispositif est fortement capacitif et son alimentation doit délivrer plusieurs kilovolts pour allumer et entretenir la décharge. Cette haute tension est obtenue à l'aide d'un transformateur élévateur. L'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 et une interface de commande pour gérer la fréquence de fonctionnement qui doit être proche de la fréquence de résonance. Ce type d'alimentation est encore utilisé de nos jours grâce à ses excellentes caractéristiques.

## «إنجاز مصدر طاقة عالي التوتر لمولد الأوزون»

تركز هذه الأطروحة على تطوير مصدر طاقة عالي الجهد من أجل التفريغ هو تفريغ لإنتاج البلازما الباردة ذو حاجز عازل (ت ح ع) , (ت ح ع) هو تفريغ يسمح بإنتاج البلازما الباردة تحت الضغط الجوي والتي يمكن أن يكون لها العديد من التطبيقات ومن بين هذه التطبيقات استخدامنا الجهاز كمولد للأوزون. هذا الجهاز ذو سعة عالية ويجب أن يوفر مصدر الطاقة الخاص به عدة كيلوفولت للإشعال والحفاظ على التفريغ. يتم الحصول على هذا التوتر العالي باستخدام محول تصعيد. خصصت الدراسة لتصميم وإنجاز مصدر طاقة عالي التردد بعدة كيلوفولت بناءً على كتلة تدير مرحلة الطاقة وواجهة تحكم لإدارة تردد التشغيل الذي يجب أن يكون قريباً من تردد الطنين . لا يزال هذا النوع من الأعلاف يستخدم حتى اليوم بفضل خصائصه الممتازة

# Table de matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 1 : Les décharges à barrière diélectrique

1.1	Introduction .....	2
1.2	Rappel sur les plasmas .....	2
1.2.1	Les Paramètres des plasmas .....	3
a)	Degré d'ionisation.....	3
b)	Densité électronique .....	4
c)	La fréquence du plasma.....	4
d)	Le libre parcours moyen .....	4
e)	La température électronique .....	4
1.2.2	Classification des plasmas .....	4
1.2.3	Comment génère-t-on un plasma froid ?.....	6
1.3	Généralités sur les décharges à barrières diélectrique .....	7
1.3.1	Les matériaux diélectriques .....	7
1.3.2	Principe de fonctionnement d'une DBD .....	8
1.4	Caractéristiques électriques de la DBD .....	9
1.4.1	Paramètres de régulation de la DBD .....	10
a)	Influence de la tension .....	10
b)	Influence de la fréquence .....	10
c)	Distance inter-électrodes .....	11
1.5	Configurations typiques de DBD .....	11
1.5.1	Configurations des DBDs volumiques .....	11
1.5.2	Configurations des DBDs surfaciques .....	12
1.6	Paramètres de la décharge .....	12
1.6.1	Les micro-décharges de la DBD .....	13
1.7	Application des DBDs.....	15
1.7.1	Production d'Ozone .....	16
1.7.2	Traitements de surface .....	16
1.7.3	Eclairage : lampes fluorescentes .....	17
1.7.4	Ecrans plasma .....	18
1.7.5	Médecine .....	18
1.8	Conclusion.....	19

## Chapitre 2 : Générateurs de haute tension

2.1.	Introduction .....	20
2.2.	Générateurs de tension alternative .....	20

2.2.1.	Transformateur élévateur.....	20
2.2.2.	Transformateur en cascade .....	21
2.2.3.	Circuit résonnant.....	22
2.3.	Générateurs de tension continue .....	24
2.3.1.	Quelques applications d'utilisation de la tension continue.....	24
a)	Filtre électrostatique.....	24
b)	Séparateur électrostatique.....	25
2.3.2.	Redresseur de tension alternative.....	26
a)	Redresseur à simple alternance .....	26
b)	Redresseur double alternance .....	27
c)	Doubleur de tension .....	28
d)	Redresseur en cascade .....	29
2.3.3.	Multiplicateur de tension.....	30
2.3.4.	Générateurs électrostatiques : (VAN DE GRAFF).....	31
a)	Principe de fonctionnement .....	31
2.4.	Générateurs de tensions de choc .....	32
2.4.1.	Définition.....	32
2.4.2.	Générateur de choc à un étage .....	34
2.4.3.	Générateur de choc à plusieurs étages: générateur de MARX (figure 2.18) .....	35
2.4.4.	Générateur de RUHMKORFF .....	37
2.4.5.	Générateur de TESLA.....	38
2.5.	Conclusion.....	40

### **Chapitre 3 : Réalisation de l'alimentation haute tension**

3.1.	Introduction .....	41
3.2.	Généralités sur les convertisseurs statiques .....	41
3.2.1.	Convertisseurs alternatif-continu .....	42
3.2.2.	Convertisseurs alternatif-alternatif.....	42
3.2.3.	Convertisseurs continu -continu .....	43
3.2.4.	Convertisseurs continu-alternatif.....	43
3.3.	Généralités et principe de fonctionnement des onduleurs .....	44
3.3.1.	Généralités.....	44
3.3.2.	Classification des onduleurs .....	44
3.3.2.1.	Selon la nature de l'alimentation.....	44
a)	Onduleur de tension .....	44
b)	Onduleur de courant .....	45
3.3.2.2.	Selon la nature de charge .....	45
a)	Onduleur monophasé .....	45
b)	Onduleur triphasé .....	45

3.3.3.	Principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé .....	46
	Etude des séquences de conduction : .....	47
3.4.	Commande d'un onduleur monophasé .....	49
3.4.1.	Commande pleine onde .....	49
3.4.2.	Commande décalée .....	50
3.4.3.	Commande MLI (Modulation de Largeur d'impulsion) .....	50
3.5.	Réalisation de l'alimentation haute tension .....	51
3.5.1.	Développement du circuit .....	52
3.5.2.	Description de l'alimentation .....	56
3.5.2.1.	Bloc de la commande.....	57
	Alimentation du CI SG3525 : .....	57
3.5.2.2.	Le driver des interrupteurs de puissance : .....	58
a)	La commande d'un interrupteur de puissance dans son environnement .....	58
b)	Éléments nécessaires à une structure de base d'un driver.....	58
c)	Alimentation du driver .....	60
3.5.2.3.	Bloc de puissance (onduleur) .....	61
a)	Interrupteur de puissance : .....	61
b)	Critères de choix des semi-conducteurs : .....	61
3.6.	Composants utilisés.....	62
3.6.1.	Bloc de commande.....	62
3.6.1.1.	Le contrôleur MLI SG3525.....	62
a)	Caractéristiques du SG3525 .....	62
b)	Description des pins du SG3525 .....	63
3.6.1.2.	Driver IR2110 .....	64
a)	Caractéristiques du driver : .....	64
b)	Description des pins : .....	65
3.6.1.3.	Pont de diode :(KBL610).....	65
3.6.1.4.	Régulateur de tension .....	66
3.6.2.	Bloc gérant la puissance.....	67
3.6.2.1.	Transistor IGBT (SGL60N90) : .....	67
3.6.2.2.	Diode de roue-libre (BYT79X) : .....	68
3.6.2.3.	Pont de diodes .....	68
3.7.	Transformateur élévateur à ferrite.....	68
3.7.1.	Temps mort des interrupteurs (dead time) : .....	69
3.8.	Utilisation de l'alimentation réalisée et résultats obtenus .....	70
3.8.1.	Test de l'alimentation réalisée .....	71
3.9.	Conclusion.....	72
	Conclusion générale.....	74

## Références Bibliographiques



# Index des figures

## CHAPITRE 1

- 1.1 La transition des états de la matière après chauffage.
- 1.2 Classification des plasmas en fonction de leur densité électronique  $n_e$ , de leur énergie  $kT_e$  et la longueur de Debye  $\lambda$ .
- 1.3 Configuration classique d'une DBD.
- 1.4 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.
- 1.5 Caractéristique électrique d'une DBD à une seule barrière diélectrique.  
 $V_a$  : tension appliquée sur la cellule de décharge,  $V_g$  : celle sur le gaz,  $V_{ds}$  : celle sur le diélectrique.
- 1.6 Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD).
- 1.7 Configurations de décharges de surface.
- 1.8 Quelques modèles de filament (micro-décharges) d'une DBD.
- 1.9 Représentation d'une micro-décharge.
- 1.10 Photo de la décharge luminescente générée entre deux électrodes planes recouvertes d'un diélectrique.
- 1.11 Diagramme indiquant le principe général des DBDs et leurs applications.
- 1.12 Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau.
- 1.13 Schéma du traitement à haute vitesse DBD des feuilles en plastique.
- 1.15 Configuration d'un afficheur à écran plasma.

## CHAPITRE 2

- 2.1 Transformateur HT.
- 2.2 Deux transformateurs montés en cascade.
- 2.3 Circuit électrique équivalent du transformateur et de l'isolant testé.
- 2.4 Circuit résonnant.
- 2.5 Filtre électrostatique.
- 2.6 Séparateur électrostatique.
- 2.7 Redresseur à simple alternance en charge.
- 2.8 Courbe de la tension redressée délivrée par un redresseur mono-alternance.
- 2.9 Redresseur à double alternance en charge (pont de Graëtz).
- 2.10 Courbes des tensions redressées délivrées par un pont de GRAËTZ.
- 2.11 Doubleur de SCHENCKEL.
- 2.12 Courbes des tensions redressées délivrées par le doubleur de SCHENCKEL.
- 2.13 Cascade de GREINACHER ou de COCKCROFT-WALTON à vide.
- 2.14 Multiplicateur de tension.
- 2.15 Générateurs électrostatiques : (VAN DE GRAFF).
- 2.16 Onde de choc conventionnelle.
- 2.17 Générateur de choc à un étage.
- 2.18 Générateur de Marx à 5 étages.
- 2.19 Emplacement des capacités parasites.
- 2.20 Générateur de RUHMKORFF.
- 2.21 Générateur de tesla.
- 2.22 Evolution de la tension du générateur de Tesla.

## CHAPITRE 3

- 3.1 Famille des convertisseurs statiques.
- 3.2 Principe de fonctionnement des convertisseurs alternatif-continu.
- 3.3 Principe de fonctionnement des convertisseurs alternatif – alternatif.

- 3.4 Principe de fonctionnement des convertisseurs continu-continu.
- 3.5 Principe de fonctionnement des convertisseurs continu-alternatif.
- 3.6 Onduleur de tension.
- 3.7 Onduleur de courant.
- 3.8 Schéma de principe d'un onduleur monophasé : (a) structure en demi-pont, (b) structure en pont.
- 3.9 Schéma de principe d'un onduleur monophasé de tension en pont.
- 3.10 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.
- 3.11 Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2<sup>ème</sup> demi-cycle.
- 3.12 Signal de tension complet de l'onduleur.
- 3.13 Tension de sortie d'un onduleur avec une commande pleine onde.
- 3.14 Tension de sortie d'un onduleur par commande décalée.
- 3.15 Principe de la commande MLI sinus-triangle.
- 3.16 Circuit de commande sur logiciel ISIS Proteus.
- 3.17 Circuit de puissance sur logiciel ISIS Proteus.
- 3.18 Routage de circuit de commande.
- 3.19 Routage de circuit de puissance.
- 3.20 Photographie du circuit de la commande.
- 3.21 Photographie du circuit de puissance.
- 3.22 Chaîne de l'onduleur.
- 3.23 Schéma d'un convertisseur en demi-pont.
- 3.24 Schéma électrique de l'alimentation du driver.
- 3.25 Thyristor de synthèse par association série d'un MOSFET et d'une diode.
- 3.26 Boîtier du CI SG3525.
- 3.27 Boîtier du driver IR2110.
- 3.28 Pont de redressement.
- 3.29 Régulateurs de tension.
- 3.30 Brochage du MOSFET.
- 3.31 Brochage de la diode.
- 3.32 Onduleur demi-pont alimentant un réacteur.
- 3.33 Circuit électrique de l'alimentation.
- 3.34 Photo du dispositif expérimental.
- 3.35 Concentration d'ozone en fonction de la fréquence.

# Introduction générale

L'une des principales méthodes de créer un plasma froid est l'utilisation des décharges à barrières diélectriques (DBD). Celles-ci sont des décharges produites entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz dans lequel le plasma est créé, avec au moins un diélectrique recouvrant l'une des deux électrodes au contact de ce gaz dont le rôle est d'éviter la transition de plasma vers le régime d'arc. Les décharges à barrières diélectriques ont plusieurs domaines d'application qui nécessitent l'emploi des plasmas à température peu élevée.

Par contre, le caractère capacitif du matériau diélectrique impose d'alimenter les dispositifs DBD par une source électrique alternative. De plus, la tension à appliquer pour produire le plasma est en général de l'ordre de plusieurs kilovolts. Cette haute tension alternative est obtenue en amplifiant une tension sinusoïdale à l'aide d'un transformateur élévateur.

Dans le cas de cette étude, nous nous intéresserons principalement à la réalisation d'une alimentation haute tension à haute fréquence avec transformateur élévateur à ferrite, pour cela on subdivise notre mémoire en trois parties.

Dans le *premier chapitre* nous allons tout d'abord présenter les concepts fondamentaux des plasmas et les méthodes de leur création. Nous détaillons ensuite la description des décharges à barrières diélectriques en donnant les concepts fondamentaux de ces dispositifs, leurs différentes configurations physiques possibles et leurs principales applications, en particulier la production d'ozone,

Dans le *deuxième chapitre*, nous étudions les générateurs de haute tension. Il existe trois types de tensions conventionnelles : tension alternative, tension continue et tension de choc. Notre intérêt est porté sur les transformateurs élévateurs à ferrite qui représentent une source de haute tension destinés aux applications à faible puissance.

Le *troisième chapitre* est consacré à l'étude de l'alimentation haute tension et sa réalisation. Un aperçu sur les convertisseurs statiques est présenté dans le but de situer les onduleurs en donnant leurs diverses classifications ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite, les principaux composants et le fonctionnement de l'alimentation haute tension réalisée sont décrits, en citant les étapes depuis sa conception par le logiciel ISIS Proteus jusqu'à la réalisation finale et les expériences de génération d'ozone avec un générateur d'ozone.

# CHAPITRE 1

## Les décharges à barrière diélectrique

### 1.1 Introduction

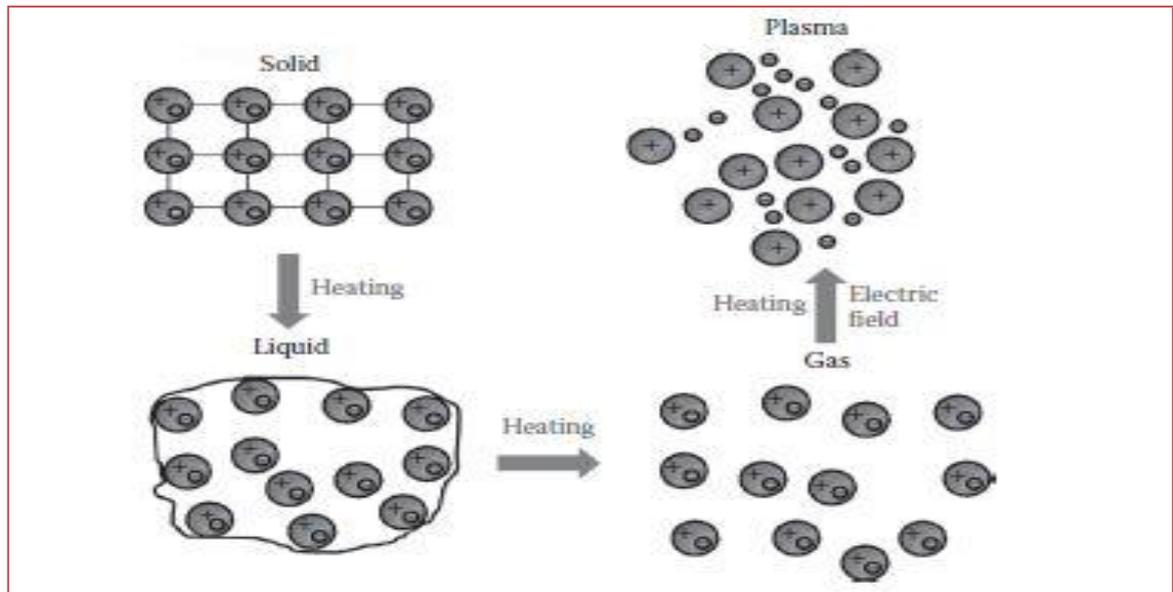
Ce chapitre a pour but d'introduire des notions essentielles permettant de comprendre et d'appréhender ce travail. Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu les plasmas et les techniques de leur génération, Puis nous expliquons en second lieu, les concepts fondamentaux des décharges à barrière diélectrique

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

### 1.2 Rappel sur les plasmas

Le terme plasma vient du mot grec qui signifie « ouvrage façonné » ce terme a été introduit en 1928 par le physicien I. Langmuir pour désigner un gaz ionisé (observé dans les tubes à décharges). Lorsqu'on chauffe un solide, ce dernier reçoit assez d'énergie pour effectuer des transitions de phases à l'état liquide, puis gazeux et finalement quand les liaisons des particules sont rompues, le gaz devient électriquement conducteur, c'est ce qu'on appelle plasma ( Figure 1.1 ) mais ceci est une définition peu explicative car en effet, il peut avoir un comportement qui caractérise les trois autres états familiers et donc en se basant sur des caractéristiques distinctives, on peut le définir comme suit :

Un gaz **quasi-neutre** dont les particules (électrons, ions, neutres) présentent un comportement **collectif** [1].



**Figure 1.1 :** la transition des états de la matière après chauffage.

Quasi-neutre est une façon mathématique de dire que la densité globale des électrons et des ions s'annulent en équilibre, autrement dit si  $n_e$  et  $n_i$  sont respectivement la densité d'électrons et densité d'ions, localement nous avons  $n_e = n_i$ .

Cependant il est important de préciser que le terme « quasi-neutre » veut dire qu'il y a une possibilité que  $n_e \neq n_i$  et donc, de cette différence de charge se forme un champ électrique et par nature, ce champs s'oppose à la charge d'espace qu'il lui a donné naissance cherchant à limiter  $n_e \neq n_i$  et ce phénomène explique le comportement collectif.

### 1.2.1 Les Paramètres des plasmas

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques, ils peuvent être classifiés en fonction de leurs paramètres. Ces paramètres sont principalement :

#### a) Degré d'ionisation

Dans un gaz ionisé où  $N$  est la densité (nombre de particule par unité de volume) des particules neutres et  $n_e$  celle des électrons libres, On définit le degré d'ionisation :

$$\tau = \frac{n_e}{N+n_e} \quad (1.1)$$

La valeur du degré d'ionisation varie en pratique entre environ  $10^{-10}$  jusqu'à 1 selon le type de gaz ionisé.

**Remarque :** On utilise également le rapport  $n_e/N$  qui traduit l'importance des collisions entre particules chargées par rapport aux collisions entre particules chargées et neutres.

**b) Densité électronique**

La densité électronique  $n_e$  est le nombre d'électrons libres par unités de volume ( $\text{cm}^{-3}$ ).

**c) La fréquence du plasma**

La caractéristique temporelle du plasma est donnée par l'inverse de sa fréquence appelée aussi « fréquence de Langmuir », cette grandeur résulte du comportement collectif des particules chargés du plasma.

Si le plasma initialement neutre subit une perturbation il retourne, dans ce cas, à l'équilibre en oscillant a la fréquence plasma électronique qui s'écrit, si l'on ne considère pas les collisions, avec ( $n_e$ ) la densité électronique et ( $m_e$ ) la masse de l'électron [2] :

$$\omega = \sqrt{\frac{n_e q_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1.2)$$

**d) Le libre parcours moyen**

Il correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux oscillations successives [3].

**e) La température électronique**

C'est la température électronique ( $T_e$ ) qui correspond à la température absolue en Kelvin ( $\text{K}^\circ$ ) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique  $kT_e$  (en électronvolt eV) avec k la constante de Boltzman, sachant que  $1 kT_e \approx 1,4 \times 10^4 \text{ K}$ .

**1.2.2 Classification des plasmas**

Il existe de nombreux types de plasmas qu'on différencier selon leurs densités électroniques  $n_e$  (nombre d'électrons par unité de volume), leurs températures électroniques  $T_e$  ainsi que la longueur de Debye  $\lambda_D$ . 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 définit par la relation suivante [4-5]:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e q_e^2}} \quad (1.3)$$

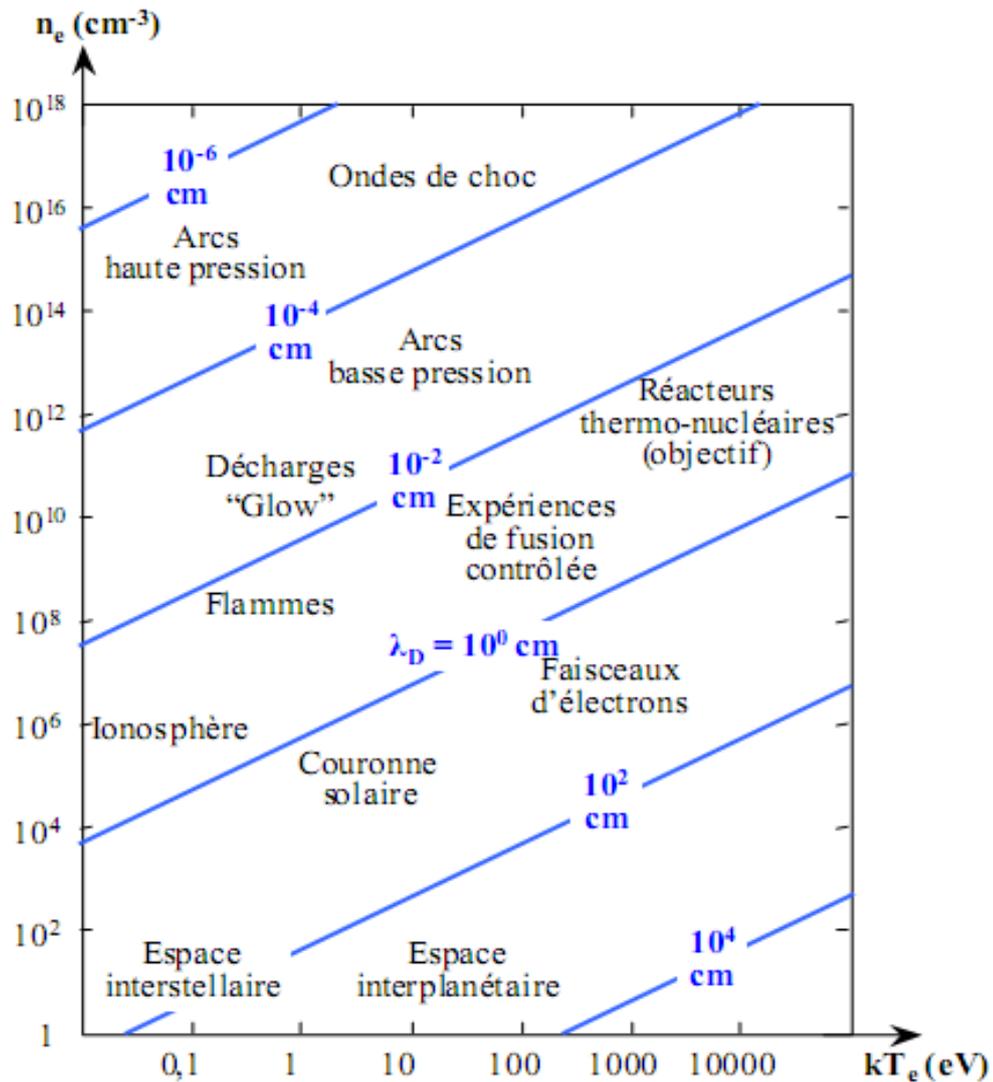
Avec :  $\varepsilon_0$  permittivité du vide ( $8,84 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ )

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

$n_e$  densité électronique ( $\text{cm}^{-3}$ )

$T_e$  température électronique (K).

$n_e$ ,  $T_e$  et  $\lambda_D$  permettent de classer les plasmas selon le schéma de la figure 1.2



**Figure 1.2 :** Classification des plasmas en fonction de leur densité électronique  $n_e$ , de leur énergie  $kT_e$  et de la longueur de Debye  $\lambda$

Une autre classification, basée sur les températures électroniques  $T_e$ , ionique  $T_i$  et celle des neutres  $T_0$  permet de distinguer les plasmas dits chauds et les plasmas dits froids [4] [6].

- 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.

### 1.2.3 Comment génère-t-on un plasma froid ?

Deux types de techniques permettent de générer un plasma froid à pression atmosphérique [7]:

- **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.

### 1.3 Généralités sur les décharges à barrières diélectrique

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont connues depuis plus d'un siècle et les premières expériences sur ces décharges ont été reportées par Siemens en 1857. Le champ d'application de ce procédé est très large : génération d'ozone, traitement d'effluents gazeux, activation et traitement de surface, laser CO<sub>2</sub>, lampe écimer, écrans plasmas, etc. et touche de nombreux domaines industriels : traitement de l'eau, environnement, électronique, textile, emballage et automobile [8]. Une DBD est une source de plasma froid hors d'équilibre caractérisée par la présence d'au moins un diélectrique entre les deux électrodes métalliques (Figure 1.3). La présence du diélectrique permet de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge et ainsi d'éviter le passage à l'arc, en contrepartie, cela impose l'utilisation d'une excitation électrique alternative [9].

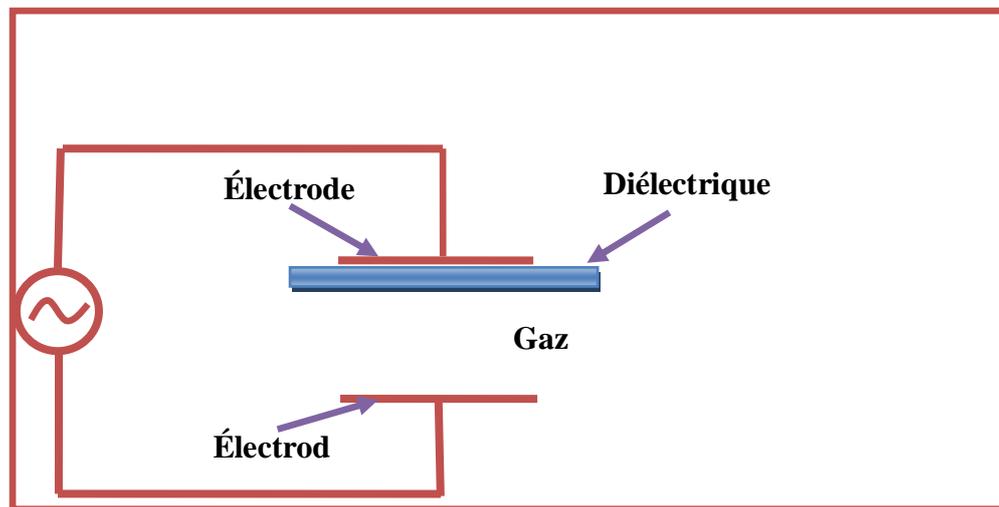


Figure 1.3 : Configuration classique d'une DBD

#### 1.3.1 Les matériaux diélectriques

Un matériau diélectrique est un milieu qui ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. À ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique cependant les charges peuvent se déplacer localement et entraîner une variation des charges (polarisation).

Quelques milieux diélectriques solides usuels

- Le verre, utilisé pour faire des isolateurs de lignes haute tension
- La céramique, très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques
- La plus part des plastiques
- Le Polypropylène, utilisé en particulier dans les condensateurs.

Un matériau diélectrique est caractérisé d'un point de vue électrique par sa constante diélectrique (permittivité). Elle permet de décrire la facilité qu'a un *diélectrique* à se polariser.

La constante diélectrique  $\epsilon$  (grandeur tensorielle) dépend de :

- **la fréquence** : à laquelle le champ électrique est appliqué. La variation de la constante diélectrique complexe en fonction de la fréquence est directement reliée au mouvement d'oscillation des atomes et des électrons du diélectrique.
- **la température  $T$**  : Ceci est une conséquence du point précédent, car le mouvement de vibration des atomes dans un diélectrique dépend de la température [10].

### 1.3.2 Principe de fonctionnement d'une 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 1.4-a).

Le diélectrique en vis-à-vis de la micro-décharge se comporte comme l'isolant d'un condensateur,  $C_{ds}$ , dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre 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.

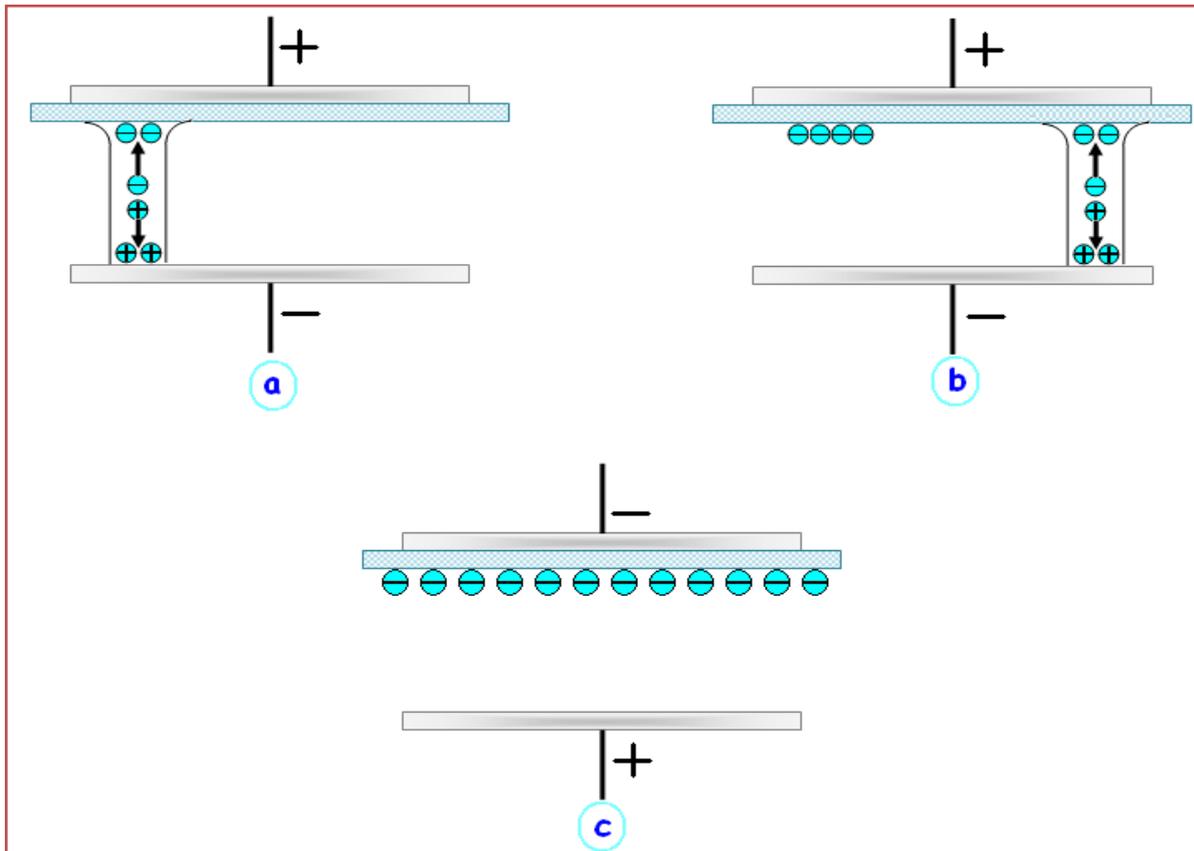
Par la suite, nous noterons  $V_a$  la tension appliquée sur la cellule de décharge,  $V_g$  celle sur le gaz et enfin  $V_{ds}$  celle sur le diélectrique [11]. Le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface du diélectrique solide en vis-à-vis du canal de décharge qui se traduit 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 [8].

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 1.4-b).

Au changement de polarité (Figure 1.4-c), les charges précédemment déposées sur le diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ plus faible que lors de la première alternance.

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 pas 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 [8].



**Figure 1.4** : 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.

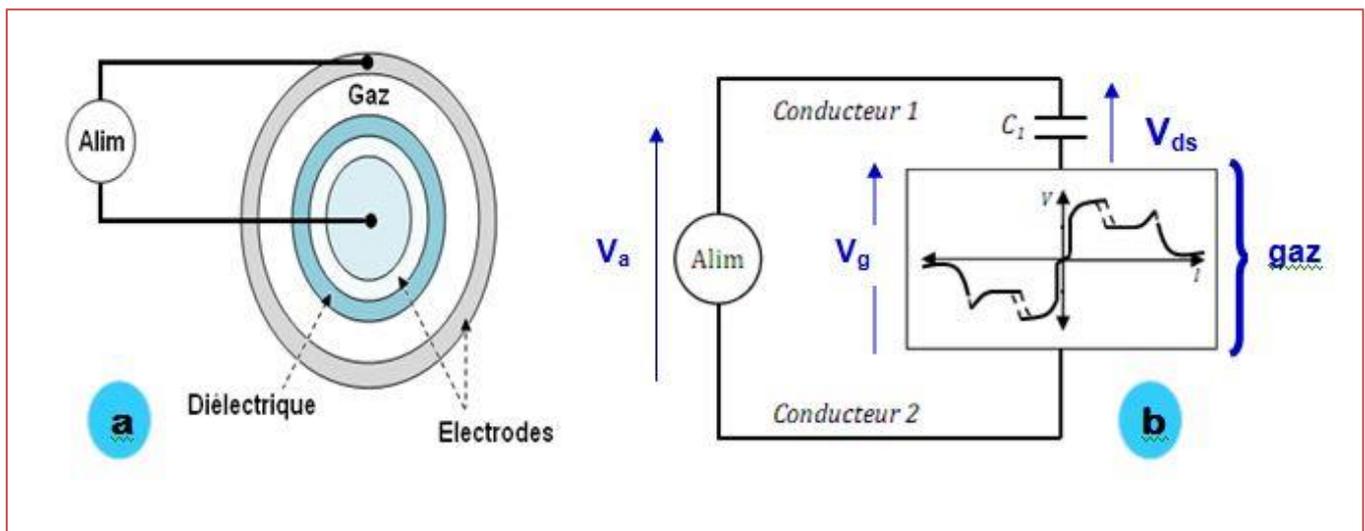
## 1.4 Caractéristiques électriques de la DBD

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, cependant le processus peut être généralisé à toutes les DBDs [12].

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 1.5 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 1.5 :** Caractéristique électrique d'une DBD à une seule barrière diélectrique  
 $V_a$  : tension appliquée sur la cellule de décharge,  $V_g$  : celle sur le gaz,  $V_{ds}$  : celle sur le diélectrique.

#### 1.4.1 Paramètres de régulation de la DBD

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

##### a) Influence de la tension

La tension régule le nombre de micro-décharges par  $\text{cm}^2$  pendant une demi-alternance. Lorsque la tension augmente, le nombre de micro-décharges par demi-alternance augmente également [13].

##### b) Influence de la 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 [13].

### c) Distance inter-électrodes

Des expériences ont montré 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.

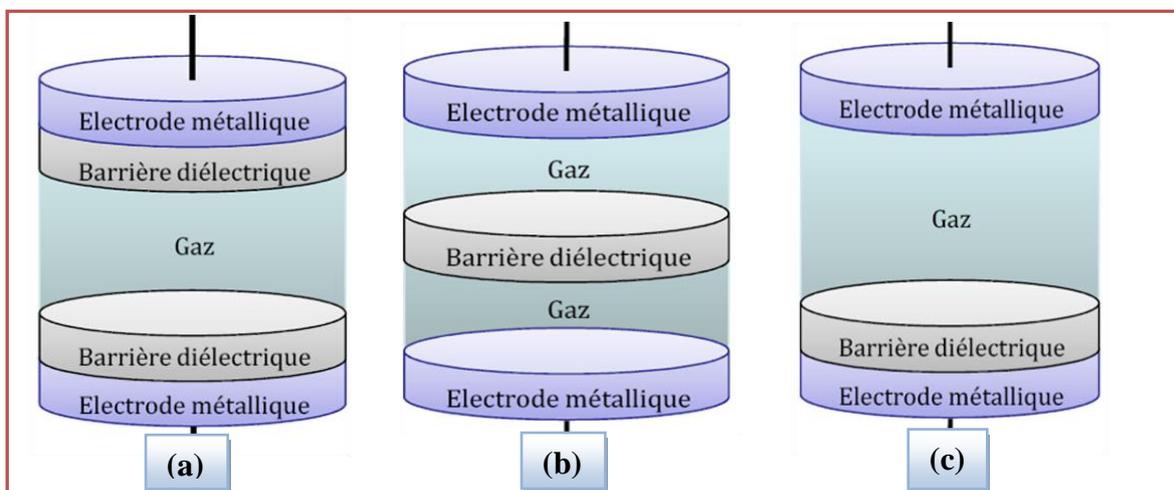
## 1.5 Configurations typiques de DBD

Selon la nature de décharge, on distingue deux configurations volumiques et surfaciques.

### 1.5.1 Configurations des DBDs volumiques

Outre la configuration classique présentée précédemment (figure 1.5), il existe d'autres configurations couramment utilisées. En effet, le terme de DBD regroupe toutes les configurations de cellule de décharge pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant.

Suivant l'application visée, deux couches isolantes peuvent y être placées. Les configurations coplanaires et cylindriques typiques d'électrodes sont données (Figure 1.6).



**Figure 1.6 :** Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD).

Les configurations coplanaires sont plutôt utilisées pour les applications de traitements de surface tandis que les cylindriques sont plus adaptées aux traitements des gaz. L'arrangement plan-plan (a) de la Figure 1.6 présente l'avantage d'éviter tout contact entre le plasma et les électrodes métalliques, condition parfois utile lors de l'utilisation de plasma corrosif par exemple.

La configuration (b) permet l'obtention simultanée d'une décharge de part et d'autre du diélectrique, propriété intéressante si, par exemple, la barrière diélectrique est réalisée à l'aide du matériau à traiter. Dans ce cas, le matériau est traité sur les deux faces simultanément [11].

### 1.5.2 Configurations des DBDs surfaciques

A la fin des années 90 aux Etats-Unis, le Pr Roth met au point une nouvelle configuration de DBD de surface et qu'il nomme « OAUGDP » (One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma). Cette décharge est établie entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre d'un 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) (Figure 1.7) [14].

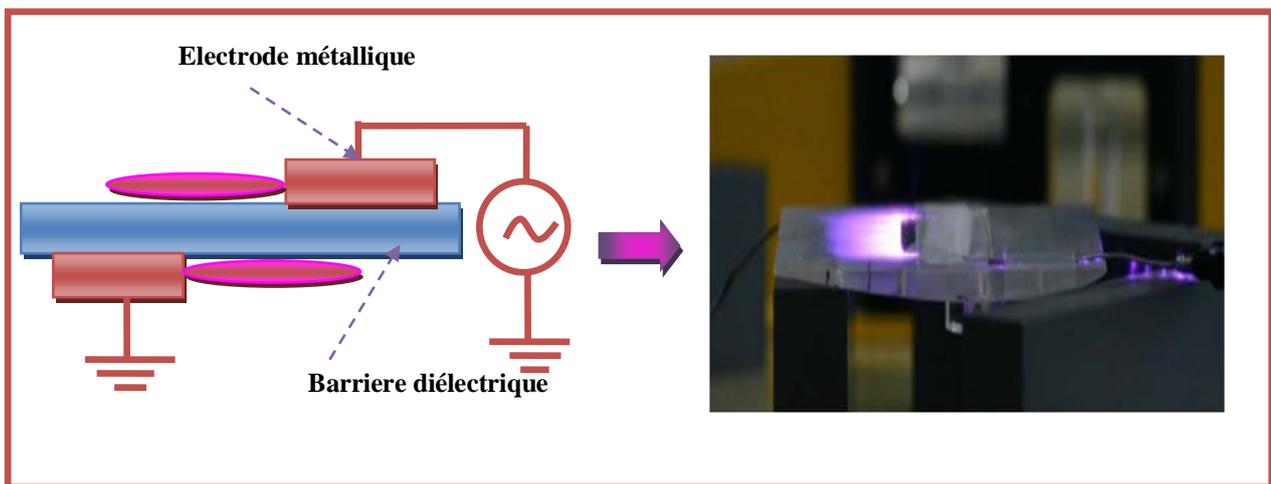
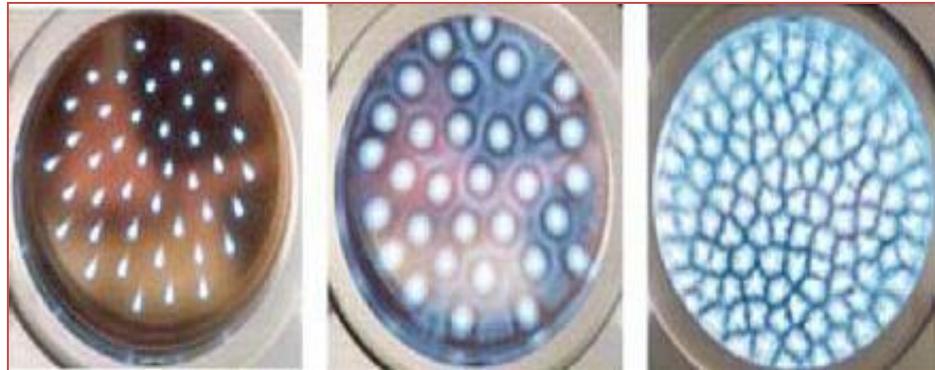


Figure 1.7 : Configurations de décharges de surface.

## 1.6 Paramètres de la décharge

Puisque le développement des micro-décharges se produit à une échelle de temps de l'ordre de la nanoseconde et le cycle de fonctionnement dans la plupart des applications est d'une durée beaucoup plus longue, les DBDs sont normalement caractérisées par un grand nombre de micro-décharges par unité de surface d'électrode et par cycle. Une valeur typique est environ  $10^6$  micro-décharges par  $\text{cm}^2$  par seconde. Pour une configuration donnée et des paramètres fixes, toutes les micro-décharges sont de nature semblable. Elles sont amorcées à une tension de claquage bien définie, et finissent après un écoulement de courant ou un transfert de charge bien définis [15].

La figure 1.8 montre les micro-décharges dans un intervalle de 1 mm dans l'air à pression atmosphérique, photographié par le biais d'une électrode transparente (échelle réelle) [8].

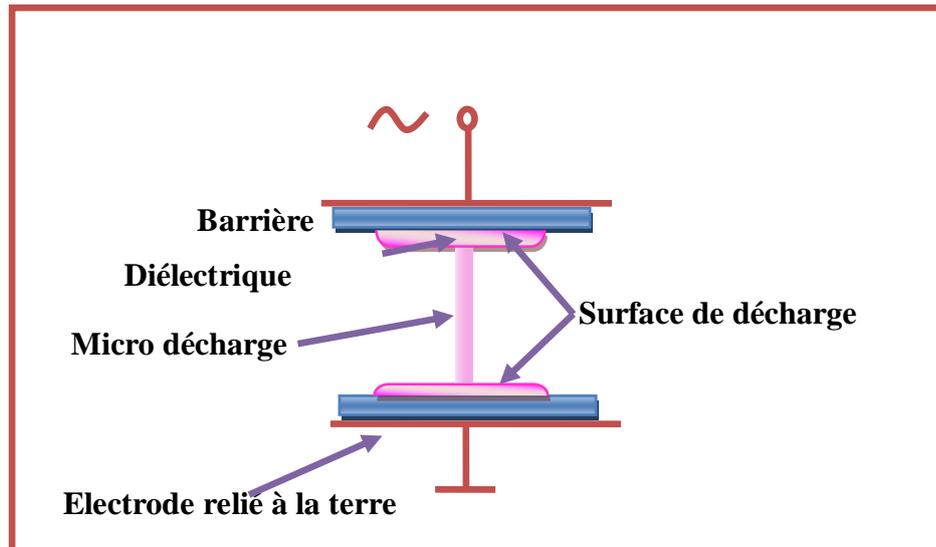


**Figure 1.8 :** Quelques modèles de filament (micro-décharges) d'une DBD.

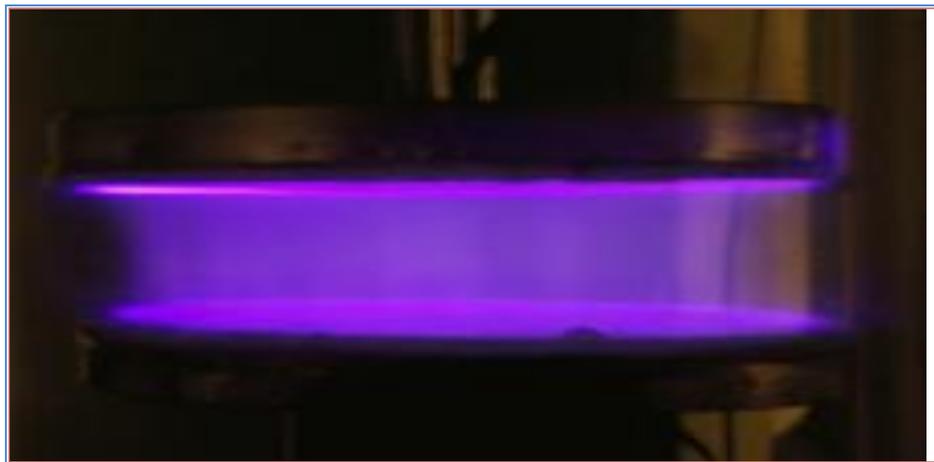
Le plus souvent, l'apparence de la DBD a haute pression, est celle montrée à la figure ci-dessus. Elle est caractérisée par un grand nombre micro-décharges de courte durée. Chaque micro-décharge est presque un canal de plasma cylindrique, généralement d'environ 100  $\mu\text{m}$  de rayon, et occupe une plus grande surface sur l'électrode à barrière diélectrique [8].

### 1.6.1 Les micro-décharges de la DBD

En appliquant un champ électrique élevé, il y a amorçage d'un claquage dans l'intervalle. Tant que la tension appliquée augmente, les micro-décharges (Figure 1.9 et 1.10) occupent des surfaces de plus en plus étendues sur le diélectrique. Ainsi, le diélectrique a un double objectif. Il limite la quantité de charge et l'énergie donnée à chaque micro-décharge et, en même temps, distribue les micro-décharges sur l'ensemble de la zone de l'électrode. La quantité de charge typique transportée par chaque micro-décharge est de l'ordre de 100pC, et la quantité typique de l'énergie est de l'ordre de  $\mu\text{J}$ . Par conséquent, la dissipation d'énergie par minute produite par une seule micro-décharge, représentant l'effet de chauffage local d'une impulsion de courant, est faible ; dans l'air en général elle est inférieure à 10 °C dans des intervalles de décharge faibles [8] [16].



**Figure 1.9 :** Représentation d'une micro-décharge.



**Figure 1.10 :** Photo de la décharge lumineuse générée entre deux électrodes planes recouvertes d'un diélectrique.

Les caractéristiques des micro-décharges sont données ci-dessous :

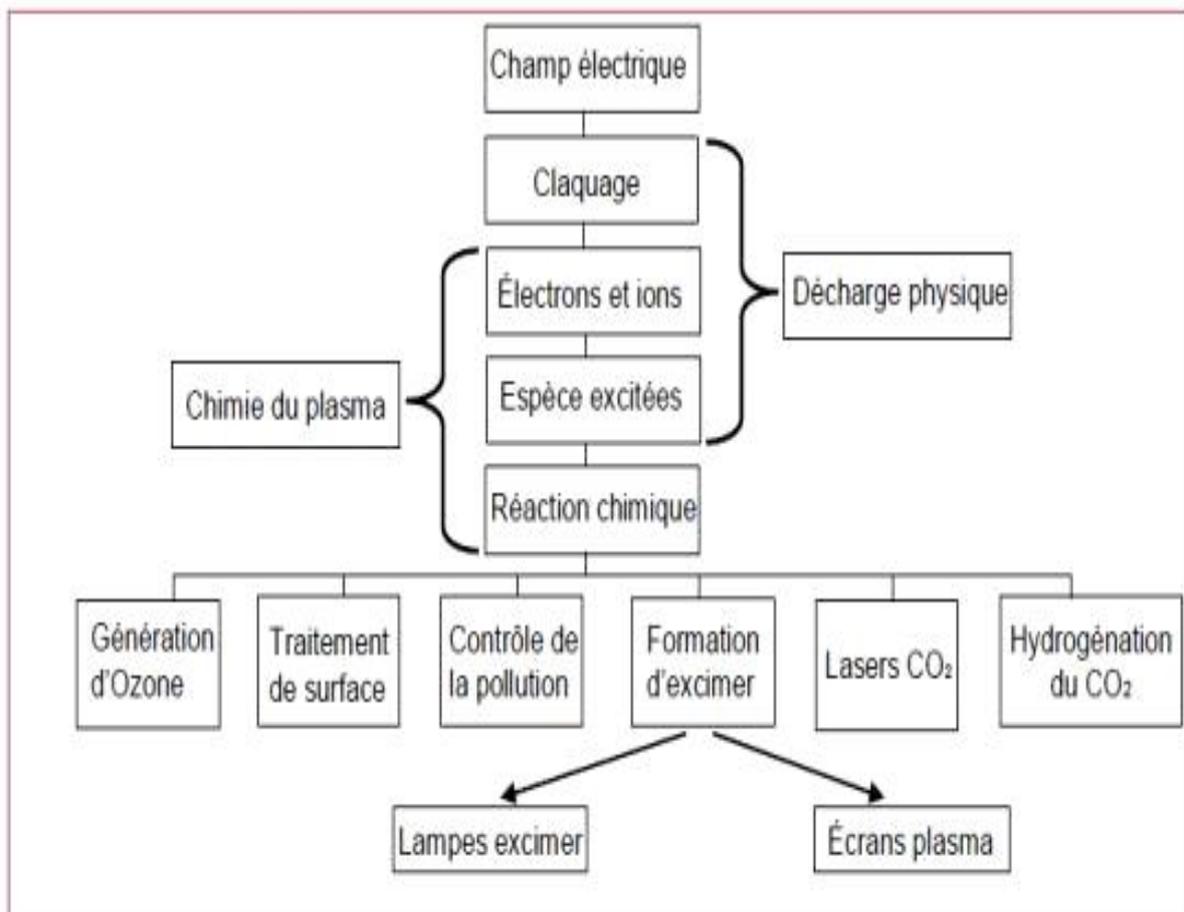
- Durée:  $10^{-9}$  à  $10^{-8}$  s
- Rayon du canal:  $10^{-4}$  m
- Crête du courant : 0,1 A
- Densité de courant:  $10^{-6}$  à  $10^{-7}$  A/m<sup>2</sup>
- Charge totale :  $10^{-10}$  à  $10^{-9}$  C
- Densité d'électrons :  $10^{20}$  à  $10^{21}$  m<sup>3</sup>
- Energie d'électron moyenne : 1-10 eV

- Température du canal : proche de la température ambiante du gaz.

La recherche sur les DBDs a mis l'accent sur l'adaptation et l'amélioration des caractéristiques des micro-décharges en faisant usage des propriétés de gaz spéciaux, en ajustant la pression et la température, et en optimisant la géométrie des électrodes, ainsi que les propriétés du diélectrique [4] [11].

## 1.7 Application des DBDs

Toutes les applications utilisant les DBDs s'appuient en général sur des processus similaires. En effet, l'application d'un champ électrique initie la décharge dans laquelle se forment des particules chargées, des espèces excitées et des radicaux libres. Les réactions résultantes de la présence de ces espèces instables conduisent à des changements chimiques dans la composition du gaz ou sur objets placés au contact de ce gaz. La figure 1.11 résume le principe général des DBDs et énumère leurs applications majeures dont certaines d'entre elles sont détaillées dans les paragraphes suivants.



**Figure 1.11 :** Diagramme indiquant le principe général des DBDs et leurs applications.

### 1.7.1 Production d'Ozone

La première et la plus importante des applications des DBDs est la génération d'ozone provenant du traitement de l'air ou de l'oxygène (Figure 1.12). L'ozone a plusieurs applications mais la plus célèbre sert essentiellement au traitement de l'eau, en éliminant les bactéries, les virus et les odeurs désagréables.

Aujourd'hui, quelques milliers d'installations sont en fonctionnement de génération d'ozone pour la désinfection des eaux. Les plus grandes atteignent des niveaux de puissance des plusieurs *MW* et produisent quelques tonnes d'ozone par jour. Bien que la purification de l'eau potable soit toujours le marché de l'ozone le plus important, et d'autres applications ont émergé [17-18].

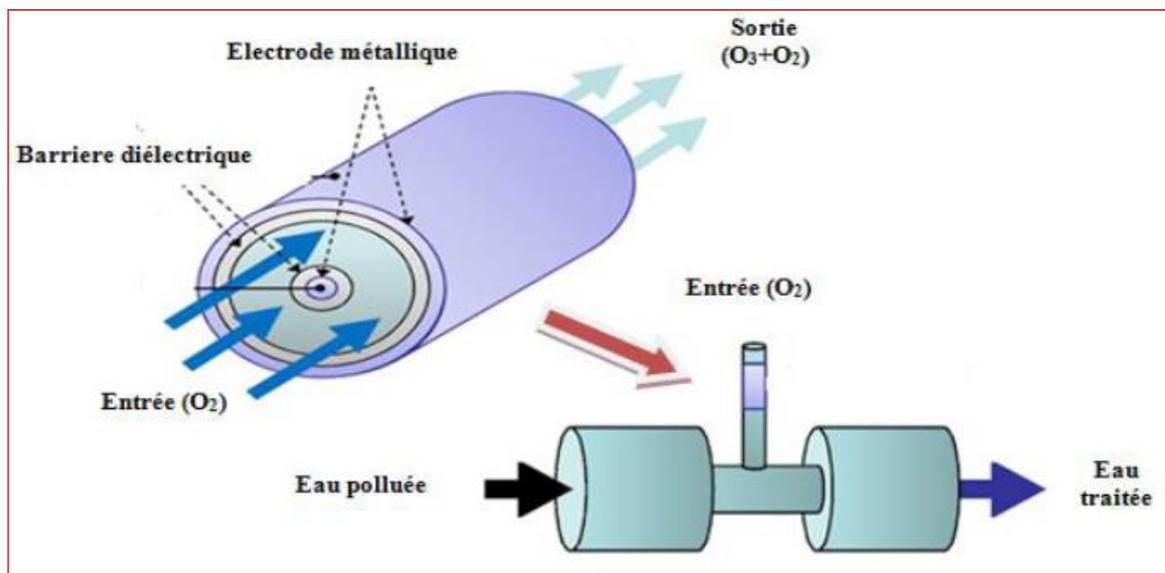


Figure 1.12 : Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau.

### 1.7.2 Traitements de surface

L'utilisation des DBDs pour les traitements de surface couvre un large spectre. Nous pouvons en citer les applications suivantes :

- Modification des propriétés de la surface d'un matériau,
- Traitement des textiles.
- Nettoyage de surfaces (silicium, aciers...),
- Désinfection et stérilisation.

L'exemple d'une application des DBDs dans un processus industriel, donné sur la Figure 1.13 est celui du traitement de films plastique. On effectue une décharge entre un rouleau, sur lequel défile le film à traiter, et des électrodes recouvertes par un diélectrique placées en vis-à-vis de ce rouleau [17], [19-20].

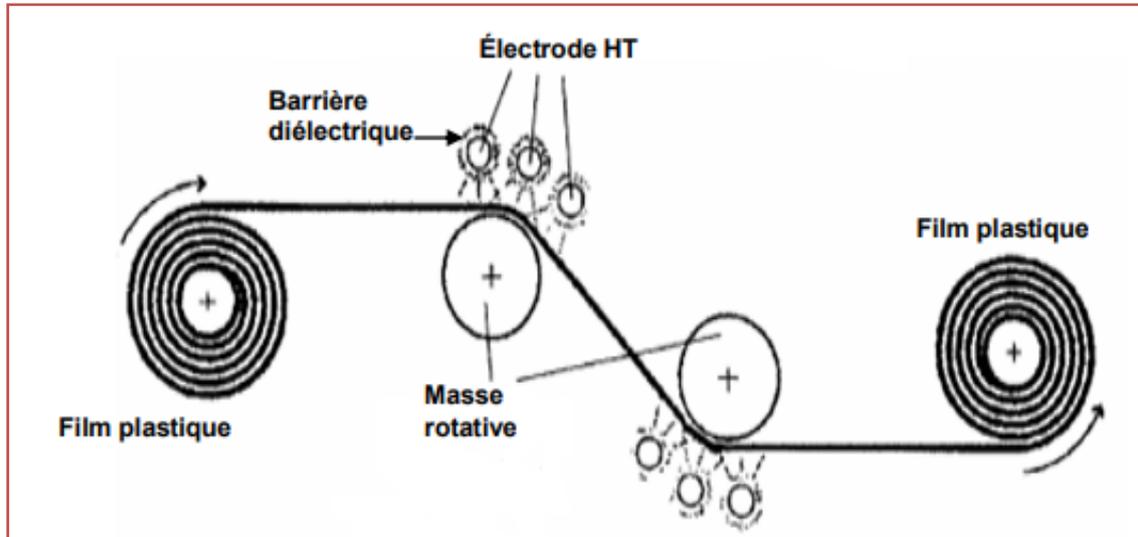


Figure 1.13 : Schéma du traitement à haute vitesse DBD des feuilles en plastique.

### 1.7.3 Eclairage : lampes fluorescentes

Un avantage majeur de ces nouvelles lampes fluorescentes est qu'elles peuvent commuter très rapidement sans surchauffe ni ralentissement. Dans les scanners et les photocopieurs, ces lampes ne sont actives que durant la phase de scan ou de copie, c'est pourquoi leur durée de vie est assez longue (Figure 1.14).



Figure 1.14 : Une lampe fluorescente.

### 1.7.4 Ecrans plasma

Les afficheurs à écran plasma AC utilisant le rayonnement VUV à xénon pour exciter le phosphore sont des nouveautés récentes sur la large palette des applications des DBDs. Un afficheur à écran plasma est constitué de deux verres plats séparés par un gap d'environ 100 $\mu\text{m}$  rempli d'un mélange de gaz rare (généralement Xe-Ne ou Xe-Ne-He) capable d'émettre des rayonnements UV (Figure 1.15).

Une matrice d'électrodes est posée sur chaque lame de verre. Ces électrodes sont couvertes par des couches fines de diélectrique de 20 $\mu\text{m}$  à 40 $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La géométrie standard des électrodes disponibles dans le commerce est coplanaire (ACC). Bien que la structure d'électrodes ACC soit la plus développée de nos jours, la structure d'électrode ACM est toutefois considérée comme la meilleure parce que les propriétés de la décharge ainsi que le schéma d'adressage sont très simples.

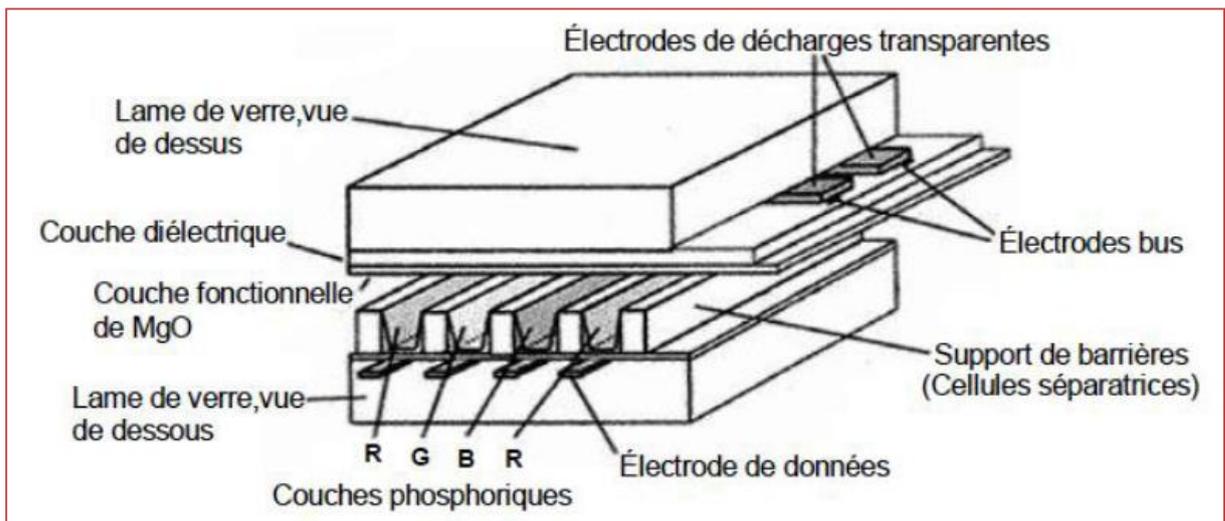


Figure 1.15: Configuration d'un afficheur à écran plasma.

### 1.7.5 Médecine

Les DBD ont été utilisés pour générer des plasmas relativement grands volumes diffusés à la pression atmosphérique et appliquées pour inactiver les bactéries. Cela a conduit au développement d'un nouveau champ d'application, les applications biomédicales des plasmas. Ce champ est maintenant connu comme la médecine de plasma.

## 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. Les concepts fondamentaux et les éléments physiques qui caractérisent ce type de décharge ont été présentés au cours du chapitre.

Ainsi, nous avons terminé par donner quelques exemples des applications des DBD parmi lesquelles on retrouve la production d'ozone.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les différents types de générateurs de haute tension utilisés dans différentes applications.

# CHAPITRE 2

## Générateurs de haute tension

### 2.1. Introduction

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans :

- les laboratoires de recherche scientifique ;
- les laboratoires d'essai, pour tester les équipements haute tension avant leur utilisation (isolateur, câble, transformateur, appareils de coupure ...).
- de nombreuses applications utilisant la haute tension (rayons X, effet couronne, générateur d'ozone, séparation électrostatique, laser...).

Par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé.

Il y a trois types de tensions conventionnelles : Tension alternative, Tension continue, Tension de choc.

### 2.2. Générateurs de tension alternative

Il y a deux types de transformateurs utilisés pour obtenir de la haute tension : les transformateurs à noyau de fer et les transformateurs à noyau en ferrite. Les premiers qui sont actuellement les plus utilisés sont volumineux et encombrants. Les transformateurs à noyau en ferrite sont de plus en plus utilisés car ils sont moins volumineux et donc beaucoup moins chers. C'est ce type de transformateur que nous avons utilisé pour fabriquer notre alimentation de haute tension [21].

#### 2.2.1. Transformateur élévateur

Le transformateur élévateur représente la source de haute tension la plus répandue et la plus utilisée dans la pratique. Ce sont des transformateurs de faible puissance (de quelques centaines de VA à quelques kVA) dont l'objectif principal est de procurer une haute tension au détriment du courant qui est de l'ordre du milliampère généralement. Ces transformateurs

qui sont destinés principalement aux laboratoires d'essais, doivent avoir une très bonne isolation car ils sont appelés à supporter les nombreux claquages qui surviennent lors des tests.

La forme de la HT délivrée par un transformateur HT est généralement différente de la forme sinusoïdale, sans toutefois dépasser les tolérances permises. Ces transformateurs possèdent généralement une borne de l'enroulement qui est reliée à la terre. De nombreux transformateurs sont des transformateurs à point milieu (voir figure 2.1).

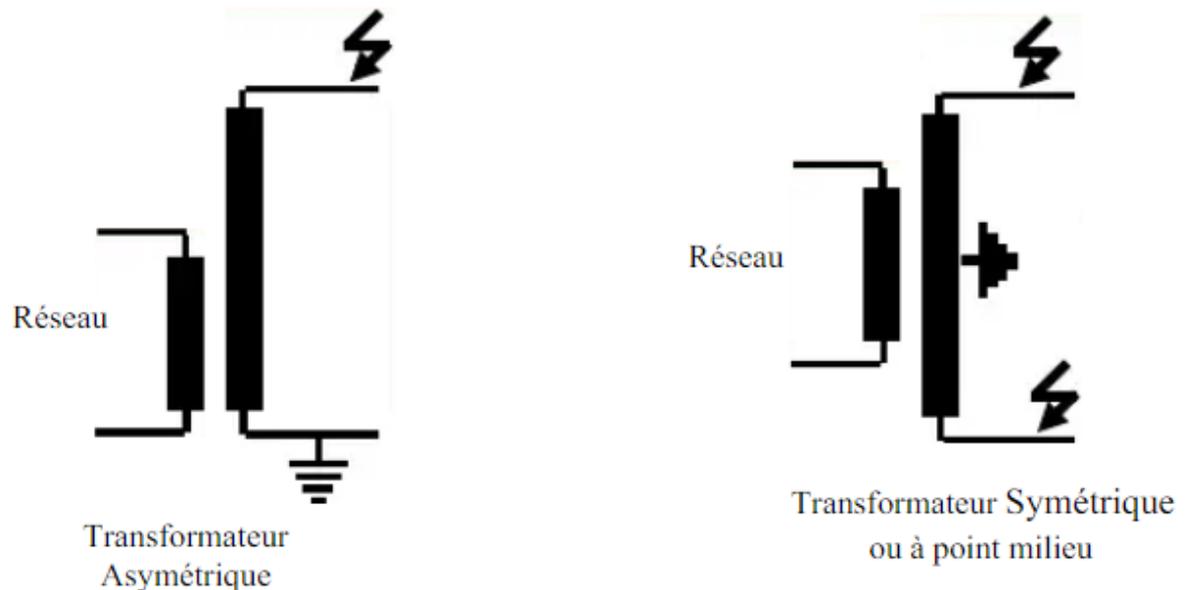


Figure 2.1 : Transformateur HT.

### 2.2.2. Transformateur en cascade

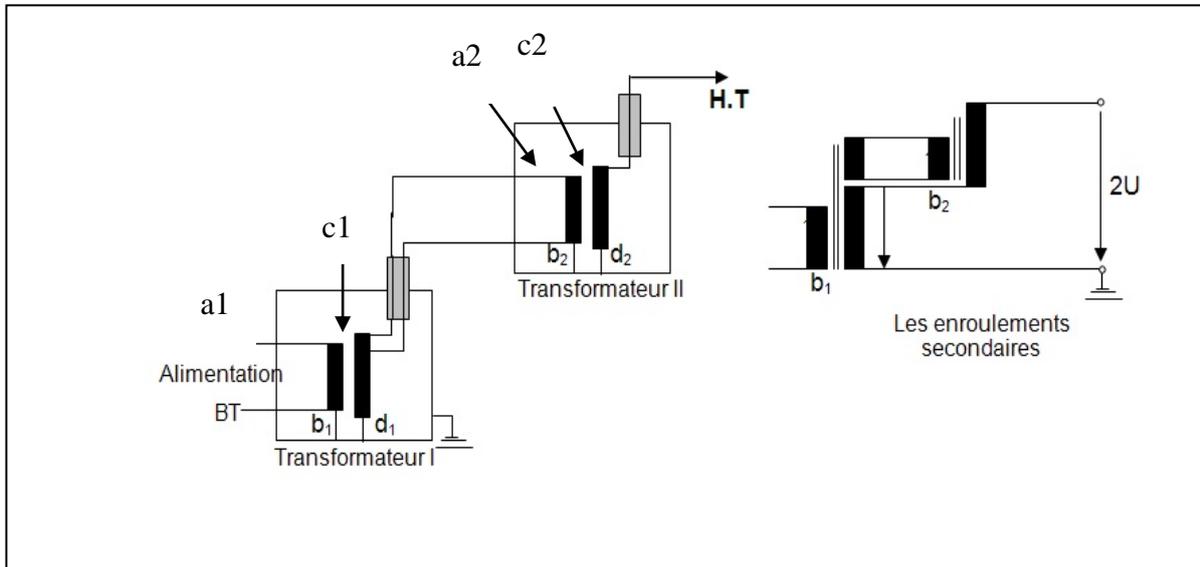
Pour des tensions supérieures à 750 kV, le coût, le transport et l'encombrement deviennent très gênants; On préfère alors recourir aux transformateurs montés en cascade.

La tension primaire  $a_1b_1$ , est reliée au primaire  $a_2b_2$  du transformateur II (voir figure 2.2).

Comme l'extrémité  $d_1$  est reliée à la carcasse du transformateur I laquelle est mise à la terre, et que l'extrémité  $d_2$  est aussi reliée à la carcasse du transformateur II laquelle est isolée de la terre, la tension obtenue du point  $c_2$  par rapport à la terre vaut pratiquement deux fois la tension secondaire  $c_2d_2$ . En effet, les tensions  $c_1d_1$  et  $c_2d_2$  sont en série.

La haute tension est contrôlée en alimentant le primaire  $a_1b_1$  par un autotransformateur. Plusieurs transformateurs peuvent être montés en cascade pour obtenir une tension plus grande. De tels transformateurs permettent d'obtenir une tension de 2 MV.

Comme l'isolation en haute tension est importante vu les champs électriques intenses, les enroulements de tous les transformateurs sont plongés dans une huile isolante.



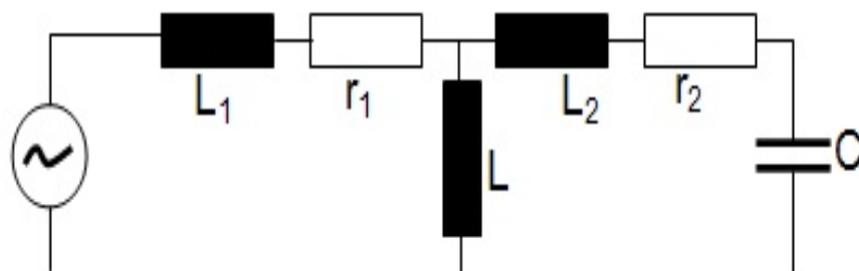
**Figure 2.2** : Deux transformateurs montés en cascade.

Comme le montre la figure 2.2, chaque étage comprend trois enroulements, excepté le 1<sup>er</sup> étage.

### 2.2.3. Circuit résonnant

Dans les essais réalisés en haute tension, quelques fois il se produit une explosion de l'équipement testé, suite à l'apparition d'une forte surtension générée par résonance électrique.

*Exemple* : considérons un isolant de capacité  $C$  alimenté par une Haute Tension délivrée par un transformateur (Figure 2.3).



**Figure 2.3** : Circuit électrique équivalent du transformateur et de l'isolant testé.

$r_1 + jL_1\omega$  : Impédance de l'enroulement primaire du transformateur

$r_2 + jL_2\omega$  : Impédance de l'enroulement secondaire du transformateur

$L\omega$  : Impédance shunt du transformateur, généralement négligée devant  $L_1\omega$  et  $L_2\omega$ .

C : charge capacitive d'impédance  $1/\omega C$ .

$$U = (r_1 + r_2)I + j\left(L_1\omega + L_2\omega - \frac{1}{\omega C}\right)I \quad (2.1)$$

Si par hasard  $\omega(L_1 + L_2) \approx \frac{1}{\omega C}$ , une résonance accidentelle se produit, le courant devient tellement grand que la surtension aux bornes de la charge atteint jusqu'à 20 à 50 la tension appliquée et peut provoquer une explosion de la charge.

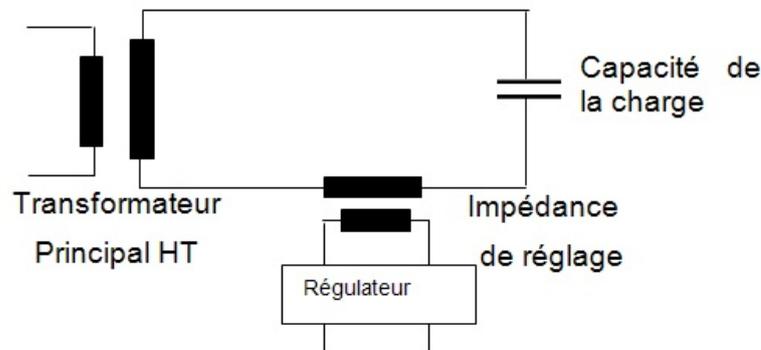


Figure 2.4 : Circuit résonnant.

Le phénomène de résonance est mis à profit pour produire de très hautes tensions (figure 2.4) ; une impédance de réglage variable insérée en série avec le circuit du transformateur permet de régler et d'augmenter la tension à des valeurs très grandes (jusqu'à 600 kV).

Le régulateur, alimenté par une source BT alternative, règle la tension en ajustant la valeur totale de l'impédance réactive.

Les circuits oscillants sont utilisés surtout dans les essais d'équipement à grande capacité, comme les câbles HT par exemple.

**Remarque :** si l'on a besoin d'une tension plus grande, on utilise plusieurs circuits résonants en série.

Ce type de générateur est spécialement avantageux lorsque la capacité de l'objet en essai est élevée, tel que les câbles HT par exemple. L'avantage spécifique est que la tension

délivrée est pratiquement sinusoïdale et qu'une compensation de l'énergie réactive s'en suit (résonance série).

## 2.3. Générateurs de tension continue

La haute tension continue [21] est utilisée dans de nombreuses applications, telles que :

- Réseaux HVDC (High Voltage Direct Current)
- Recherche fondamentale : il est plus facile de travailler et d'analyser les phénomènes avec une tension constante qu'avec une tension constamment variable.
- De nombreuses applications nécessitent une tension continue (rayons X de la radiologie, séparation électrostatique, filtre électrostatique...).
- Dans les applications où les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative.

### 2.3.1. Quelques applications d'utilisation de la tension continue

#### a) Filtre électrostatique

Le principe de fonctionnement peut mieux être expliqué avec le modèle cylindrique (Figure 2.5). Il est constitué par un cylindre métallique vertical relié à la terre (l'électrode collectrice) et un fil (l'électrode ionisante) suspendu suivant l'axe du cylindre par une douille isolante. L'électrode ionisante est connectée à une source de HT continue tandis que l'électrode collectrice est reliée à la terre.

En augmentant la tension  $V$  au delà d'une certaine valeur seuil  $V_c$  (tension de début du Corona), la décharge couronne commence à se produire sur le fil, accompagnée par une émission lumineuse ayant la forme d'un champignon (spot) en polarité négative ou d'une lueur uniforme en polarité positive. Ces lueurs représentent des régions locales d'ionisation gazeuse (claquage) à partir desquelles des ions mono-polaires sont émis en direction de l'électrode collectrice. Le courant ionique (courant de Corona) circule dans l'espace inter-électrodes, cet espace qui représente également le chemin de passage du gaz à filtrer.

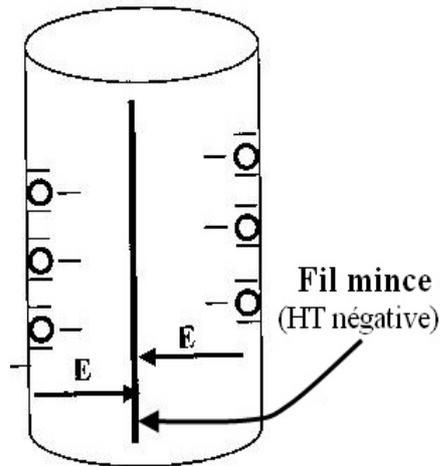


Figure 2.5 : Filtre électrostatique.

### b) Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquière des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (Figure 2.6).

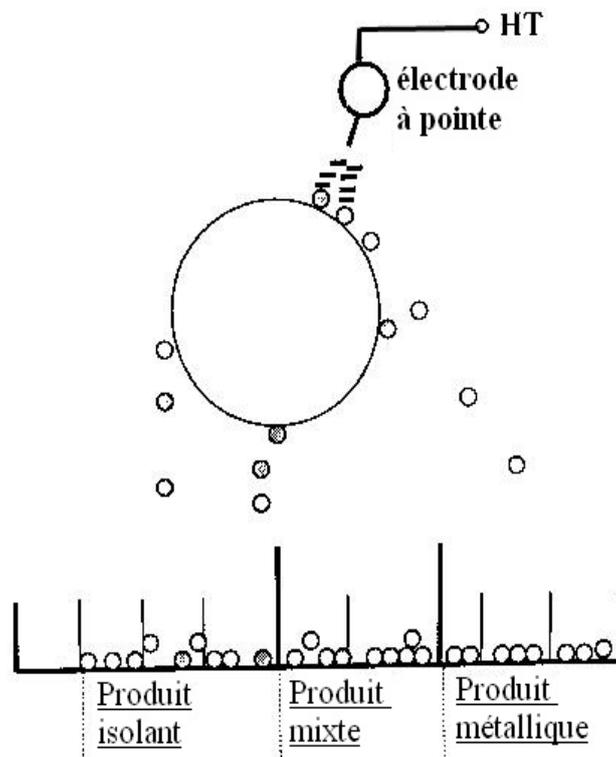


Figure 2.6 : Séparateur électrostatique.

### 2.3.2. Redresseur de tension alternative

#### a) Redresseur à simple alternance

Avec :

- C : capacité de lissage du redresseur + capacité de l'objet en essai + capacités parasites.
- R : résistance de l'objet testé + résistance de fuite du condensateur de lissage.

La figure 2.7 représente un schéma explicatif du redresseur à simple alternance en charge, la figure 2.8 représente la courbe de la tension redressée délivrée par un redresseur mono-alternance

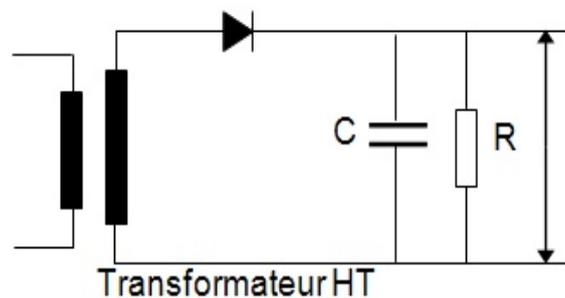


Figure 2.7 : redresseur à simple alternance en charge.

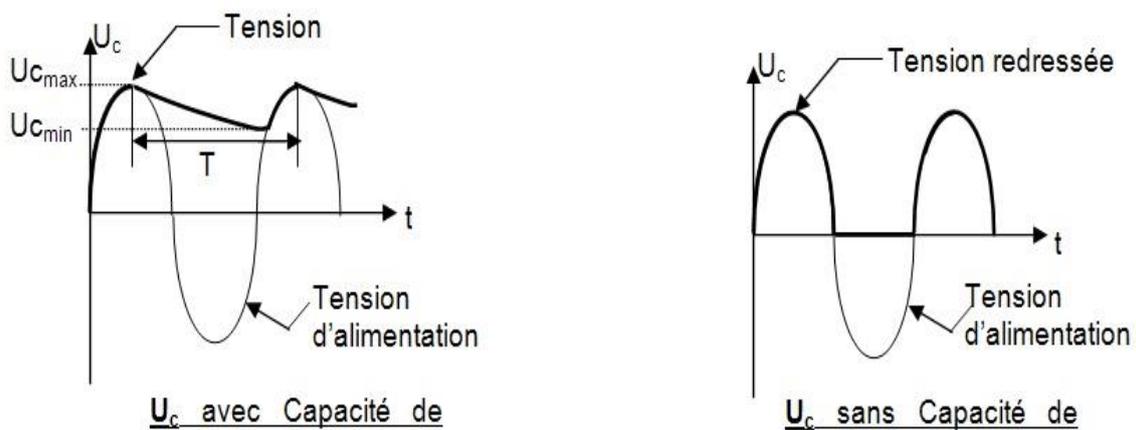


Figure 2.8 : Courbe de la tension redressée délivrée par un redresseur mono-alternance.

$$\text{Valeur moyenne } U_{cm} : U_{cm} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c dt \quad (2.2)$$

$\Delta U_c = U_{cmax} - U_{cmin}$  : profondeur d'ondulation

La tension redressée est d'autant meilleure que l'ondulation est faible.

Pour ce type de redresseur, la diode doit supporter une tension inverse  $2 V_{max}$ .

➤ **Limitation de l'ondulation**

Pendant le blocage de la diode, la capacité C fait circuler un courant  $i_R$  à travers R:

$$i_R = C \frac{\Delta U_c}{\Delta t} \quad (2.3)$$

où  $\Delta t$  représente le temps de blocage sur une période T.

Comme en général  $\Delta t \cong T$ ,

$$\Delta U_c = \frac{i_R T}{C} = \frac{i_R}{f C}. \quad (2.4)$$

Il existe donc deux moyens de limiter l'ondulation : utiliser de grandes capacités de lissage ou bien des fréquences plus élevées.

➤ **Diode haute tension**

Elle est équivalente à la mise en série de n diodes conventionnelles. Le nombre de diodes n est déterminé suivant la tension inverse à supporter par l'ensemble.

Par exemple, pour redresser une tension de 100 kV, on met en série 100 diodes de 1000 V chacune pour avoir une diode haute tension de 100 kV.

**b) Redresseur double alternance**

Contrairement au redresseur à simple alternance, l'alternance négative est également redressée (figure 2.9).

Il n'y a pas de très grande différence entre les montages redresseurs à simple alternance (figure 2.7) et à double alternance (figure 2.9), en présence d'une capacité de lissage.

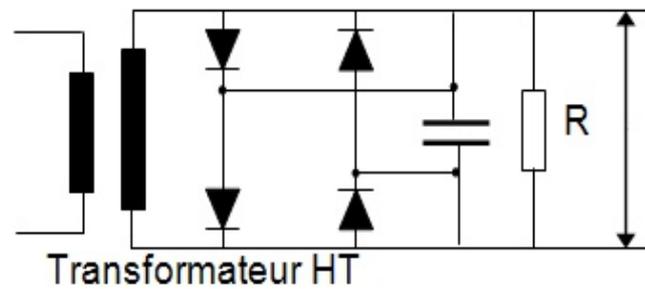


Figure 2.9 : Redresseur à double alternance en charge (pont de Graëtz).

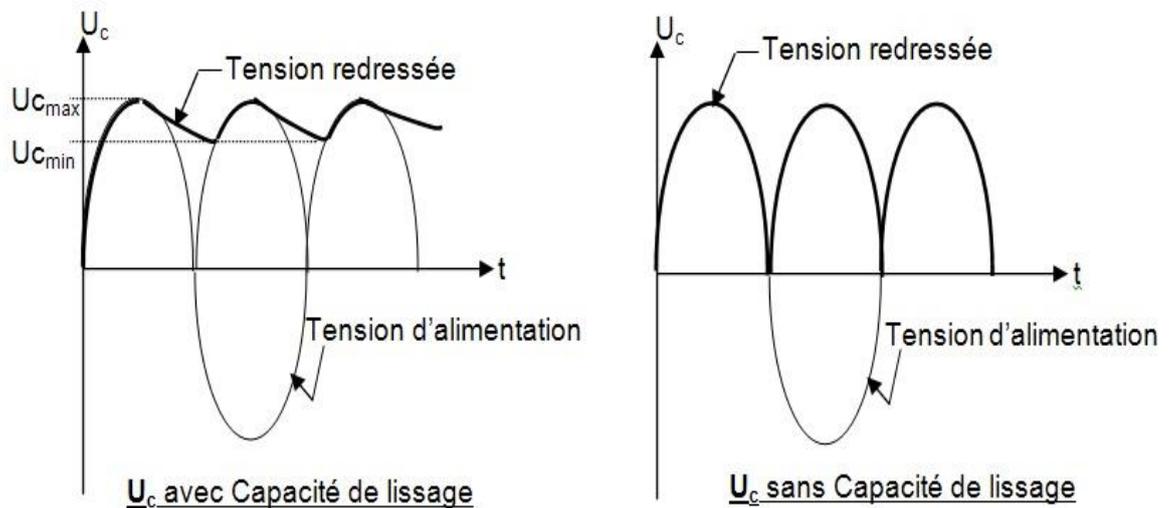


Figure 2.10: Courbes des tensions redressées délivrées par un pont de GRAËTZ.

### c) Doubleur de tension

Il y a plusieurs types de doubleurs de tension, mais le principe est le même; Le plus répandu est le doubleur de SCHENKEL.

#### Doubleur de SCHENKEL :

Pendant l'alternance négative le condensateur  $C_1$  se charge à la tension  $V_{\max}$ , à l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute à la tension du transformateur donne une tension aux bornes de  $C$  égale à  $2 V_{\max}$ . La tension à vide obtenue à la sortie est donc (figure 2.11 et 2.12).

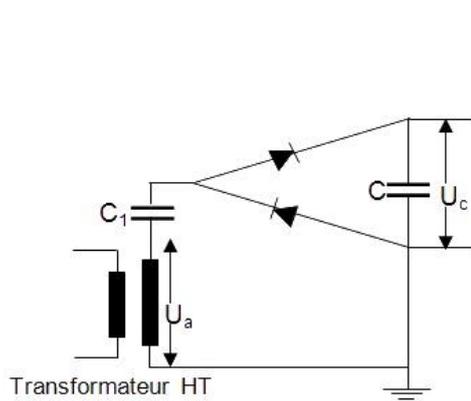


Figure 2.11 : Doubleur de SCHENKEL.

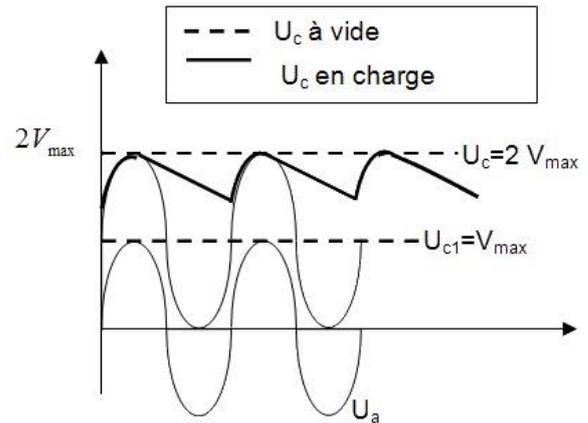


Figure 2.12 : Courbes des tensions redressées délivrées par le doubleur de

**Remarque :** l'avantage du doubleur de SCHENKEL est qu'il constitue l'élément de base du redresseur en cascade.

**d) Redresseur en cascade**

La cascade, appelée cascade de GREINACHER ou de COCKCROFT-WALTON (figure 2.13), est constituée par une piles de doubleurs de type SCHENKEL.

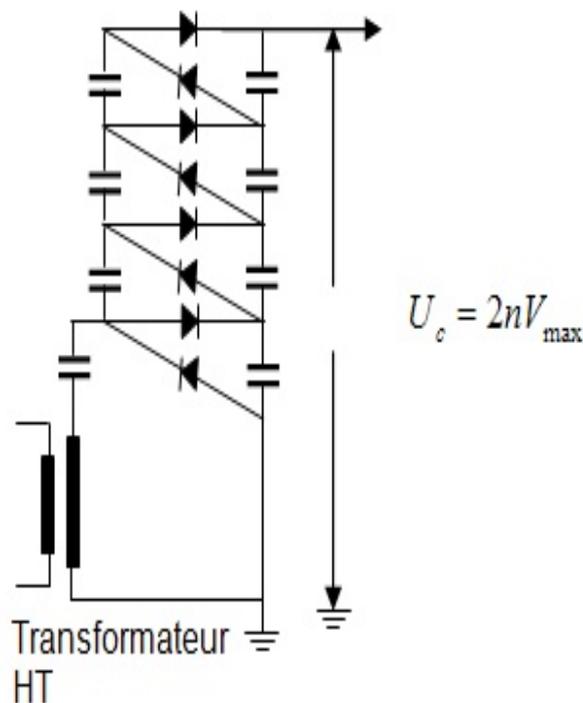


Figure 2.13 : Cascade de GREINACHER ou de COCKCROFT-WALTON à vide.

Comme chaque étage délivre une tension à vide égale à  $2V_{\max}$ , la tension obtenue (à vide) est  $U_c = 2nV_{\max}$ .

$$(2.5)$$

avec  $n$  : nombre d'étages.

En charge :  $U_c = 2nV_{\max} - \Delta U$ .

$$(2.6)$$

avec  $\Delta U = \frac{I_R}{fC} \left( \frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{n}{6} \right)$

$$(2.7)$$

où  $I_R = \frac{U_c}{R}$

$$(2.8)$$

Chaque diode doit supporter une tension inverse égale à  $2V_{\max}$ .

**Remarque :** Le nombre optimal d'étages ne dépasse pas généralement 10, car au delà la chute de tension devient trop importante. Ce type de générateur délivre une tension qui peut atteindre 5 MV ; mais l'ordre de grandeur du courant délivré qui est de 10 mA reste faible.

### 2.3.3. Multiplicateur de tension

La figure 2.14 représente un schéma explicatif du multiplicateur de tension, son principe de fonctionnement est assez simple.

La première phase consiste à fermer les interrupteurs  $S_1$  pour charger en parallèle les condensateurs  $C_i$ . Après, on ouvre les interrupteurs  $S_1$  et on ferme  $S_2$  : les tensions des condensateurs  $C_i$  qui sont maintenant en série, s'ajoutent pour donner aux bornes de  $C$  une tension de sortie  $U_c = nU_0$ .

Avec  $n$  : nombre de condensateurs  $C_i$ .

**Remarque :** Ce générateur qui ne peut être utilisé qu'une fois les condensateurs chargés, a une durée d'application bien déterminée (qui dépend de l'énergie emmagasinée dans le condensateur et de la constante de décharge) car quand les condensateurs se déchargent, la tension tombe à zéro.

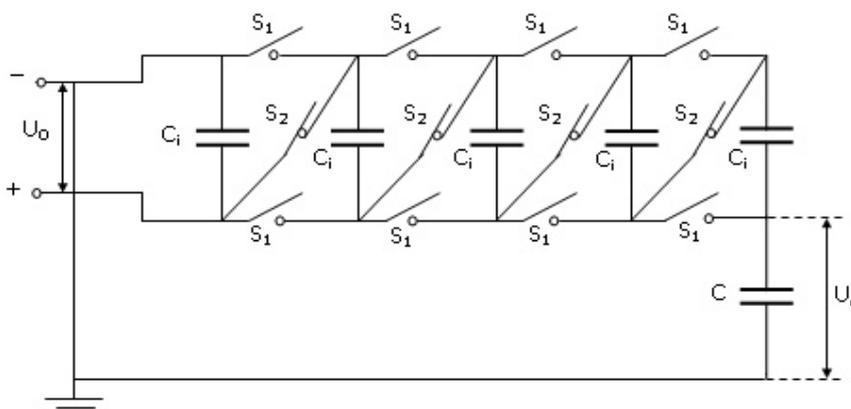


Figure 2.14 : Multiplicateur de tension.

### 2.3.4. Générateurs électrostatiques : (VAN DE GRAFF)

Utilisé entre autres dans les laboratoires de recherche de physique nucléaire (figure 2.15).

#### a) Principe de fonctionnement

Un ensemble d'électrode pointes ou une lame très fine (électrode couronne) charge par effet couronne une courroie isolante. Celle-ci qui tourne avec une vitesse réglable, introduit les charges dans la partie supérieure du générateur (sphère) où elles sont prélevées par le collecteur. Les quelques charges qui « échappent » au collecteur sont neutralisées par effet couronne grâce à des aiguilles fixées sur la paroi interne de l'électrode haute tension. En arrivant en bas, ces charges négatives sont neutralisées par l'électrode couronne.

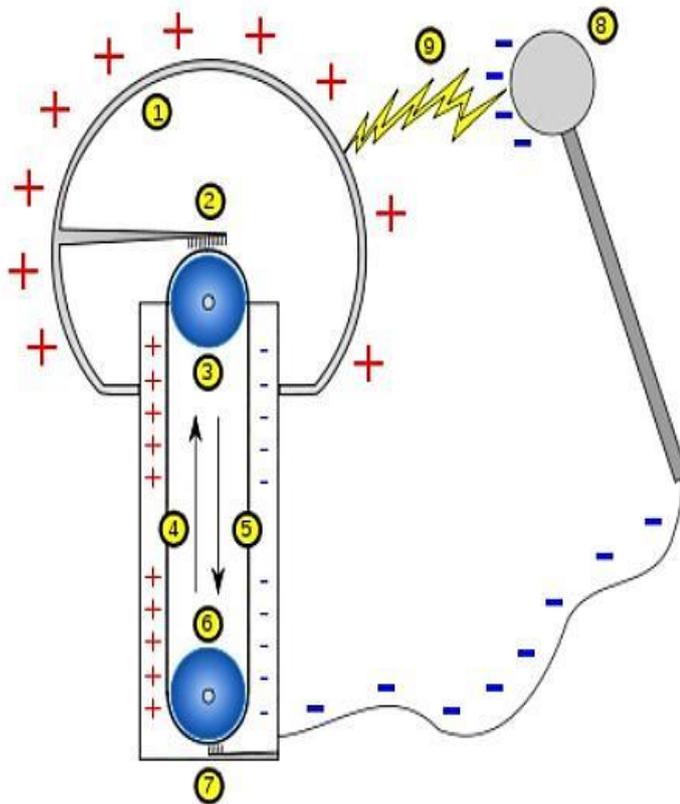
L'électrode sphérique continue de stocker les charges jusqu'à atteindre des tensions, sphère-terre, considérables.

Le générateur VAN DE GRAFF n'est pas très utilisé car le courant délivré est faible (de l'ordre du  $\mu\text{A}$ ), mais la tension de sortie peut atteindre jusqu'à une centaine de MV (Figure 2.15).

#### Remarques :

a) Le potentiel délivré est donc proportionnel à la vitesse de la courroie et au temps de charge; par ce procédé la tension pourrait donc atteindre l'infini si ce n'était les pertes de charge qui commencent à partir d'une certaine valeur, à cause de la neutralisation produite par effet couronne.

b) L'électrode haute tension a une forme ronde (sphère) pour justement éviter les pertes de charge générées par effet couronne.



1. Sphère creuse avec des charges positives
2. Électrode (E2) connectée à la sphère, un peigne est au plus près de la courroie
3. Poulie supérieure (en Nylon)
4. Partie de la courroie chargée positivement
5. Partie de la courroie chargée négativement
6. Poulie inférieure (en Téflon), son axe est relié à un moteur
7. Électrode inférieure (E1) destinée à collecter les charges négatives
8. Sphère chargée négativement utilisée pour décharger la boule principale
9. Étincelle ou arc électrique produits par la différence de potentiel

Figure 2.15 : Générateurs électrostatiques : (VAN DE GRAFF).

## 2.4. Générateurs de tensions de choc

### 2.4.1. Définition

La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle (figure 2.16), appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques  $\mu\text{s}$ . c'est un courant ou une tension qui croît rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro [22].

Les générateurs de choc sont nécessaires pour :

- Simuler les surtensions des lignes comme l'onde de la foudre par exemple, pour l'étude et la recherche.
- réaliser des tests d'essais sur les appareillages haute tension destinés à fonctionner lors des surtensions, tels que les appareils de protection contre les surtensions.

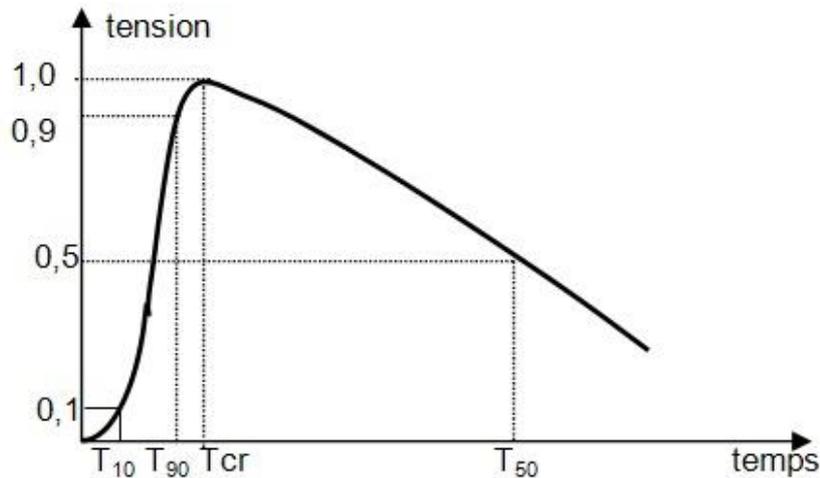


Figure 2.16 : Onde de choc conventionnelle.

**Remarque :** l'impact d'un coup de foudre sur un réseau électrique génère une onde de tension sur la ligne qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel et provoque la détérioration de l'isolement.

Tous les générateurs de choc sont identifiés par les deux constantes de temps  $t_1$  et  $t_2$  :

a) Pour les français :

$$t_1 = 1,67(T_{90} - T_{30}) \text{ et } t_2 = T_{50} . \quad (2.9)$$

L'onde de choc standard normalisée pour l'étude de:

- la foudre est l'onde 1,2/50  $\mu s$  ( $t_1 = 1,2 \mu s$  et  $t_2 = 50 \mu s$ ).
- La surtension de manœuvre : l'onde 250/2500  $\mu s$  ( $t_1 = 250 \mu s$  et  $t_2 = 2500 \mu s$ ).

b) Pour les anglais :

$$t_1 = 1,25 T_{10} T_{90} \text{ et } t_2 = T_{50} . \quad (2.10)$$

L'onde de choc standard normalisée pour l'étude de la foudre est l'onde 1/50  $\mu s$ , c'est à dire:  $t_1 = 1 \mu s$  et  $t_2 = 50 \mu s$ .

c) Pour les américains :

$$t_1 = 1,5 T_1 T_2 \text{ et } t_2 = T_{50} . \quad (2.11)$$

L'onde de choc standard normalisée est l'onde 1,5/40  $\mu s$  ( $t_1 = 1,5 \mu s$  et  $t_2 = 40 \mu s$ ).

**Remarque :** le temps  $T_{cr}$  de montée à la valeur crête n'est pas utilisé, car sur l'oscillogramme la crête est souvent plate et on distingue mal le maximum.

Le temps de montée à la valeur crête  $T_{cr}$  est appelé **temps de front**, et le temps de diminution  $T_{50}$  est appelé **temps de queue**.

#### 2.4.2. Générateur de choc à un étage

La figure (2.17) représente un schéma explicatif du multiplicateur du générateur de choc à un étage [23].

La tension continue  $V$  charge le condensateur  $C_1$  jusqu'à produire le claquage de l'éclateur  $E$  ; une tension brusque (choc) est ainsi appliquée aux extrémités de la charge capacitive  $C_2$ .

$C_1$  : capacité de choc (réservoir d'énergie)

$C_2$  : capacité de l'objet en essai ;

$C_1 = (10...20) C_2$

$R_1$  : résistance de front d'onde (série) ;

$R_2$  : résistance de queue d'onde (parallèle) ;

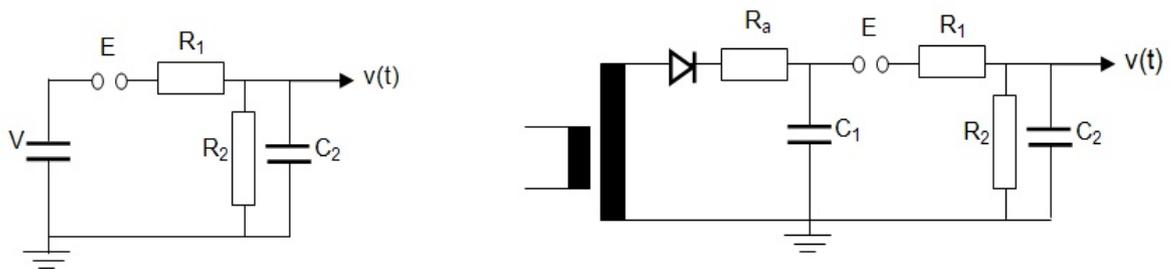


Figure 2.17 : Générateur de choc à un étage.

En général, le condensateur  $C_1$  se charge par l'intermédiaire d'un transformateur HT associé une diode  $D$ . la résistance d'amortissement  $R_a$  empêche une charge trop rapide. La constante de temps lors du processus de charge  $\tau = R_a C_1$  est de l'ordre de 10 à 20 s.

Lorsque la tension disruptive  $U_0$  de l'éclateur  $E$  est atteinte,  $C_1$  se décharge brusquement dans  $C_2$  à travers la résistance de front  $R_1$ . La résistance de queue d'onde  $R_2$  étant beaucoup plus grande que  $R_1$ , les capacités  $C_1$  et  $C_2$  vont se décharger ensuite plus lentement dans cette résistance  $R_2$ .

Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  servent à contrôler les constantes de temps respectivement de front et de queue de l'onde. Ainsi, un temps de front bref requiert une charge rapide du condensateur  $C_2$ , et un temps de queue long nécessite une décharge plus lente ; ceci est réalisé en choisissant une résistance  $R_2$  très grande par rapport à  $R_1$ .

Quand, au moment de l'amorçage de l'éclateur, toute la tension  $U$  est pratiquement appliquée à  $R_1$  et  $C_2$  en série. La charge du condensateur  $C_2$  est d'autant plus rapide que le produit  $R_1C_2$  est petit.

### 2.4.3. Générateur de choc à plusieurs étages: générateur de MARX

Des tensions continues plus élevées sont obtenues avec le générateur de MARX [24], c'est un ensemble de générateurs de choc à un étage, montés en cascade. Les tensions obtenues sont de l'ordre du MV (maximum réalisé environ 6 MV).

Dans une première phase, le sectionneur I fermé permet la charge en parallèle des  $n$  condensateurs  $C$  à travers de grandes résistances de charge  $R_{ch}$ ; l'alimentation étant assurée par une source continue de tension  $U_0$  (généralement comprise entre 50 et 200 kV).

Ensuite, dans une deuxième phase, le sectionneur est ouvert et l'amorçage de tous les éclateurs  $E_i$  est commandé presque simultanément (la tension de claquage des éclateurs à sphères étant ajustée légèrement au-dessus de  $U_0$ ); à ce moment précis les condensateurs  $C$  se trouvent en série et constituent une source de tension égale à  $nU_0$ .

Les résistances de charge sont de l'ordre de 8 à 10  $R_q$  ce qui fait qu'elles n'ont pratiquement pas d'influence sur la forme de la tension de choc. Pendant la période de charge des  $n$  condensateurs, toutes les armatures  $A$  se trouvent au même potentiel. Les armatures  $B$  sont au potentiel de la terre par l'intermédiaire des résistances  $R_q$  et  $R_f$ .

A l'amorçage de l'éclateur  $E_1$ , le potentiel de  $A_2$  devient  $2U_0$ . L'éclateur  $E_2$  sollicité par une tension  $2U_0$  s'amorce à son tour, et ainsi de suite.

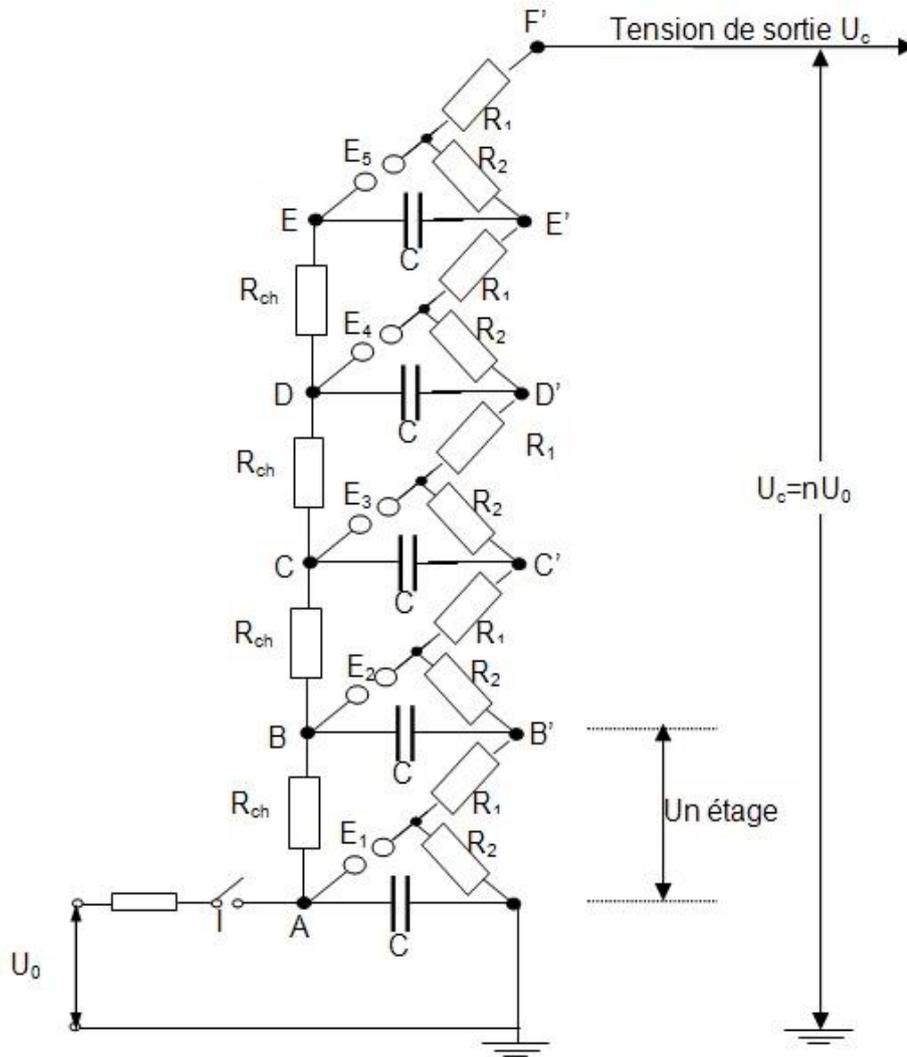


Figure 2.18: Générateur de Marx à 5 étages.

#### Remarques:

- L'amorçage du 1er éclateur est commandé par une lampe à rayons UV (afin d'assurer la présence de quelques électrons primaires). Les autres éclateurs qui sont tous placés dans le même plan vertical, sont ensuite amorcés par les rayons UV générés par la décharge elle-même du 1er éclateur.
- En réalité, les capacités parasites du circuit diminuent légèrement la valeur de la tension de sortie.

Les capacités parasites (figure 2.19) apparaissent entre :

- Les résistances  $R_{ch}$  et la terre ;
- Les résistances  $R$  et la terre ;
- Les pôles de chaque éclateur.

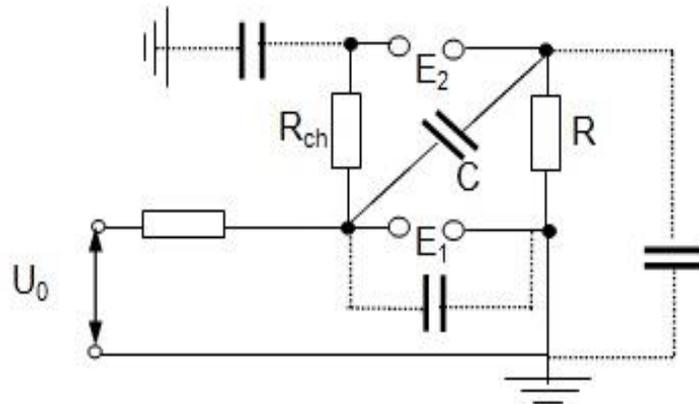


Figure 2.19 : Emplacement des capacités parasites.

#### 2.4.4. Générateur de RUHKORFF

Le générateur de RUHKORFF est illustré par la figure (2.20).

La haute tension est produite par l'interruption du courant dans un circuit inductif. Les vibrations du rupteur ferment et ouvrent brusquement le circuit [25].

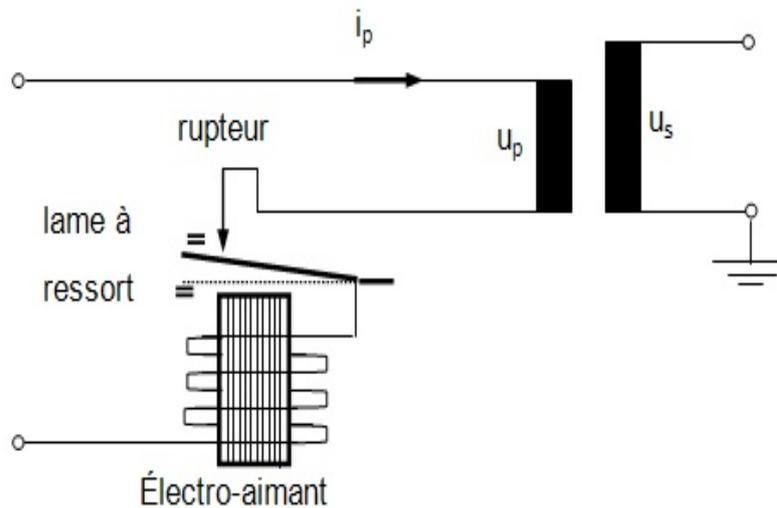


Figure 2.20: générateur de RUHKORFF.

L'équation du circuit est :

$$u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} \quad (2.12)$$

Où  $R_p$  et  $L_p$  sont la résistance et l'inductance de l'enroulement primaire ;

$i_p$  et  $i_s$  courants primaire et secondaire ;

M l'inductance mutuelle entre les circuits primaire et secondaire.

Comme l'interruption du courant est très brève ( $dt \cong 0$ ), les termes  $\frac{di_p}{dt}$  et  $\frac{di_s}{dt}$  sont tellement élevés qu'ils produisent, pendant un bref moment, de la haute tension.

Ces générateurs sont utilisés, lorsqu'on a besoin d'une haute tension pendant une durée très brève, comme l'allumage par exemple. On les trouve pour l'allumage des lampes à décharge et l'allumage des moteurs à explosion (bobine HT des voitures) [26].

#### 2.4.5. Générateur de TESLA

Le générateur de TESLA est illustré par la figure (2.21).

Il fournit une haute tension oscillante.

Le condensateur  $C_1$  se charge par l'intermédiaire du transformateur HT associé à la diode D.

Le transformateur charge le condensateur  $C_1$  à une tension  $U_1$ . Quand la tension est suffisamment grande, le claquage de l'éclateur E provoque la décharge de l'énergie emmagasinée dans  $C_1$  dans un système de deux circuits RLC couplés, générant une tension de sortie  $U_2$  qui croît de façon oscillante (figure 2.22).

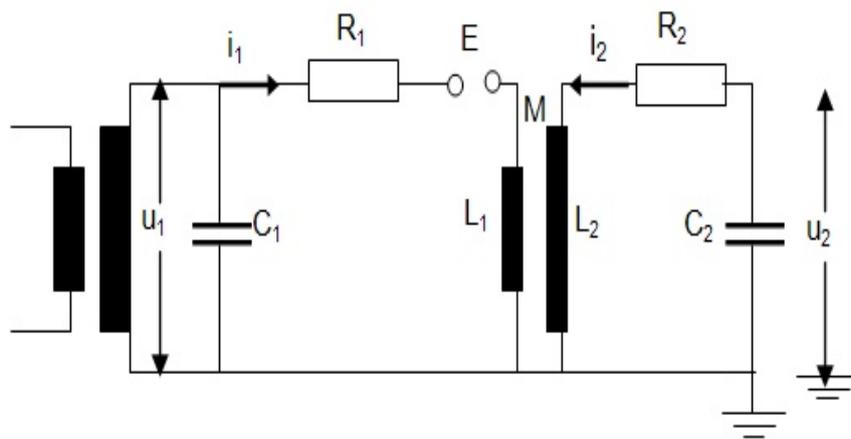
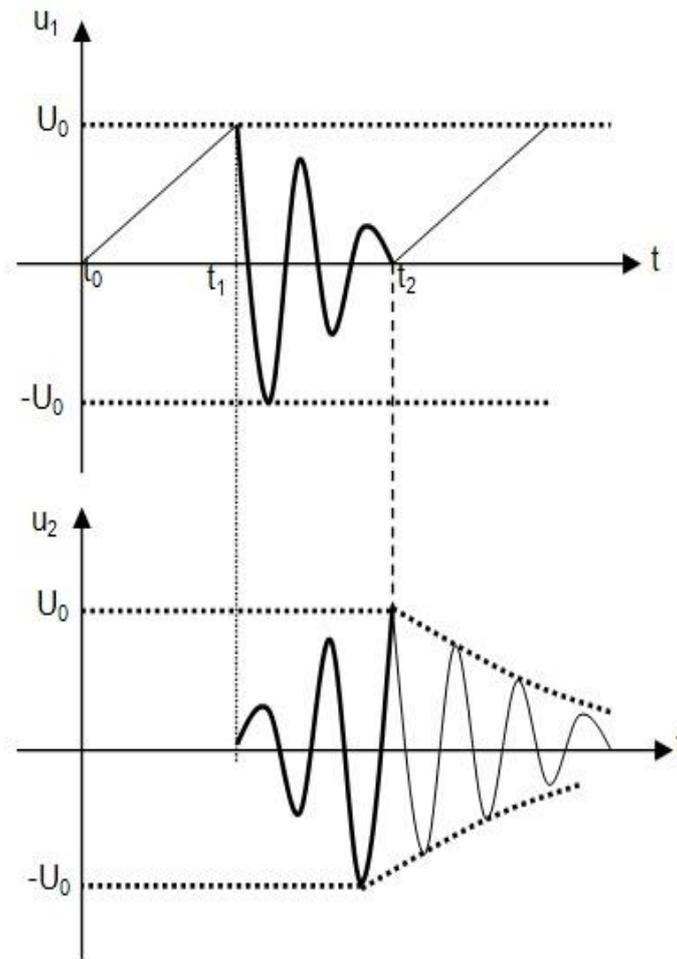


Figure 2.21: Générateur de tesla.



**Figure 2.22 :** Evolution de la tension du générateur de Tesla.

- Entre  $t_0$  et  $t_1$  : charge du condensateur ;
- Entre  $t_1$  et  $t_2$  : l'amorçage de l'éclateur, crée par couplage électromagnétique une tension oscillante.
- Après l'instant  $t$ , l'arc dans l'éclateur s'éteint par soufflage d'air, et la tension s'amortit.

Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  servent à amortir l'oscillation.

L'arrêt de la tension oscillante s'effectue par l'extinction de l'arc aux bornes de l'éclateur par soufflage d'air.

Des tensions à HF fréquence 104 à 105 Hz sont obtenues et qui peuvent atteindre des valeurs de 1 MV.

## 2.5. Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre qu'il existe plusieurs types de générateurs de haute tension. Parmi eux, nous avons opté pour la réalisation d'une alimentation de haute tension continue en utilisant un transformateur élévateur à noyau en ferrite.

Ainsi donc, 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.

# CHAPITRE 3

## Réalisation de l'alimentation haute tension

### 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. Dans ce dernier chapitre, nous détaillons l'alimentation réalisée qui est destinée pour alimenter les réacteurs basés sur les décharges à barrière diélectrique. 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 demi-pont.

### 3.2.Généralités sur les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques qui permettent d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné tout en utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors...).

On différencie quatre types de convertisseurs pour lesquels sont associés quatre types de convertisseurs (Figure 3.1)

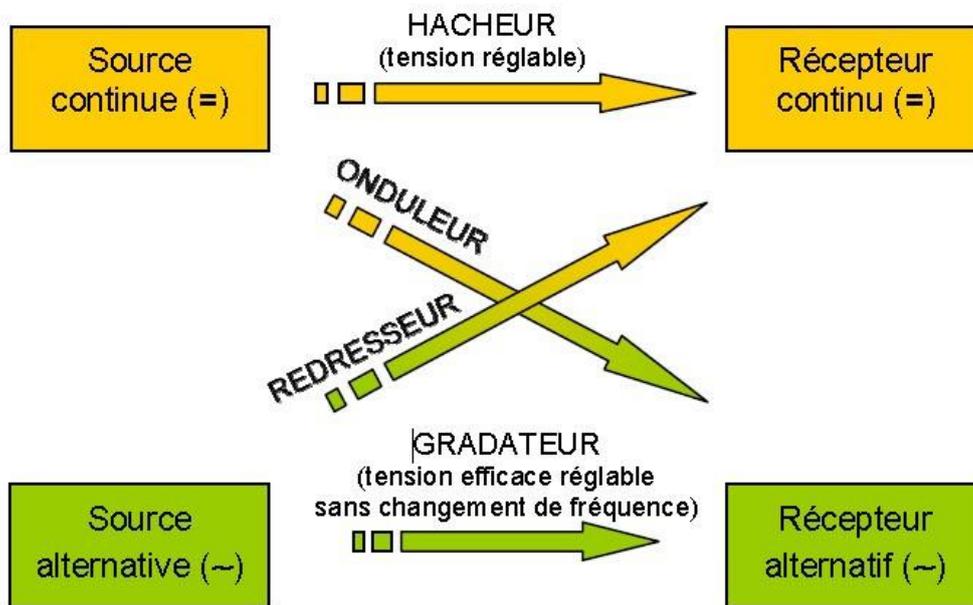


Figure 3.1 : Famille des convertisseurs statiques.

### 3.2.1. Convertisseurs alternatif-continu

Ce sont des redresseurs (ou convertisseurs de courant).

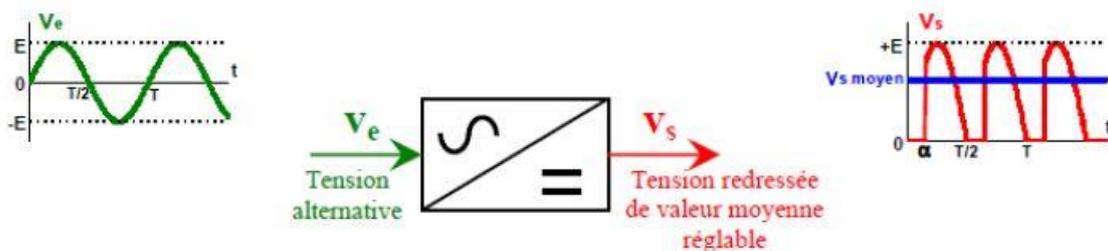


Figure 3.2 : Principe de fonctionnement des convertisseurs alternatif-continu

### 3.2.2. Convertisseurs alternatif-alternatif

Ce sont des gradateurs (ou variateurs de courant alternatif) lorsque la fréquence d'entrée est égale à celle de la sortie ; sinon ce sont des cycloconvertisseurs (ou convertisseurs de fréquence).

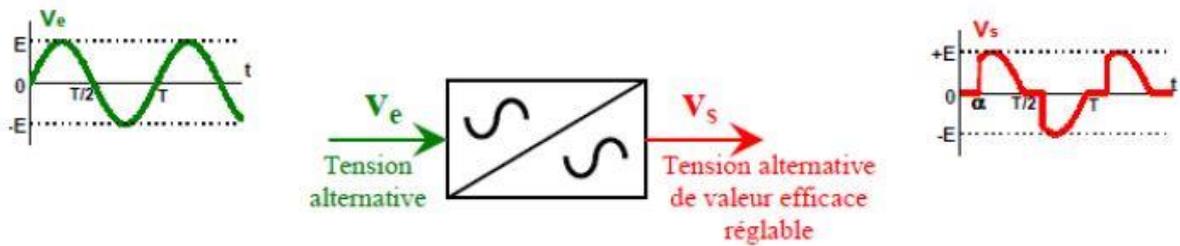


Figure 3.3 : Principe de fonctionnement des convertisseurs alternatif – alternatif.

### 3.2.3. Convertisseurs continu -continu

Ce sont les hacheurs (ou variateurs de courant continu).

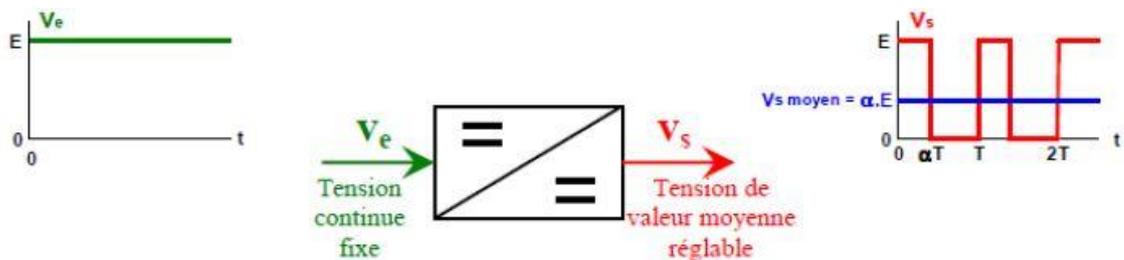


Figure 3.4 : Principe de fonctionnement des convertisseurs continu-continu.

### 3.2.4. Convertisseurs continu-alternatif

Ce sont des onduleurs de tension ou onduleurs de courant (appelés aussi commutateurs de courant).

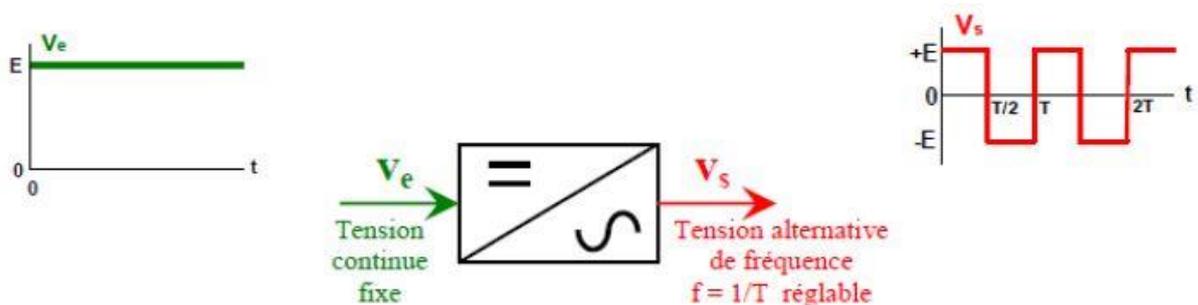


Figure 3.5 : Principe de fonctionnement des convertisseurs continu-alternatif.

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux convertisseurs statiques continu-alternatif, on verra par la suite le principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé ainsi que les techniques de commande de ce convertisseur.

### 3.3. Généralités et principe de fonctionnement des onduleurs

#### 3.3.1. Généralités

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet la conversion d'énergie électrique continu (DC) à la forme alternative (AC) et il est utilisé pour [27-28] :

- Fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitude variables, On donne l'exemple du cas où les onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).
- Fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et amplitude fixes, 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.

#### 3.3.2. Classification des onduleurs

Les onduleurs peuvent être classifiés comme suit :

##### 3.3.2.1. Selon la nature de l'alimentation

###### a) Onduleur de tension

Il est alimenté par une source de tension continue, il impose par sa commande la tension à la charge (Figure 3.6).

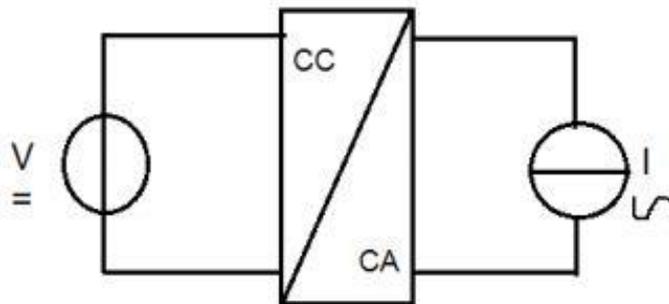


Figure 3.6 : Onduleur de tension

### b) Onduleur de courant

Il est alimenté par une source de courant continue et il impose par sa commande le courant à la charge.

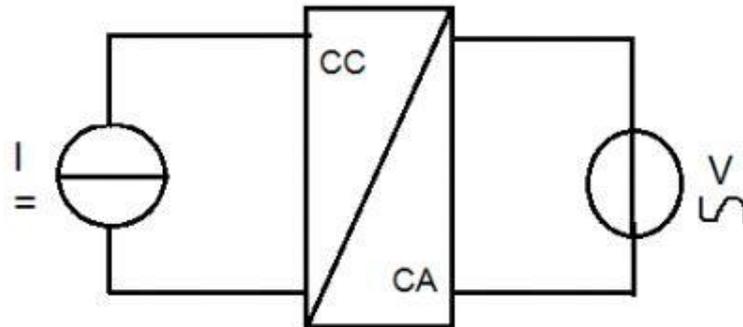


Figure 3.7 : Onduleur de courant.

#### 3.3.2.2. Selon la nature de charge

##### a) Onduleur monophasé

C'est un onduleur qui délivre en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement utilisée aux alimentations de secours. On distingue deux classes d'onduleurs monophasés suivant leurs topologies, onduleur en demi-pont (figure 3.8-a) et l'onduleur en pont figure (3.8-b).

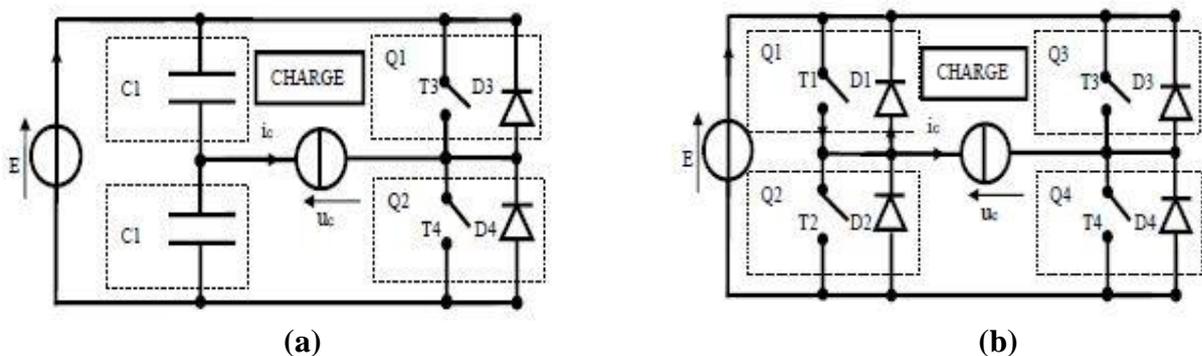


Figure 3.8 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé : (a) structure en demi-pont, (b) structure en pont

##### b) Onduleur triphasé

Il est constitué de six interrupteurs montés sous forme de pont et délivre trois tensions de sortie décalées entre elles de  $120^\circ$  de période permettant de reconstituer un système triphasé de tensions et de courants. Le schéma de l'onduleur triphasé est représenté sur la Figure 3.9.

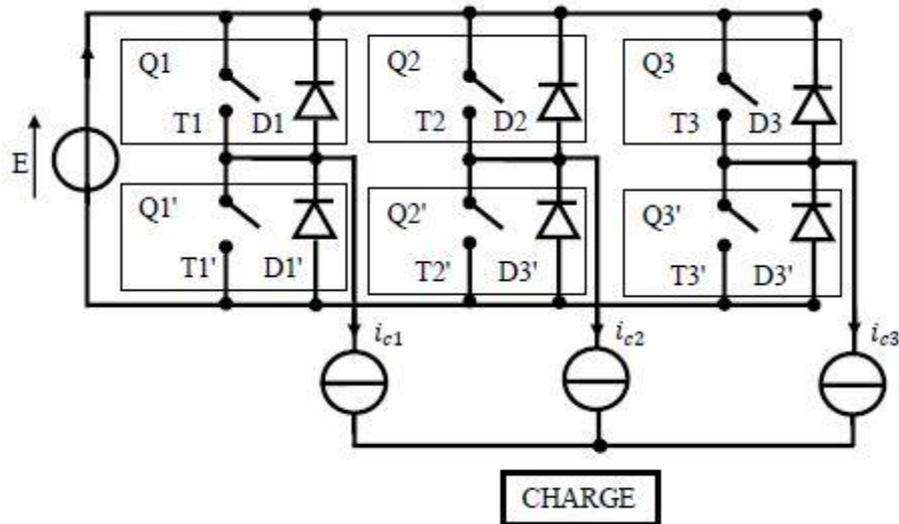


Figure 3.9 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé de tension en pont.

### 3.3.3. Principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé

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 quatre commutateurs de courants placés en demi-pont :

- 2 interrupteurs à amorçage-blocage commandé à une période  $T$ , fonctionnant en alternance.
- 2 diodes de récupération si la charge peut rendre l'énergie électrique lorsqu'elle n'est plus alimentée.

Dans le type de montage représenté sur la figure 3.8-a qui correspond à un onduleur avec une structure en demi-pont, on fait l'hypothèse que la capacité «  $C$  » des deux condensateurs est suffisamment grande pour l'on puisse considérer qu'en régime permanent la tension à leur borne reste toujours égale à  $E/2$ .

$$V_{C1}(t) + V_{C2}(t) = E \quad (3.1)$$

Et donc

$$C1 \frac{dV_{C1}}{dt} + C2 \frac{dV_{C2}}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

Les termes  $C1 \frac{dV_{C1}}{dt}$  et  $C2 \frac{dV_{C2}}{dt}$  correspondent respectivement aux courants instantanés passant dans les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$ , ce qui nous amène à écrire :

$$i_{C1} = -i_{C2} \quad (3.3)$$

Le courant de charge (de décharge) du condensateur  $C_1$  est égal au courant de décharge (de charge) du condensateur  $C_2$ .

$$\bullet i_{ch} + i_{C1} = i_{C2} \quad (3.4)$$

Et tenant compte de (3.3), on aura

$$\bullet i_{ch} = -2i_{C1} \quad (3.5)$$

Le courant  $i_{ch}$  partant du point milieu capacitif est le double du courant passant dans l'un des bras de celui-ci.

On met des diodes en parallèle avec les transistors. Leur rôle est d'assurer la continuité de courant.

### Etude 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 convenant. Un interrupteur ouvert est symbolisé par un circuit ouvert et un interrupteur fermé par un fil.

Les interrupteurs commandés périodiquement un par un, de l'état bloqué à l'état passant aux instants  $t_1$  et  $(t_1 + T/2)$  où  $T$  est une période constante.

Deux séquences sont représentées et se déroulent ainsi [29] :

#### Séquence 1 ( $0 < t < T/2$ ) :

L'interrupteur **T1** est fermé ce qui implique **T2** ouvert. La circulation électrique ne peut se faire que par l'interrupteur **T1**. Nous obtenons donc le schéma équivalent donné sur la figure suivante.

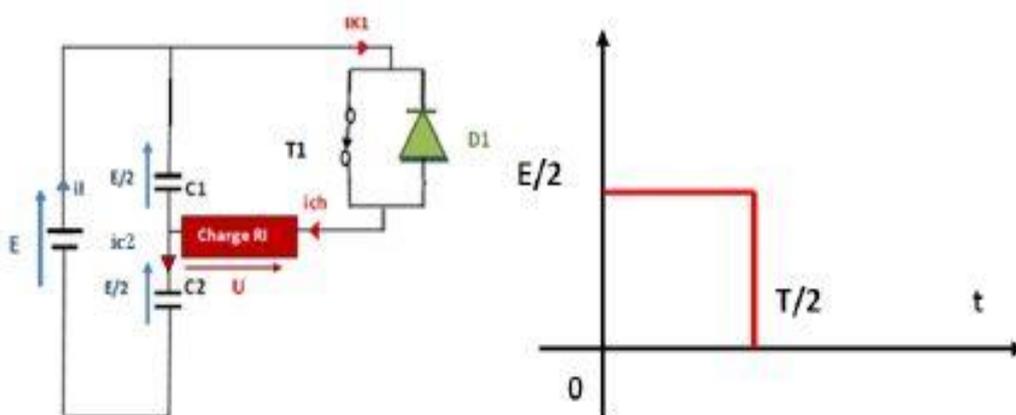


Figure 3.10 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.

$$\bullet U = E/2. \quad (3.6)$$

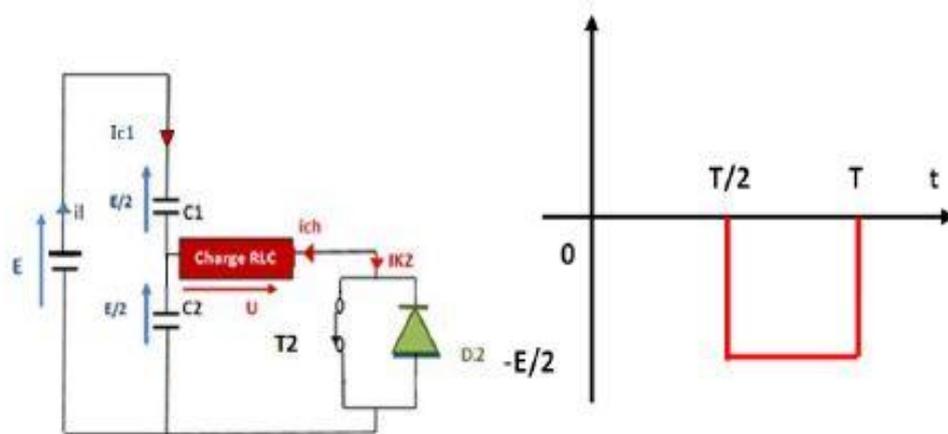
$$\bullet i_l = I_{k1} + i_{c1} \quad (3.7)$$

Et tenant compte de la formule (3.5), on aura

$$\bullet i_l = -2I_{c1} + i_{c1} = -i_{ch}/2 \quad (3.8)$$

### Séquence 2 ( $T/2 < t < T$ ) :

L'interrupteur **T2** est fermé ce qui implique **T1** ouvert. La circulation électrique ne peut se faire que par l'interrupteurs **T2**. Nous obtenons donc le schéma équivalent suivant (Figure 3.11) :



**Figure 3.11** : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2<sup>ème</sup> demi-cycle.

$$\bullet U = -E/2 \quad (3.9)$$

$$\bullet I_{k2} = -i_{ch} \quad (3.10)$$

$$\bullet i_l = i_{c2} + I_{k2} = i_{c2} - i_{ch} \quad (3.11)$$

Et tenant compte de (3.5), on aura

$$\bullet i_l = -i_{ch}/2 \quad (3.12)$$

Le signal résultant sur une période complète est représenté sur la figure 3.12, l'allure de la tension est symétrique donc la valeur moyenne est nulle.

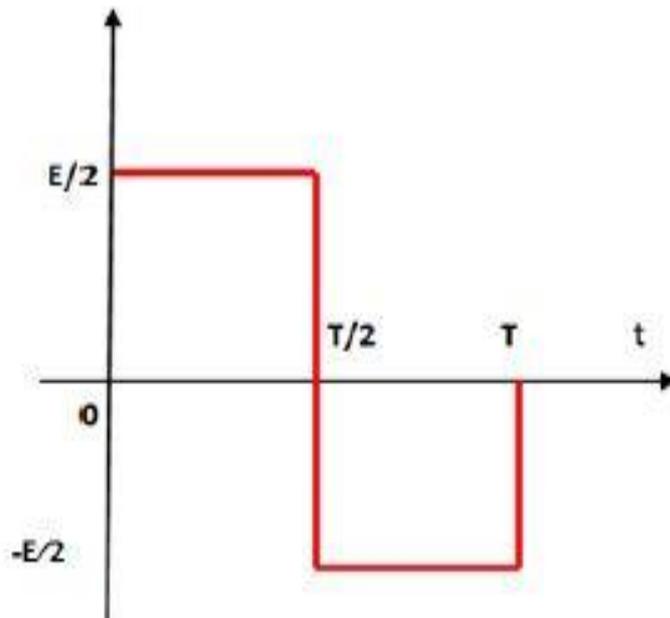


Figure 3.12 : Signal de tension complet de l'onduleur.

Après avoir expliqué le principe de fonctionnement de l'onduleur en demi-pont, on va passer maintenant à la description des stratégies de commande des onduleurs.

### 3.4. Commande d'un onduleur monophasé

Pour contrôler la tension de sortie d'un onduleur monophasé, différentes stratégies de commandes sont employées, leur principe consiste à envoyer un signal de commande pour aux gâchettes des interrupteurs (MOSFET, IGBT) d'une façon complémentaire, on distingue trois types de commandes :

#### 3.4.1. Commande pleine onde

Chaque interrupteur doit donc conduire pendant une demi-période  $T/2$ . L'allure des signaux de tension délivrés par l'onduleur en pont est donnée à la figure suivante.

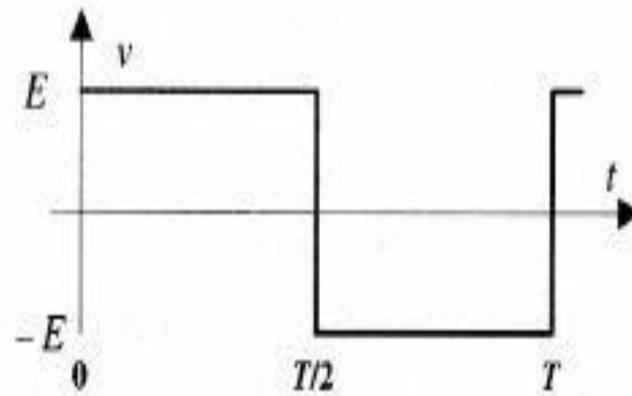


Figure 3.13 : Tension de sortie d'un onduleur avec une commande pleine onde.

### 3.4.2. Commande décalée

Pour un onduleur en pont, les deux demi-points fonctionnent avec la même période  $T$ , mais la commande est décalée d'une durée  $\delta$  comprise entre 0 et  $T/2$ . La tension  $v(t)$  représentée à la figure est un créneau à trois niveaux de tension, elle fait apparaître des phases de « roue libre » où la charge se retrouve court-circuitée par deux interrupteurs passants.

Sa valeur moyenne est nulle, sa valeur efficace est fonction de  $\delta$  et elle est donnée par

$$\text{la relation suivante : } V_{eff} = E \sqrt{1 - \frac{2\delta}{T}} \quad (3.13)$$

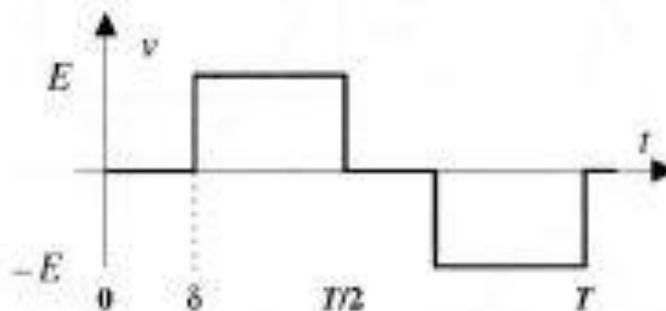
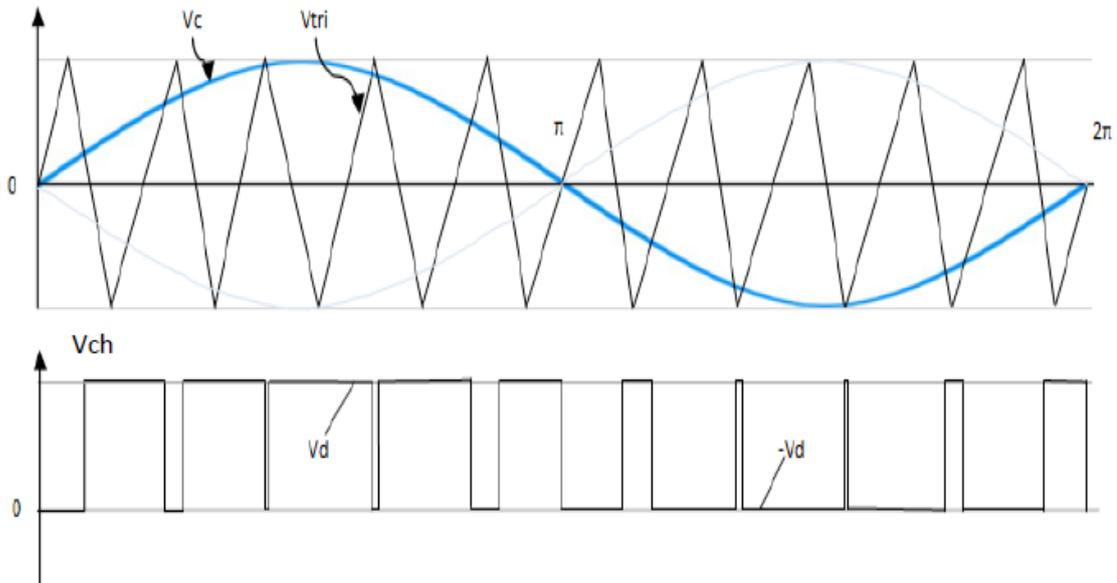


Figure 3.14 : Tension de sortie d'un onduleur par commande décalée.

### 3.4.3. Commande MLI (Modulation de Largeur d'impulsion)

Les commandes sont déduites de la comparaison entre le signal variable  $V_c$  (sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence  $f$  qui détermine la fréquence de la tension de

sortie) et de porteuse  $V_{tri}$  (triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée). Le résultat est un chronogramme de commande  $V_{ch}$ .



**Figure 3.15** : Principe de la commande MLI sinus-triangle.

Deux paramètres caractérisent la commande MLI :

- L'indice de modulation  $m$ , qui représente le rapport  $f_p/f_r$  des fréquences de la porteuse  $f_p$  et de la modulatrice  $f_r$  respectivement
- Le taux de modulation  $r$ , qui est le rapport  $V_{rm}/V_{pm}$  de l'amplitude de référence par celle de la porteuse

Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par ces deux paramètres.

### 3.5. Réalisation de l'alimentation haute tension

À présent, nous introduisons l'alimentation destinée à notre réacteur 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 et donc utiliser une haute tension alternative.

### **3.5.1. Développement du circuit**

La façon la plus facilement réalisable et peut-être la plus pratiquée pour 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 la conception du circuit imprimé, tout d'abord le circuit électrique est réalisé en utilisant le logiciel ISIS Proteus (Figure 3.16 et 3.17). Il se compose de deux parties distinctes (commande et puissance), ensuite un autre logiciel nommé ARES a été utilisé qui est un outil de placement de routage qui nous permet de concevoir le circuit imprimé (Figure 3.18 et 3.19).





Après le développement du circuit imprimé, on fait l'insertion, la soudure des composants du convertisseur.

Une photographie de l'alimentation destinée aux décharges à barrières diélectriques est illustrée sur les deux figures suivantes 3.20 et 3.21.

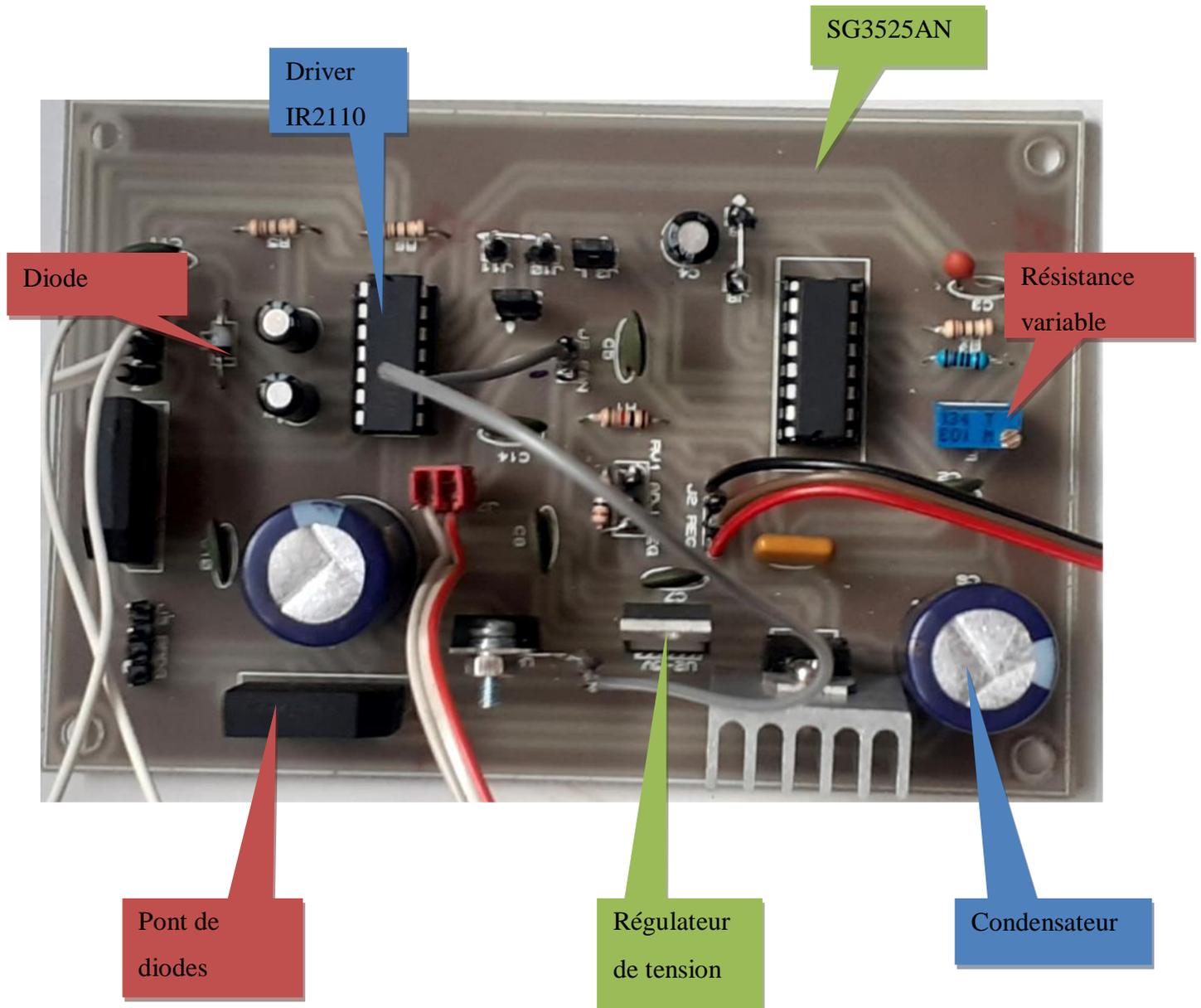
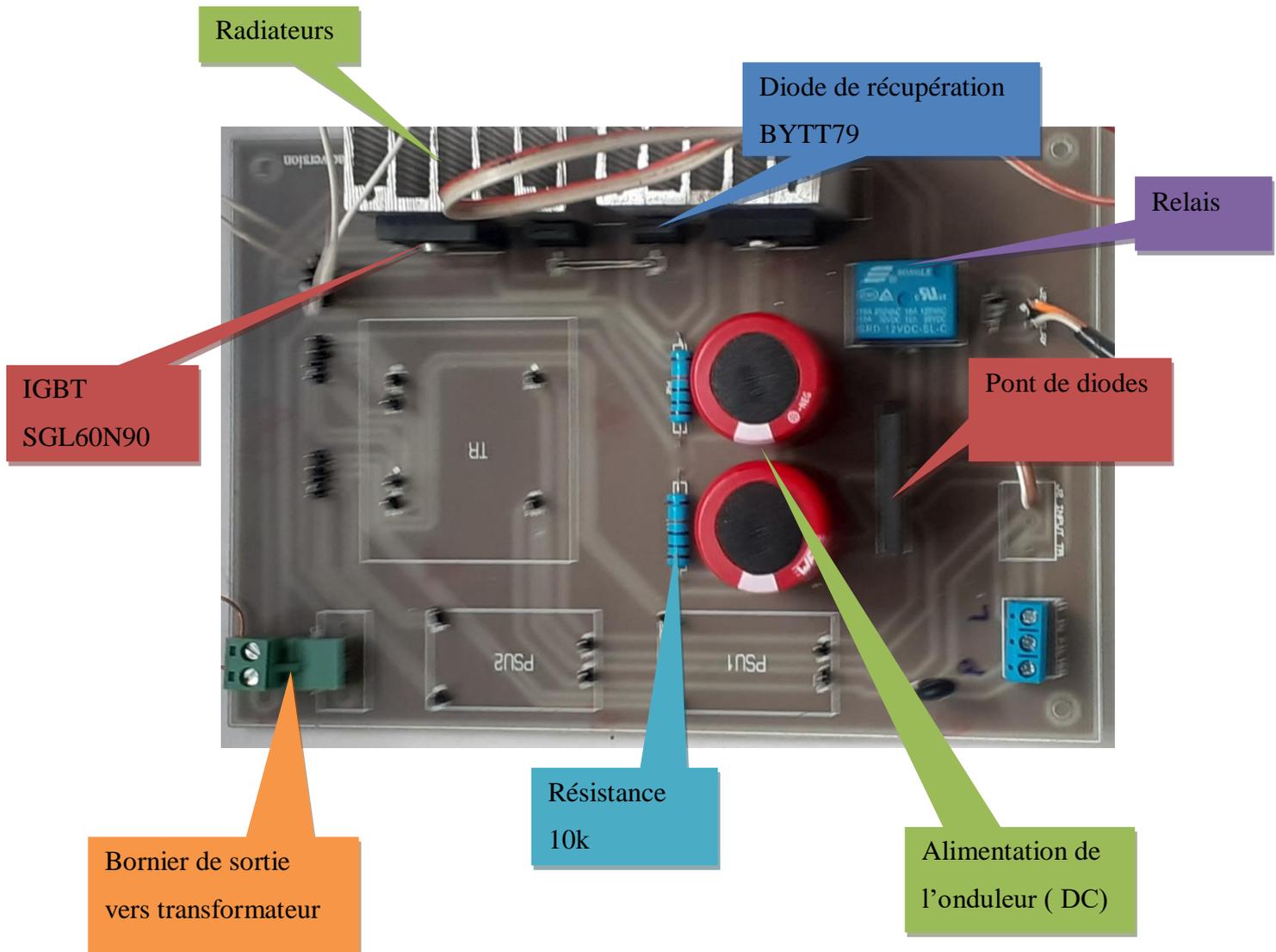


Figure 3.20 : Photographie du circuit de la commande.



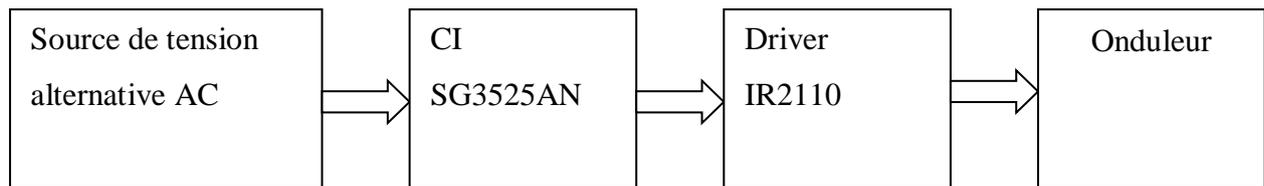
**Figure 3.21** : Photographie du circuit de puissance.

### 3.5.2. Description de l'alimentation

L'utilisation de composants électroniques de haute performance a permis d'élargir la gamme d'utilisation de l'onduleur et le rendre universel. Il se caractérise par une sécurité de fonctionnement, une capacité de communication vers d'autres systèmes au moyen d'interfaces intégrées (Figure3.22).

Les principaux composants de la chaîne de l'onduleur sont :

1. Bloc gérant la commande,
2. Bloc gérant l'étage de puissance (onduleur).



**Figure 3.22 :** Chaîne de l'onduleur.

### 3.5.2.1. Bloc de la commande

Le circuit de commande permet de générer les signaux de commande au convertisseur statique (l'onduleur). Ce circuit utilise un circuit intégré SG3525 qui permet de réaliser plusieurs fonctions notamment de générer les signaux de commande et de moduler la largeur d'impulsion (Modulation MLI). Ainsi le circuit assure la régulation de la tension de sortie et les protections contre la surcharge ou court-circuit au niveau de la charge.

Le SG3525 est un circuit de commande à modulation de largeur d'impulsion qui est utilisé pour contrôler les alimentations à découpage et contribue en particulier à réduire le nombre de pièces externes et à améliorer les performances.

La régulation PWM est utilisée dans la plupart des circuits de contrôle et de conversion de puissance, notamment le contrôle des moteurs, les convertisseurs DC/DC, les onduleurs DC/AC. Il existe de nombreux contrôleurs MLI qui utilisent la technique MLI assez facilement. L'un des plus répandus est le contrôleur MLI le SG3525 fabriqué par ST microélectronique. Le contrôleur SG3525 offre des performances élevées lorsqu'il est utilisé dans les convertisseurs DC/DC, les systèmes UPS, les onduleurs solaires, les alimentations à découpage, les chargeurs de batteries et plusieurs autres applications. Ce circuit utilise deux sorties PWM principales.

#### **Alimentation du CI SG3525 :**

Le SG3525, pour pouvoir fonctionner, a nécessairement besoin de :

- D'une tension d'alimentation VCC qui doit être comprise entre 8V et 35V. Le SG3525 a un circuit de verrouillage de sous-tension qui empêche le fonctionnement lorsque VCC est inférieur à 8V, évitant ainsi un fonctionnement erroné ou un dysfonctionnement (pins15).
- D'une tension d'alimentation de VC doit être compris entre 4,5 V et 35 V (pins13).

L'alimentation du CI SG3525 dans notre cas se fait avec un transformateur de **24V**, via un redresseur à diodes. On place un condensateur de filtrage juste après le redresseur d'une valeur de **2200 $\mu$ F** qui a pour but de lisser la tension afin que celle-ci soit continue.

Un régulateur de tension **+12V** de type **L7812CV** fournit ensuite une tension stable indépendante du courant débité. Cette tension fournit **+12V** alimente les deux tensions **VCC** et **VC** de notre SG3525.

### **3.5.2.2. Le driver des interrupteurs de puissance :**

#### **a) La commande d'un interrupteur de puissance dans son environnement**

Pour pouvoir contrôler, moduler et transférer l'énergie, les convertisseurs de puissance ont besoin d'utiliser au moins un interrupteur de puissance commandé. Pour cela nous disposons de nombreux interrupteurs en technologie Silicium (IGBT, MOSFET). Les transistors à grille isolée comme les MOSFET ou les IGBT doivent être pilotés par un circuit de commande, appelé « driver » qui est un circuit intégré qui permet le pilotage en haute fréquence en injectant les signaux d'amorçages aux interrupteurs (2 IGBT), sous des tensions pouvant atteindre 600 V en garantissant l'isolation électrique de chaque étage. Ce circuit driver a pour but de fournir et contrôler la charge et/ou la décharge de l'électrode de grille du composant de puissance (pouvant être normalement représentée sous la forme d'une capacité de grille) afin de permettre les changements d'états (passage de l'ouverture à la fermeture ou de la fermeture à l'ouverture) ainsi que permettre le maintien dans un état ouvert ou fermé.

#### **b) Eléments nécessaires à une structure de base d'un driver**

Nous étudions dans cette partie les fonctions associées aux circuits de commande dans un convertisseur de puissance à travers la structure de convertisseur de base qui suit. La figure 3.23 montre les différents éléments nécessaires a un driver d'un convertisseur en demi-point.

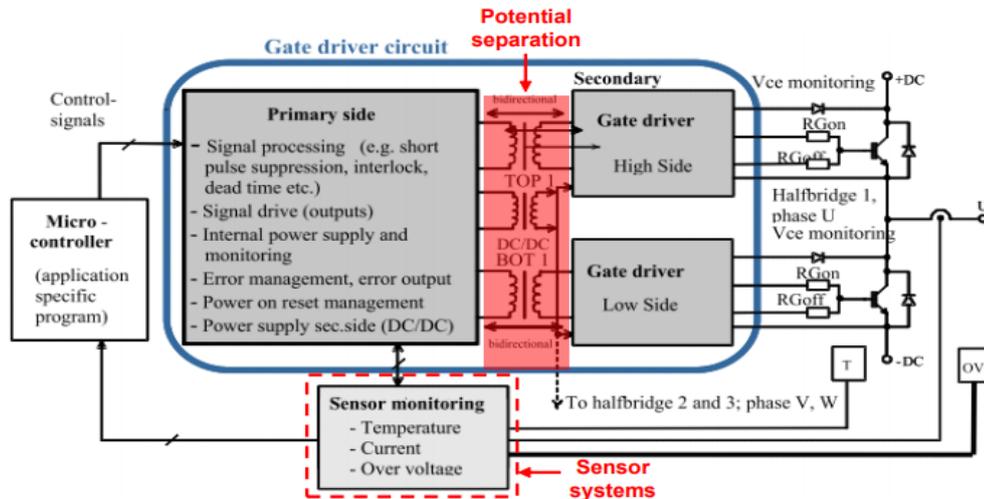


Figure 3.23: Schéma d'un convertisseur en demi-pont

Comme on peut le voir sur cette figure, les ordres venant de la commande éloignée (commande par le circuit intégré SG3525 dans notre cas) sont adaptés via différentes fonctions de la commande rapprochée du driver pour être traduit en un signal permettant la commutation de l'interrupteur. C'est la fonction principale du driver.

- La commande rapprochée de la grille :

Le driver avec ses circuits de contrôle et de protection crée une interface entre la commande éloignée et le composant de puissance permettant de fournir et gérer l'énergie nécessaire à la grille afin de faire commuter le transistor.

- Fonctions de capteurs et de surveillance pour la protection du composant de puissance

Le driver doit réaliser la protection du composant de puissance en cas de défaut. Cette fonction est principalement basée sur des capteurs permettant de surveiller les états du composant de puissance (courant, tension, température). Cette sécurité est nécessaire pour que l'interrupteur de puissance travaille dans sa zone de caractéristique normale.

- Transfert des ordres à différents potentiels

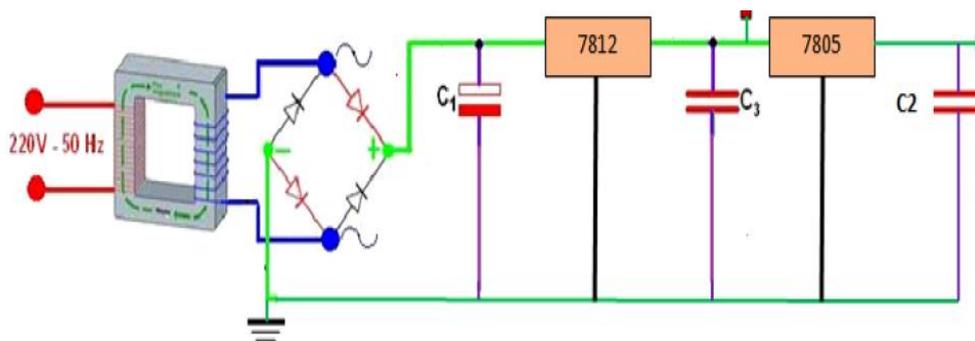
Dans de nombreuses applications, une séparation des potentiels est nécessaire entre la commande éloignée et la commande rapprochée. Grâce à celle-ci toutes les connexions sur le côté d'entrée (côté primaire), et toutes les connexions sur le côté de sortie (secondaire) sont séparées électriquement.

### c) Alimentation du driver

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 : **KBL610**) 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 est d'autant plus efficace que la capacité des condensateurs est importante.

Pour ce qui est du circuit de régulation 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 **+5 V** et **+15V**.

La figure 3.24 représente le schéma électrique de l'alimentation du driver.



**Figure 3.24** : Schéma électrique de l'alimentation du driver

Le driver utilisée dans notre circuit possède deux alimentations VCC et VDD, VCC est l'alimentation côté bas et doit être entre 10V et 20V. VDD est l'alimentation logique du circuit, elle peut être compris entre + 3V et + 20V.

Donc on a choisit d'utiliser VDD=5V, cela signifie que le driver peut être utilisé dans tous les circuits, car la plupart des circuits ont tendance à avoir des sorties d'environ 5V, et on a donné une alimentation de 15V au VCC.

### 3.5.2.3. Bloc de puissance (onduleur)

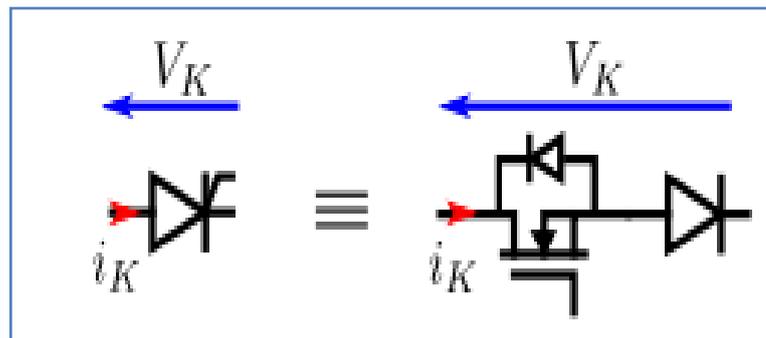
L'onduleur constitue la dernière partie de la maquette dans le circuit puissance.

#### a) Interrupteur de puissance :

Les interrupteurs de puissance utilisés pour le convertisseur sont des modules IGBT + Diode (BYT79X).

#### b) Critères de choix des semi-conducteurs :

Le choix de l'interrupteur de puissance se fait en tenant compte de la gamme de fréquence (7-12kHz), de la tension, du courant et surtout du prix et la disponibilité des composants. Vu la fréquence du travail on ne peut pas employer des thyristors, on a opté pour un thyristor qui sera utilisé avec association en série d'un transistor de puissance type MOSFET. Cette association possède structurellement deux segments de courant pour un segment de tension, et une diode qui possède structurellement un segment de tension et un segment de courant, afin de disposer d'un composant équivalent comportant deux segments de tension pour un seul de courant (Figure 3.25).



**Figure 3.25 :** Thyristor de synthèse par association série d'un MOSFET et d'une diode.

En outre, lors du changement du signe du courant, il y aura un blocage spontané dans l'interrupteur équivalent. Cette propriété du blocage devra être gérée dans la commande du transistor, car contrairement au cas du vrai thyristor, elle ne saurait exister à l'état naturel pour cette association.

Donc, Nous avons opté pour le transistor IGBT + Diode (BYT79X) dont les caractéristiques conviennent à nos besoins en courant, tension et temps de réponse.

## 3.6. Composants utilisés

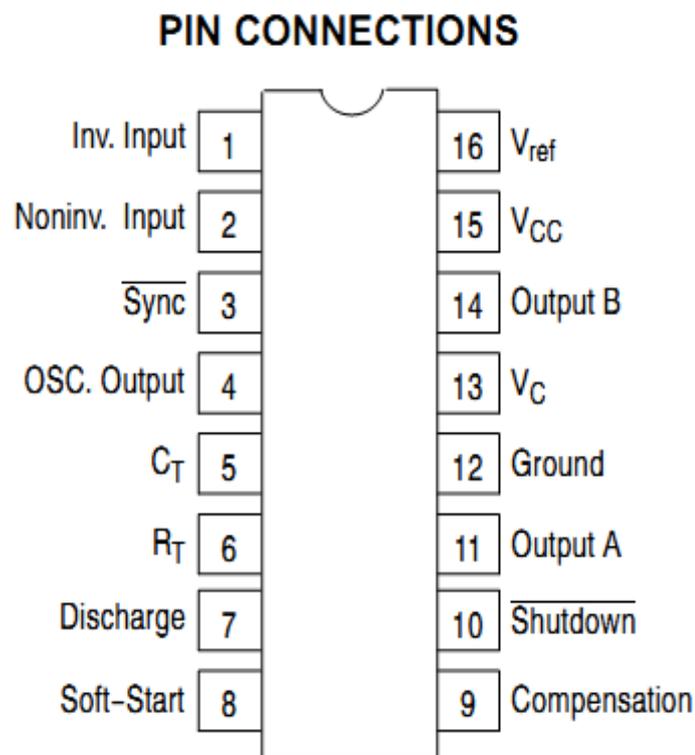
### 3.6.1. Bloc de commande

Les composants utilisés dans l'étage de commande sont décrits ci-dessous.

#### 3.6.1.1. Le contrôleur MLI SG3525

Le circuit intégré (CI) SG3525 est un module de contrôle, il est formé d'un seul boîtier qui intègre plusieurs circuits spécialisés parmi lesquels on distingue la commande MLI, les protections et l'étage de sortie.

La figure 3.26 présente l'architecture interne du circuit SG3525 [2].



**Figure 3.26** : boîtier du CI SG3525.

#### a) Caractéristiques du SG3525

- Fonctionnement 8V à 35V.
- Référence ajustée  $5,1 \text{ V} \pm 1,0\%$ .
- Broche de synchronisation d'oscillateur séparée.
- Plage d'oscillateur de 100 Hz à 400 kHz.

- Verrouillage de sous-tension d'entrée.
- Contrôle du temps mort réglable.
- Arrêt impulsion par impulsion.
- Sorties double source / récepteur.
- Verrouillage PWM pour éviter les impulsions multiples.

### b) Description des pins du SG3525

L'article explique le fonctionnement des différents pins du SG3525 qui est régulateur sur le signal des impulsions avec largeur modulé (MLI). Essayons de comprendre dans les détails :

- **Pin 1** (INV. Input) et **Pin 2** (Non inv. Input) : des entrées de l'amplificateur opérationnel, amplificateur d'erreur intégré du CI. L'erreur est utilisée pour modifier le rapport cyclique des tensions de sortie Pin 11 et Pin 14.
- **Pin 3** (Syn.) : Cette broche peut être utilisée pour synchroniser le circuit intégré avec une fréquence d'un oscillateur externe. Cela se fait généralement lorsque plusieurs circuits intégrés sont utilisés et qui nécessitent d'être synchronisés avec une fréquence d'un oscillateur commun.
- **Pin 4** (OSC Out) : c'est le signal de sortie de l'oscillateur du CI.
- **Pin 5** (CT) et **Pin 6** (RT) : ces broches sont connectées à des résistances et des condensateurs externes pour fixer la fréquence de l'oscillateur interne.
- **Pin 7** (DT) : Ce pin est utilisé pour fixer le temps mort (Dead time), entre la commutation des deux sorties (A et B). Une résistance connectée entre ce pin et le pin 5 fixe le temps mort.
- **Pin 8** (Soft-Start) : est utilisé pour démarrer le fonctionnement du CI lentement pour éviter le choc brutal électrique du démarrage. Un condensateur connecté entre ce Pin et la masse réalise cette fonction.
- **Pin 10** (Shutdown) : est utilisé pour bloquer les signaux de sortie du CI en cas d'un défaut de fonctionnement du circuit.
- **Pin 11** (sortie A) et **Pin 14** (sortie B) : les deux sorties du CI.
- **Pin 12** (Ground) : ce Pin est connecté directement à la masse du circuit.
- **Pin 13** (Vc) : ce Pin est connecté à l'alimentation de l'étage de sortie qui commande le convertisseur de puissance. Vc est comprise entre 4.5V et 35V.
- **Pin 15** (Vcc) : ce Pin est l'alimentation de la partie logique interne du CI. Vcc est comprise entre 8V et 35V.

- **Pin 16** (V<sub>réf</sub>) : ce Pin fournit une tension de référence stable de 5.1V interne. Cette tension peut être utilisée pour la régulation du rapport cyclique à l'aide de l'amplificateur opérationnel d'erreur Interne du CI.

### 3.6.1.2. Driver IR2110

C'est un circuit intégré qui permet le pilotage en haute fréquence en injectant les signaux d'amorçages aux interrupteurs (2 IGBT), sous des tensions pouvant atteindre 500 V en garantissant l'isolation électrique de chaque étage.

Ce driver a été choisi pour sa disponibilité ainsi que sa haute fréquence de commutation. Son pic de courant de sortie élevé (2A) est largement suffisant pour commander l'interrupteur de puissance (IGBT). La tension d'alimentation du Driver s'étend sur une plage de 5V à 20V. Le temps de retard pour la montée est de 25 à 35ns et celui de la descente est de 17 à 25ns.

La figure 3.27 présente l'architecture interne du driver IR2110.

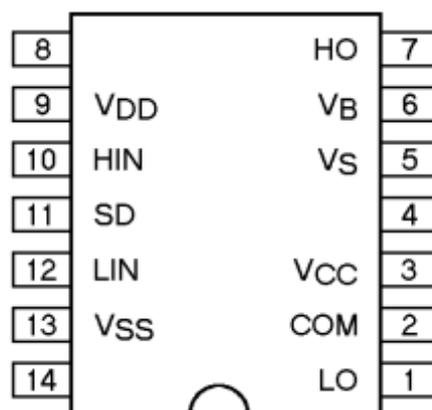


Figure 3.27 : Boîtier du driver IR2110

#### a) Caractéristiques du driver :

- Il peut fournir une tension de porte entre 10 et 20 volts.
- Compatible avec les circuits CMOS et TTL
- Protection contre la sous-tension pour les broches / canaux LO et HO
- Tension de sortie: 10-20 V
- Courant de sortie: 2A
- Arrêt automatique avec un circuit de retour

### b) Description des pins :

La configuration des broches et la fonctionnalité de chaque broche sont indiquées ci-dessous :

- Pins 1 (LO)** est : la basse tension de sortie latérale.
- **Pins 2 (COM)** est : un chemin de retour pour le côté bas.
- **Pins 3 (VCC)** est : la basse tension alimentation fixe
- **Pins 5 (VS)** est : la tension de décalage d'alimentation logique
- **Pins 6 (VB)** est utilisée comme alimentation flottante élevé ou circuit flottant pour fournir une tension flottante à l'IGBT côté supérieur.
- **Pins 7 (HO)** est flottante sortie élevé
- **Pins 9 (VDD)** : est la tension d'alimentation logique.
- **Pins 10 (HIN)** est un signal d'entrée pour la sortie du pilote IGBT coté haut.
- **Pins 11 (SD)** est utilisée comme broche d'arrêt.
- **Pins 12 (LIN)** est un signal d'entrée pour la sortie du pilote IGBT côté bas.

#### 3.6.1.3. Pont de diode :(KBL610)

Un pont de diodes, aussi appelé pont de Graetz, ou redresseur double alternance, est un assemblage en pont de 4 diodes permettant de redresser le courant alternatif en courant continu.

Les diodes sont placées astucieusement afin que le courant d'entrée qui est tantôt positif et tantôt négatif ne passe que dans un seul sens dans les fils de sortie. Pour faire simple, le courant de sortie n'est autre que la valeur absolue du courant d'entrée.

Le pont de diode se présente tel que spécifié ci-dessous (Figure 3.28).

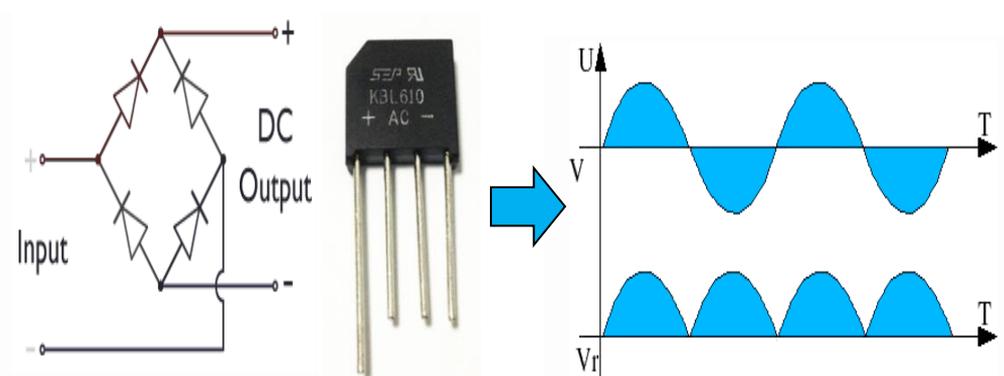


Figure 3.28 : Pont de redressement.

#### 3.6.1.4. Régulateur de tension

Un régulateur de tension est un appareil qui prend en charge les épisodes de sous-tension ou surtension. Il va intervenir pour corriger automatiquement la tension électrique.

Un circuit de régulation a pour rôle d'affiner le « lissage » et stabiliser la tension à une valeur fixe (Figure 3.29). Nous avons donc opté pour le régulateur de tension L7812CV dont la tension de sortie de **+12V** est destinée pour alimenter le circuit SG3525.

En ce qui concerne le driver IR2110, son fonctionnement nécessite deux tensions fixes :

- **VCC=+15V** est l'alimentation côté bas.
- **VDD=+5V** est l'alimentation logique du driver.

Donc on a choisit d'utiliser les deux régulateurs (**7805**) et (**L7815CV**) qui nous donnent respectivement les deux tensions fixe **+5V** et **+15V**.

**Remarque :** Les condensateurs placés entre la sortie de chaque régulateur et la masse ne sont pas obligatoires, 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.

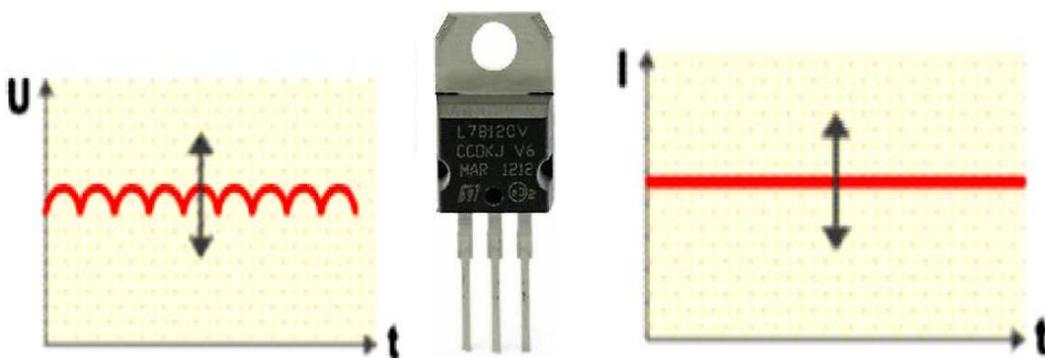


Figure 3.29: Régulateurs de tension

### 3.6.2. Bloc gérant la puissance

Les composants utilisés dans l'étage de puissance sont décrits ci-dessous.

#### 3.6.2.1. Transistor IGBT (SGL60N90) :

Il s'agit d'un composant de structure proche de celle du MOSFET (Metal-Oxide-Silicon-Field-Effect-transistor) qui 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 (Figure 3.30).

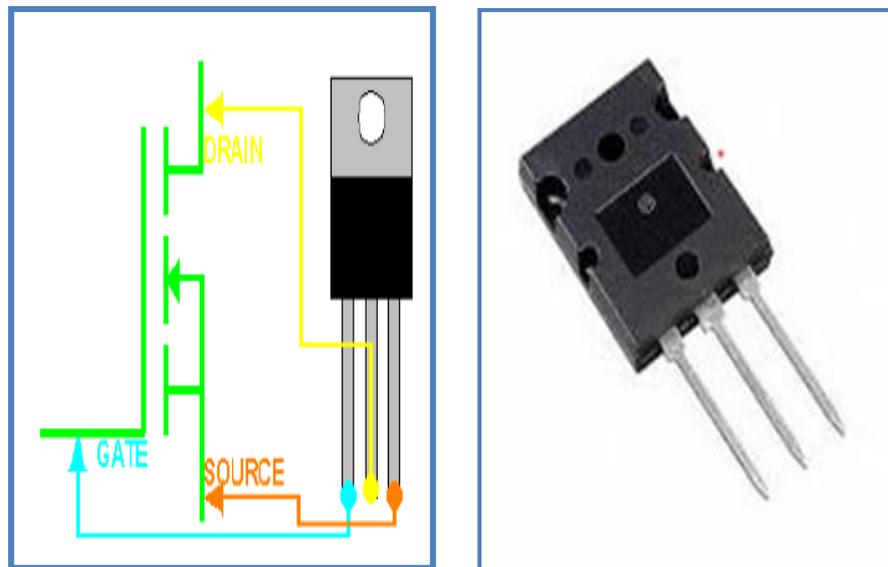


Figure 3.30 : Brochage du MOSFET.

Pendant la commutation, les pertes dans les interrupteurs commandés sont importantes car le courant et la tension sont non nuls en même temps. Ces pertes peuvent occasionner la destruction du composant si l'on n'en tient pas suffisamment compte ou emmener à une diminution très vite de la fiabilité de ces composants quand la température augmente. Il est alors nécessaire de calculer des dissipateurs (radiateurs : barres d'aluminium de petites dimensions) pour chaque composant fonctionnant de la sorte. Ceci est valable pour la diode comme pour tous les interrupteurs qui suivront. Les pertes par commutation vont bien entendu augmenter avec la fréquence (plus la fréquence est élevée, plus il y a des commutations par unité de temps). Il y a aussi des pertes par conduction (la tension aux bornes des interrupteurs n'est pas rigoureusement nulle lorsqu'ils conduisent).

### 3.6.2.2. Diode de roue-libre (BYT79X) :

Des diodes sont également placées au plus près des cellules de commutation. Une diode est un dispositif électronique commun avec deux fils, il permet à un signal électrique de passer dans un sens, mais bloquer un signal qui tente de passer dans l'autre sens. La fonction principale de ces diodes est de maintenir une tension constante à ses bornes. Ce sont des diodes stabilisatrices de tension (Figure 3.31).

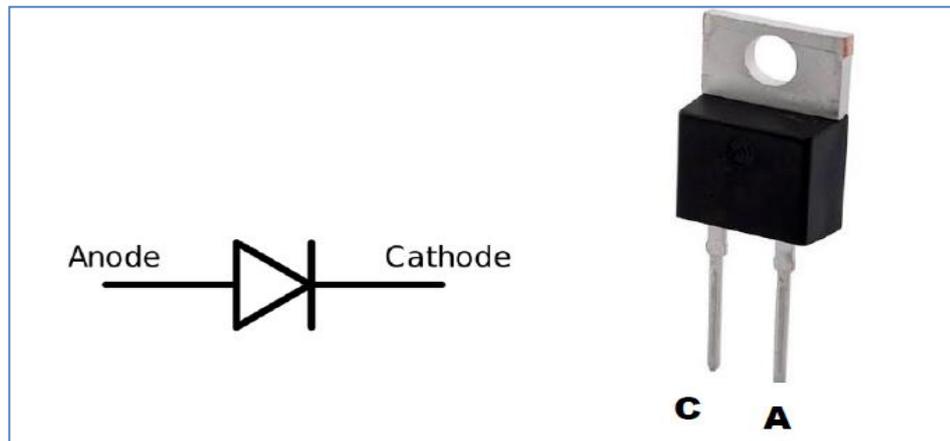


Figure 3.31: Brochage de la diode.

### 3.6.2.3. Pont de diodes

Le pont de diodes utilisé dans la partie puissance (l'onduleur) est de type GSIB1560. C'est un pont redresseur pour montage en surface avec récupération rapide en monophasé, ses principales caractéristiques sont :

- $I_f$  (courant direct) : 15A
- Tension inverse de pointe : 600V

## 3.7. Transformateur élévateur à ferrite

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 élevée pour la technologie actuelle des semi-conducteurs. Pour cette raison, nous sommes obligés d'inclure un transformateur élévateur entre l'onduleur et le générateur d'ozone.

Ainsi, la structure du pont devient celle de la figure 3.32.

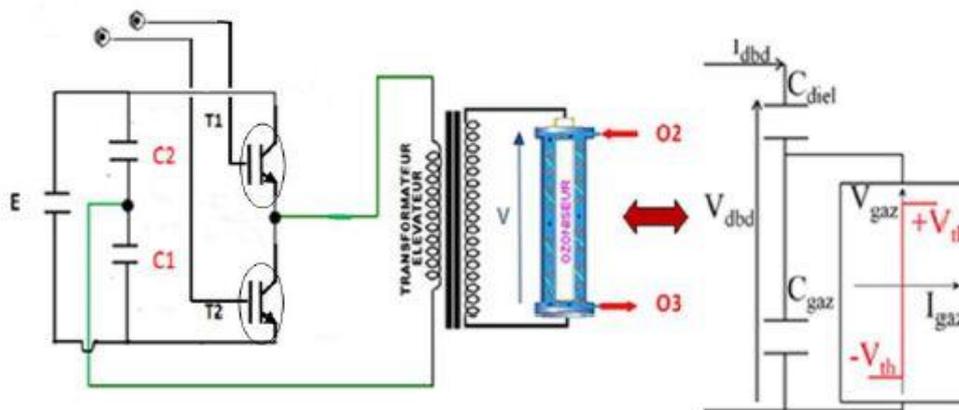


Figure 3.32 : Onduleur demi-pont alimentant un réacteur

Sachant que la DBD est une charge capacitive, nous pouvons utiliser sa capacité pour réaliser le circuit LC. Le circuit résonant est ainsi formé par l'inductance  $L$  du transformateur et la capacité  $C$  du générateur d'ozone. La fréquence d'oscillation est donc la fréquence de résonance du circuit LC. L'objectif sera d'alimenter ce circuit résonant par un créneau de courant ou de tension de fréquence proche de sa fréquence de résonance propre. Cette dernière est basée sur une résonance série. Lorsqu'on ferme **T1**, un circuit résonant LC est formé et une tension positive apparaît aux bornes du réacteur DBD. Lorsque cette tension s'annule, ces deux interrupteurs sont alors ouverts ce qui permet d'avoir une commutation douce ZVS (commutation à tension nul) et de réduire les pertes. Un temps mort souhaité est attendu et puis **T2** est fermé, ce qui permet d'avoir une tension négative dans la décharge.

### 3.7.1. Temps mort des interrupteurs (dead time) :

Le temps mort est le temps pendant lequel aucune partie d'un pilote du convertisseur n'est activée. Il est utilisé lorsque deux signaux PWM sont complémentaires (l'un étant allumé lorsque l'autre est éteint), de manière à ce qu'aucun interrupteur du convertisseur ne puisse être conducteur en même temps. Comme un IGBT ne passe jamais instantanément de ON à OFF, ni de OFF à ON, mais a plutôt un temps de charge et de décharge.

Dans notre cas le temps mort est réglé à travers le circuit de commande (SG3525) en mettant une résistance entre les pins 5 et 7.

### 3.8. Utilisation de l'alimentation réalisée 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 3.33) : un onduleur développé au sein du laboratoire et un transformateur haute fréquence et élévateur de tension.

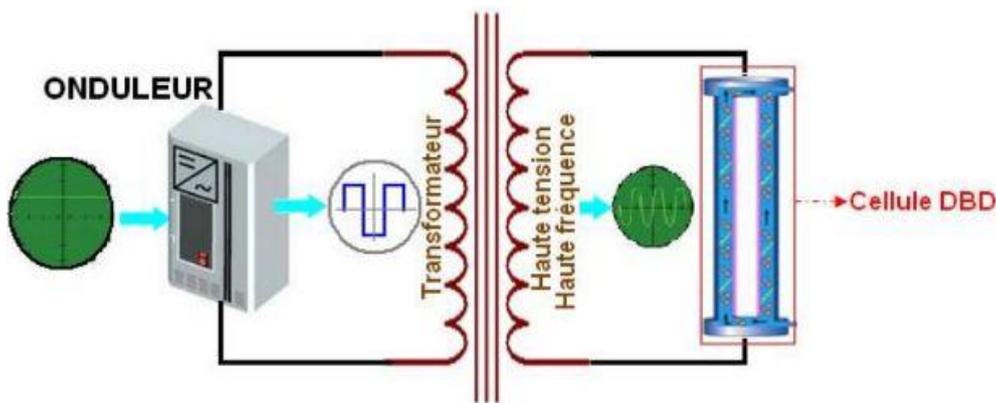


Figure 3.33 : Circuit électrique de l'alimentation.

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 160 V. Ce signal alimente le primaire du transformateur élévateur à circuit magnétique ferrite. L'amplitude maximale que peut atteindre la tension de sortie est 5 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.

La tension inter-électrodes est mesurée par l'intermédiaire d'une sonde haute-tension (rapport de conversion de 1 pour 1000, tension maximale 40kV) disposée à la sortie du transformateur haute-tension et connectée d'autre part à la terre. La sonde permet de visualiser la tension à l'aide d'un oscilloscope digital.

Une prise de vue du dispositif expérimental est représentée dans la figure 3.34

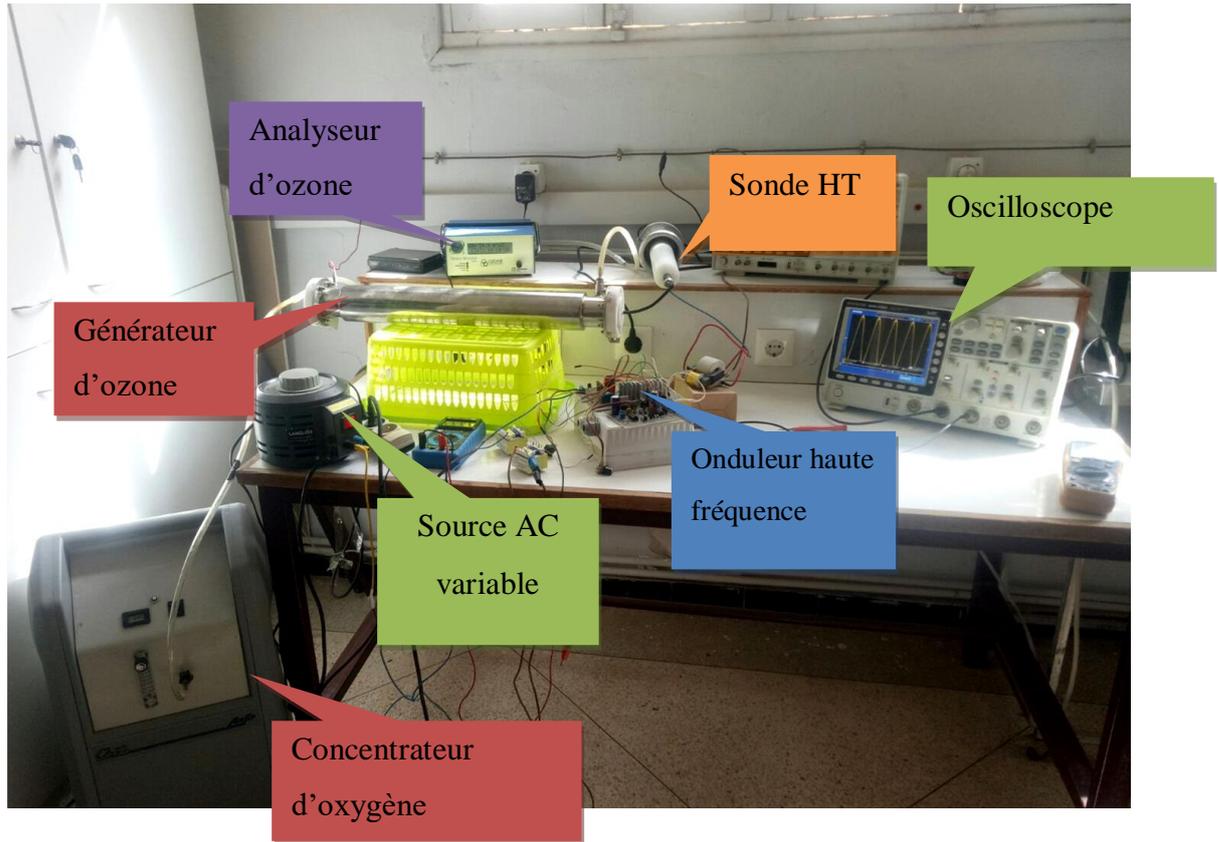
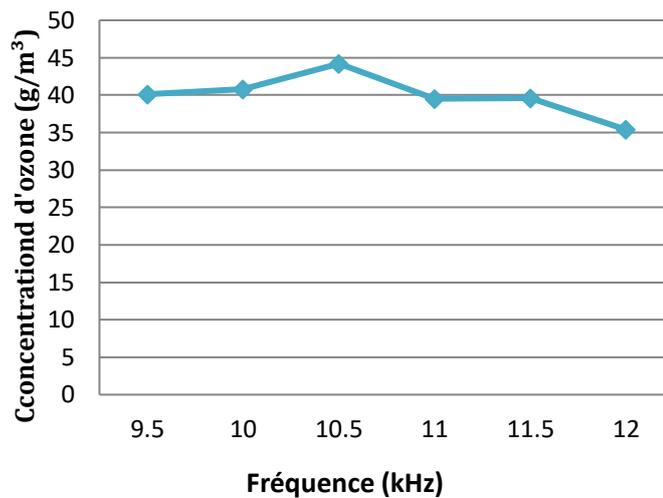


Figure 3.34 : Photo du dispositif expérimental.

### 3.8.1. Test de l'alimentation réalisée

Dans ces expériences, on a fixé la tension appliquée au réacteur à une valeur de 4.5 kV, en variant la fréquence à chaque expérience de 9.5 kHz à 12 kHz (figure 3.35). L'alimentation est reliée au générateur d'ozone, celui-ci est alimenté en gaz par un concentrateur d'oxygène. En passant dans le générateur, l'oxygène se transforme en ozone qui est mesuré à l'aide d'un analyseur d'ozone en  $\text{g/m}^3$ .

Les résultats obtenus de la variation de la concentration d'ozone en fonction de la fréquence sont représentés à la figure 3.35.



**Figure 3.35** : Concentration d'ozone en fonction de la fréquence.

Ces résultats montrent que la concentration d'ozone augmente en fonction de la fréquence jusqu'à une valeur maximale de  $44.2 \text{ g/m}^3$  à une fréquence de  $f = 10.5 \text{ kHz}$  puis elle diminue. Cela pourrait s'expliquer d'un côté par le fait que l'augmentation de la fréquence fait augmenter le nombre des micros-décharges par unité de temps, et que cette valeur représente la fréquence de résonance pour laquelle la décharge est maximale.

En s'éloignant de la fréquence de résonance, l'intensité des micros-décharges diminue, ce qui fait réduire la production d'ozone.

### 3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de réalisation d'une alimentation haute tension pour un générateur d'ozone. Elle consiste fondamentalement à contrôler la fréquence et l'amplitude du signal.

Nous avons proposé un convertisseur statique (onduleur) pour alimenter un générateur d'ozone qui représente une charge capacitive. La commande est assurée par le circuit intégré SG3525 qui est simple et peu coûteux. Le bon fonctionnement de l'onduleur nécessite l'utilisation d'interrupteurs de type IGBT.

Afin de valider le fonctionnement correct de l'alimentation haute tension, nous avons effectué des essais de cette alimentation sur un générateur d'ozone au sein du laboratoire.

La meilleure façon de contrôler la puissance et la production d'ozone, est l'imposition d'une haute tension avec une fréquence de résonance bien déterminée. Cette fréquence représente la fréquence de résonance pour laquelle la production de l'ozone et l'efficacité énergétique sont maximales (maximiser la production d'ozone et minimiser la consommation de l'énergie).

## Conclusion générale

La décharge à barrière diélectrique est simple et représente un bon moyen pour obtenir un plasma hors équilibre « froid » afin de générer de nombreuses applications. Parmi ces applications, nous avons utilisé la DBD en tant que générateur d'ozone.

Les générateurs d'ozone sont de plus en plus utilisés dans différents domaines de l'industrie pour l'élimination des virus, bactéries et micro organismes dans l'eau et dans l'air. Actuellement, le moyen le plus efficace de production de l'ozone est la décharge à barrière diélectrique, qui nécessite des tensions de l'ordre de plusieurs kV et des fréquences de quelques dizaines de kHz.

Cette étude est consacrée à la réalisation d'une alimentation haute tension à haute fréquence pour ozoniseur de type DBD. L'onduleur proposé se caractérise par une variation possible de tension appliquée au générateur DBD qui implique une variation de quantité d'ozone. L'alimentation peut être utilisée non seulement dans les ozoniseurs de type DBD mais aussi dans d'autres appareils de décharge qui fonctionnent en courant alternatif.

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.

Cette alimentation a été conçue et réalisée en deux blocs associés en cascade : un bloc gérant la commande 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 demi pont et d'un transformateur élévateur. La plage des fréquences de fonctionnement choisies se situent à des valeurs élevées. L'onduleur réalisé comprend principalement deux IGBTs, deux diodes et un circuit de commande SG3525 pour gérer la fréquence de fonctionnement.

Durant ce travail, nous avons montré que la production d'ozone est influencée et commandée par deux facteurs principaux : la haute tension appliquée et la fréquence de fonctionnement. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la fréquence qui fait augmenter le nombre de micro-décharges par unité du temps fait accroître la dissociation des molécules d'oxygène en favorisant leur recombinaison en ozone, en s'approchant de la

fréquence de résonance. En s'éloignant de la fréquence de résonance, l'intensité des micro-décharges diminue, ce qui réduit la formation d'oxygène atomique et la production d'ozone.

Comme perspectives, il sera maintenant possible de passer à la réalisation d'une alimentation fiable pour dispositif industriel, afin d'alimenter des générateurs d'ozone destinés pour les systèmes utilisant un nombre élevé de générateurs.

## Références bibliographiques

**[1] Chen, Francis F.**

“Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion”. Cham: Springer International Publishing, 2016.

**[2] Fridman, Alexander A., et Lawrence A. Kennedy.**

“Plasma Physics and Engineering”. New York: Taylor & Francis, 2004.

**[3] Bittencourt, J. A.**

“Fundamentals of Plasma Physics”. New York, NY: Springer New York, 2004.

**[4] J. Larbre,**

“Decontamination de surface par un procédé plasma à pression atmosphérique”

Thèse de Doctorat de l’Université Paris Sud XI, 2006.

**[5] 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.

**[6] A. Abahazem,**

“Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz”

Thèse de Doctorat de l’Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.

**[7] N. Dubus,**

“Contribution à l’étude thermique d’un réacteur à décharge à barrière diélectrique”

Thèse de Doctorat de l’Université de Poitiers, 2009.

**[8] Wang, C., and He, X.**

“Effect of atmospheric pressure dielectric barrier discharge air plasma on electrode surface.” Applied Surface Science, 253(2), 926-929(2006).

**[9] Kornev, J., Yavorovsky, N., Preis, M., Isaev, U., and Chen, B. N.**

“Generation of active oxidant species by pulsed dielectric barrier discharge in water-air mixtures.”

Ozone: Science and Engineering, 28(4), 207-215(2006).

**[10] Claire Tendero**

« Torche plasma micro-onde à la pression atmosphérique : application au traitement des surfaces métalliques »

Thèse de doctorat, Université de Limoges, Octobre 2005.

**[11] Laroussi, M., Alexeff, I., Richardson, J. P., & Dyer, F. F**

« The resistive barrier discharge. »

Plasma Science, IEEE Transactions on, 30(1), 158 -159(2002).

**[12] 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.

**[13] 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

**[14] Cédric Larricq-Fourcade Dit Leride**

« Etude de la pulvérisation assistée en air d'une nappe liquide et influence d'un ventonique sur les instabilités hydrodynamiques »

Thèse de doctorat, L'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, Décembre 2006.

**[15] Axel 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 un isotope »

Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2002.

**[16] Valentin I. Gibalov & Gerhard J. Pietsch**

« On the Performance of Ozone Generators Working with dielectric Barrier discharges"

Journal : Ozone: Science & Engineering, Volume 28, Issue 2, May 2006, pages 119-124

**[17] : M.A.Djibrillah,**

« Eléments de conception d'un générateur électrique pour alimentation d'un dispositif de décharge à barrière diélectrique », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2011.

**[18] U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli,**

« From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges »

Pure Appl.Chem., Vol.71, No. 10, pp. 1819-1828, 1999

**[19] U. Kogelschatz,**

« Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications »

Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, 2003

**[20] :Z. Falkenstein, J.J Coogan,**

« Microdischarge behaviour in the silent discharge of nitrogen–oxygen and water–air mixtures»

J. Phys. D: Appl. Phys. (30) 817– 825. Printed in the UK (1997)

**[21] Cours de Dr. Tilmatine Amar**

« Générateurs de haute tension »

cours pour Master M2, Electrotechnique. Université de Sidi-Bel-Abbes, 2019.

**[22] Saad EL AMARI**

Développement et caractérisation de générateur optoélectronique d'impulsions de champ électrique nanoseconde et subnanoseconde de forte intensité : application au domaine biomédical. Thèse doctorat université de Limoges, 2011.

**[23] Jérôme bac**

« Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires. »

Thèse doctorat université de Pau et des pays de l'Adour Juillet 2005.

**[24] Lyonel Baum**

« Le générateur de Marx »

<http://lyonel.baum.pagesperso-orange.fr/marx.html>

**[25] BAHAR Abderrazzak, MANSOUR Zakaria**

« Etude sur un banc expérimental d'extraction de jus traité par champ électrique pulsé ».

Mémoire master université Djilali Liabes Sidi Bel Abbès Juin 2014.

**[26] Bellebna Yassine**

« Contribution à l'étude de l'application du champ électrique pulsé dans le domaine agroalimentaire ».

Thèse doctorat université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès 2014.

**[27] D. Violaine**

"Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques"

HESPUL, 1997.

**[28] N. Rasmussen**

"Les différents types d'onduleurs"

Livre blanc n°1, ©2004 American Power Conversion.

**[29] M. SAHALI**

« Notes de Cours de Master »

Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès 2018.