

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Electronique

N°: 2022/INST/28



FILIÈRE : Electronique

OPTION : Instrumentation

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par :

Hamou HAMMANI

Ayyoub BEN ADEL

THÈME

**Étude de l'effet du traitement par décharge à  
barrière diélectrique (DBD) sur les propriétés  
des films de ZnO**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Madani BENAHCENE

Université M<sup>ed</sup> Boudiaf –M'sila

Président

Prof. Noubel GUERMAT

Université M<sup>ed</sup> Boudiaf –M'sila

Rapporteur

MAA. Hatem MEZAACHE

Université M<sup>ed</sup> Boudiaf –M'sila

Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

## **Remerciements**

*Tout d'abord, Nous remercions ALLAH miséricorde de nous avoir donné la volonté, le courage et la patience qui nous ont permis de réaliser ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Pr. Noubel GUERMAT d'avoir proposé ce sujet, et dirigé notre travail durant la période d'élaboration de ce mémoire. Nous exprimons notre profonde gratitude pour nous avoir fait profiter de ces connaissances, mais aussi de sa méthode de travail, et surtout de sa rigueur scientifique.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de Jury Dr. Hatem MEZAACHE, Dr. Madani BENAHCENE, qui ont accepté de juger notre travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électronique,*

*Enfin, nos remerciements A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.*

## *Dédicaces*

*On voudrait dédier ce modeste travail à tous ceux qui sont chers à nos cœurs, qui ont pris soin de nous et qui ont tout sacrifié pour nous, nos chères mamans.*

*A nos papas qui nous ont soutenus tout le long de nos cursus scolaire et universitaire et qui ont su donner tant d'efforts pour notre bien et réussite.*

*A nos frères et sœurs qui sont chers à nos cœurs.*

*À toute la famille BENADEL et HAMMANI*

*À tous nos amis qui nous ont accompagnés Le long de nos cursus .wassim, fateh, karim, fares, haroune, abdelhaq.*

*À tous nos professeurs de l'école primaire à l'université.*

*À tous ceux qui sont chers à nos cœurs.*

## Sommaire

<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>9</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I.1- Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2- Généralités sur les plasmas.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1- Définition d'un plasma .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3- Création du plasma.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.4- Plasmas thermiques.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.5- Plasmas hors équilibre .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.6- Grandeurs caractéristiques des plasmas .....</b>	<b>8</b>
<b>a- Les plasmas naturels .....</b>	<b>8</b>
<b>b- Les plasmas artificiels ou industriels .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2.6.1- Température des espèces .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6.2- Densité des espèces .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6.3- Taux d'ionisation.....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.6.4- Longueur de Debye .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.5- Libre parcours moyen.....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.6- Le potentiel plasma et le potentiel flottant.....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.7. Classification des plasmas .....</b>	<b>10</b>
<b>a- Les plasmas chauds .....</b>	<b>11</b>
<b>b- Les plasmas froids .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3- Plasmas froids .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1. Les principales décharges à plasmas froids.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.2. Catégorie de décharge .....</b>	<b>13</b>
<b>a- Décharge luminescente.....</b>	<b>13</b>
<b>b- Décharge non luminescente .....</b>	<b>14</b>
<b>1.3.3. Applications industrielles des plasmas froids .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4. Décharges à barrière diélectrique (DBD) .....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.1. Généralités sur les décharges à barrière diélectrique.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.2. Historique des DBDs.....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.3. Configuration usuelle des DBDs .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.3.1. Principe de fonctionnement d'une Décharge à Barrière Diélectrique .....</b>	<b>18</b>

I.4.3.2. Géométries courantes des DBDs .....	18
I.4.3.3. Caractéristiques physiques et électriques d'un dispositif DBD .....	19
I.4.3.4. Types de décharges à barrière diélectriques.....	20
I.5. Conclusion .....	23
II.1. Introduction .....	24
II.2. Présentation du schéma synoptique .....	24
II.3. Principe de fonctionnement de chaque bloc .....	25
II.3.1. Circuit de commande .....	25
II.3.2. Alimentation de 12 Volts.....	26
II.3.3. Alimentation variable de 34 Volts.....	27
II.3.4. Etage de puissance .....	28
II.4. Bobine d'allumage HT .....	29
II.4.1. Principe de fonctionnement de la bobine d'allumage HT .....	29
II.5. Schéma électrique d'un générateur DBD .....	30
II.6. Réalisation des électrodes .....	31
II.7. Résultats et discussions .....	32
II.7.1. Mesure de la tension de sortie .....	32
II.7.2. Variation du courant plasma.....	33
II.7.3. Variation de la haute tension en fonction du rapport cyclique.....	34
II.8. Dispositif de mesure de l'angle de contact .....	35
II.9.conclusion.....	40
III.1. Introduction .....	41
III.2. L'oxyde de Zinc (ZnO).....	41
III.2.1. Définition .....	41
III.2.2. Applications de ZnO .....	41
a- Capteurs à gaz.....	41
b- Cellules solaires photovoltaïques.....	43
c- Piles au lithium.....	43
III.3. Traitement de la surface .....	44
III.3.1. Définition d'une surface .....	44
III.3.2. Pourquoi les traitements de surfaces des solides.....	45
III.3.3. Techniques de traitements de surfaces .....	45
a. Traitements chimiques .....	45

## Sommaire

---

b. Traitements mécaniques .....	45
c. Traitements thermiques.....	45
d. Traitements par rayonnements .....	46
e. Traitements par décharges électriques .....	46
III.4. Angle de contact avant traitement .....	46
III.4.1. Effet du temps de mesure .....	46
III.4.2. Effet du volume de la goutte .....	48
III.5. Angle de contact après traitement .....	50
III.6. Conclusion .....	51
Conclusion générale .....	52
Référence.....	53

### **LISTE DES FIGURES**

**Figure I-1 :** *Les différents états de la matière avec les principaux changements de phase.*

**Figure I.2 :** *Les quatre états de la matière.*

**Figure I.3 :** *Schéma de la différence entre gaz neutre et plasma*

**Figure I.4 :** *Décharge électrique dans un gaz.*

**Figure I.5 :** *Variation de la température électronique du gaz en fonction de la pression ( $T_e$  = température électronique,  $T_g$  = température du gaz).*

**Figure I.6 :** *Image d'une décharge lumineuse dans un tube de verre de 40 cm de long, 5 cm de diamètre.*

**Figure I.7 :** *Répartition des zones lumineuses dans un tube à décharge lumineuse*

**Figure I.8 :** *Tube à décharge de Werner Von Siemens.*

**Figure I.9 :** *Configuration classique d'une DBD .*

**Figure I.10 :** *Configurations géométriques typiques des dispositifs produisant des décharges à barrière diélectrique .*

**Figure I.11 :** *Caractéristique électrique d'une DBD à deux barrières diélectriques .*

**Figure I.12 :** *Décharge à Barrière Diélectrique à électrode flottante.*

**Figure I.13 :** *Diagramme indiquant le principe général des DBDs et leurs applications*

**Figure I.14 :** *(a) Réalisation d'une entaille sur tissu humain avec le scalpel micro-plasma.*

*(b) Vue transversale de l'entaille au microscope optique*

**Figure I.15 :** *Système de traitement dentaire à micro-plasma RF*

**Figure II.1 :** *Générateur haute tension.*

**Figure II.2 :** *Schéma synoptique d'un générateur haute tension.*

**Figure II.3 :** *Schéma du circuit de commande.*

**Figure II.4 :** *Schéma de l'alimentation 12 Volts DC*

**Figure II.5 :** *Image d'un transformateur de type EI48X21.5 (PT-6900-1).*

**Figure II.6 :** *Schéma de l'alimentation 34 Volts DC.*

**Figure II.7 :** *Schéma de l'étage de puissance.*

**Figure II.8 :** *Schéma d'un transistor en commutation.*

**Figure II.9 :** *Schéma interne d'une bobine d'allumage.*

**Figure II.10 :** *Schéma électrique de notre générateur haute tension.*

**Figure II.11 :** *Schéma de l'électrode.*

**Figure II.12:** *Schéma du dispositif de la mesure de la HT.*

## LISTE DES FIGURES

---

**Figure II.13 :** *Schéma du dispositif de la mesure du courant plasma.*

**Figure II.14 :** *Dispositif de mesure de l'angle de contact.*

**Figure II.15 :** *Schéma synoptique de dispositif de mesure de l'angle de contact.*

**Figure II.16 :** *Arduino mega 2560.*

**Figure II.17 :** *Images d'un moteur pas à pas de type NEMA 17.*

**Figure II.18 :** *Principe de commande en position d'un moteur à courant continu*

**Figure II.19 :** *Photo d'une seringue micropipette.*

**Figure II.20 :** *Image de digital microscope.*

**Figure II.21 :** *Digital microscope.*

**Figure II.22 :** *Exemple de mesure d'un angle de contact à base de logicielle MB-Ruler.*

**Figure III.1 :** *Schéma d'un capteur de gaz à base d'oxyde métallique.*

**Figure III.2 :** *Exemple d'une cellule solaire à base de ZnO .*

**Figure III.3 :** *Exemple d'une Piles au lithium .*

**Figure III.4:** *Image de l'angle de contact pour une surface de ZnO en fonction de temps :  
(a) 0 seconde et (b) 20 secondes.*

**Figure III.5 :** *Evolution de l'angle de contact d'une goutte d'eau déposée sur un film ZnO non traité en fonction du temps de mesure.*

**Figure III.6 :** *Image de l'angle de contact pour une surface de ZnO en fonction du volume :  
( a) 5  $\mu$ l et (b) 10  $\mu$ l.*

**Figure III.7 :** *Variation de l'angle de contact de l'eau en fonction du volume de la goutte d'eau distillé pour un film de ZnO non traité.*

**Figure III.8 :** *Variation de l'angle de contact de l'eau distillé sur la surface de film ZnO en fonction du temps de traitement.*

**LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau II.1 :** *Valeurs de fréquences possibles du circuit de commande*

**Tableau II.2 :** *Variation de la tension de sortie du générateur en fonction du rapport cyclique pour différentes fréquences*

**Tableau II.3 :** *Les caractéristiques de la carte Arduino Méga.*

**Tableau III.1 :** *Variation du travail d'adhésion de film ZnO non traité en fonction du temps de mesure.*

**Tableau III.2 :** *Variation du travail d'adhésion de film ZnO non traité en fonction du volume de la goutte d'eau.*

**Tableau III.3 :** *Variation du travail d'adhésion de film ZnO traité en fonction du temps de traitement*

# **Introduction**

### Introduction Générale

Le procédé chimique est le moyen le plus courant d'améliorer les caractéristiques de surface des tissus. Mais ces dernières années, différents procédés alternatifs respectueux de l'environnement sont essayés, cherchant à diminuer l'utilisation de produits chimiques. Entre ces processus, le traitement au plasma a été mis en évidence en tant que traitement à sec et technologie verte qui permet des modifications à l'échelle micro/nano des matériaux. Ainsi, la technologie plasma peut être considérée comme une technologie verte car elle réduit l'énergie et l'eau. En conséquence, les plasmas non thermiques sont de plus en plus utilisés pour améliorer les propriétés de surface des matériaux, telles que l'adhérence de surface et la capacité d'impression, sans augmenter sa température et, par conséquent, en maintenant inchangées les propriétés intrinsèques du matériau en vrac.

Dans ce cadre, nous avons conçu une décharge plasma à barrière diélectrique (DBD), également appelées décharges silencieuses. La caractéristique la plus importante des décharges à barrière diélectrique est que les conditions de plasma hors équilibre peuvent être fournies de manière beaucoup plus simple qu'avec d'autres alternatives telles que les décharges à basse pression [1-2]. Sa flexibilité en termes de configuration géométrique, de milieu de fonctionnement et de paramètres de fonctionnement est sans précédent. Les conditions optimisées dans les expériences de laboratoire peuvent facilement être étendues à de grandes installations industrielles. Des alimentations efficaces à faible coût sont disponibles jusqu'à de très grandes puissances.

Parmi les différents matériaux on s'intéresse dans cette mémoire à l'oxyde de zinc (ZnO). C'est un matériau semi-conducteur de type n le plus prometteur pour des applications technologiques comme les diodes laser, les cellules solaires et les capteurs de gaz [3,4].

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés surfaciques de l'angle de contact et le travail d'adhérence de film ZnO avant et après traitement par une décharge à barrière diélectrique (DBD).

Ce mémoire a été structuré en trois chapitres principaux.

Dans le premier chapitre, nous donnerons quelques généralités sur le plasma. Ensuite, on présentera les paramètres fondamentaux caractérisant un plasma, les différents types des plasmas et on mettra l'accent sur la Décharge à Barrière Diélectrique qui a été utilisé dans notre étude.

## Introduction Générale

---

Le chapitre deux a été consacré pour expliquer les différents blocs utilisés pour réaliser le générateur DBD. Après, on présente aussi les différents blocs du dispositif de mesure de l'angle de contact piloté par un PC.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations de l'évolution de l'angle de contact et le travail d'adhésion pour le film ZnO non traité et traité par la décharge à barrière diélectrique.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale sur les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les plasma**

## I.1- Introduction

Ces dernières années, la pénétration des procédés plasma dans les procédés industriels a augmenté extrêmement rapidement ; bien qu'elles ne soient pas encore identifiées comme un secteur industriel spécifique, les technologies plasma sont devenues indispensables aussi bien dans des domaines innovants comme les nouveaux matériaux, les nanotechnologies et la propulsion spatiale, que dans des domaines plus traditionnels comme la sidérurgie, l'éclairage ou la chimie.

Dans ce chapitre on commencera par une définition générale sur le plasma. Ensuite, on présentera les paramètres importants pour caractériser un plasma, leurs différents types. Parmi les différentes méthodes utilisées pour créer un plasma on s'intéresse dans ce travail particulièrement au Décharge à Barrière Diélectrique (DBD).

## I.2- Généralités sur les plasmas

Traditionnellement on classe l'état de la matière en trois états:

- L'état solide.
- L'état liquide.
- L'état gazeux.

A l'état solide, les atomes sont fermement emprisonnés dans un réseau rigide. Lorsque l'on monte en température, on passe à l'état liquide où les atomes peuvent glisser les uns sur les autres, ce qui permet au liquide d'épouser la forme d'un récipient. Si on chauffe encore, on arrive à l'état gazeux : les atomes se déplacent alors plus librement, indépendamment les uns des autres.

Enfin, quand on chauffe le gaz à de très hautes températures, sous l'effet de l'agitation ses molécules s'ionisent, peuvent se fragmenter pour donner un ensemble composé d'électrons, d'ions, d'espèces atomiques ou moléculaires neutres (se déplacent indépendamment), dans certains cas, une luminescence. On obtient ainsi un gaz partiellement ionisé et globalement neutre (voir la figure précédente). C'est ce qu'on appelle le plasma.

Ce quatrième état de la matière qui est le plasma et que l'on retrouve dans les étoiles et le milieu interstellaire, constitue notre univers à 99 %.

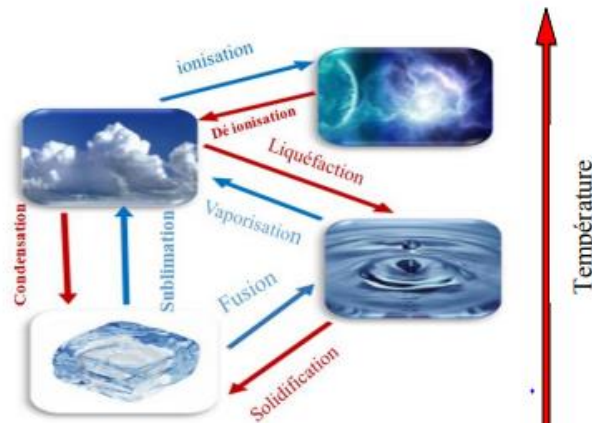


Figure I-1 : Les différents états de la matière avec les principaux changements de phase.

I.2.1- Définition d'un plasma

Le terme plasma a été introduit en 1928 par le physicien américain I. Langmuir pour désigner, dans les tubes à décharges, certaines régions équipotentielles contenant un gaz

Ionisé électriquement neutre [5]. Par la suite, les propriétés uniques des plasmas ont amené les scientifiques à nommer le plasma le quatrième état de la matière, faisant suite, dans l'échelle des températures, aux trois états classiques : solide, liquide et gaz (Figure I.2)

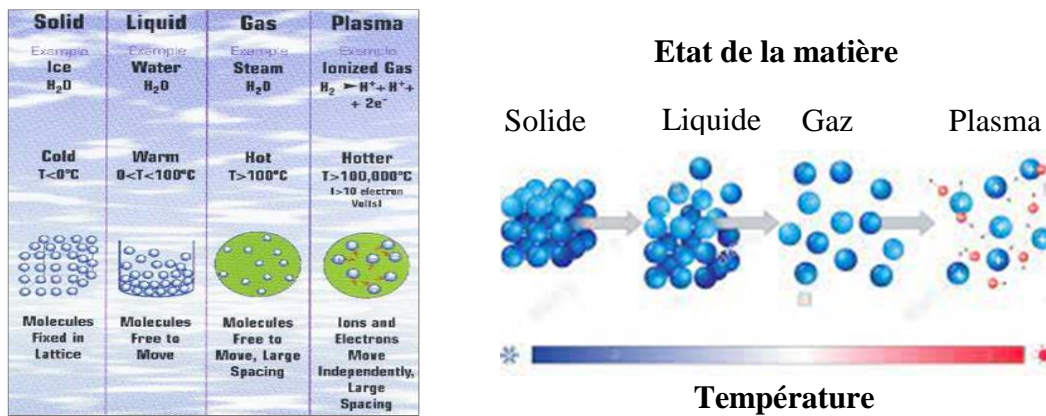
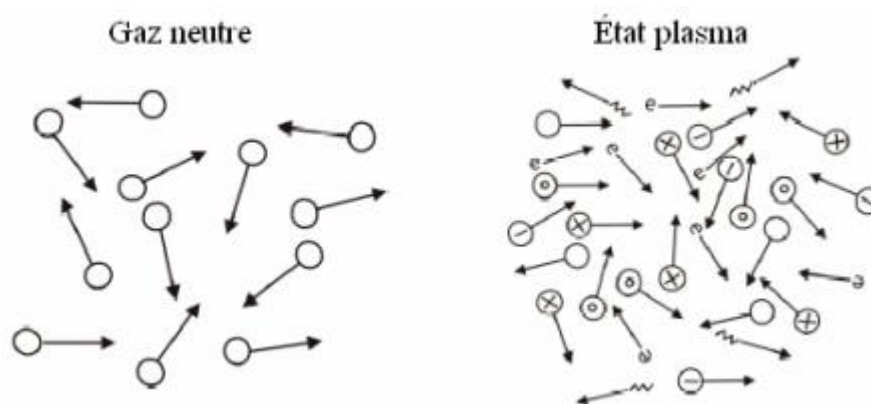


Figure I.2 : Les quatre états de la matière.

Un plasma est une collection d'électrons, de radicaux libres, d'ions des deux charges, de photons de diverses énergies allant de l'UV à l'infrarouge lointain, d'atomes libres et de

Molécules dans des états neutres et excités (Figure I.3). Chaque particule chargée dans un plasma interagit simultanément avec les autres grâce au long rayon d'action de la force électrique entre particules chargées (force coulombienne).

Ces interactions créent un comportement collectif qui n'existe pas dans les gaz neutres et procurent au plasma des propriétés uniques. Les plasmas artificiels créés en laboratoire sont généralement faiblement ionisés. Étant donné leur faible densité, leurs propriétés physiques (grande compressibilité, énergie interne et pression proportionnelle à la température absolue, écoulements, ondes acoustiques, etc.) sont analogues à celles des gaz neutres, tandis que leurs propriétés électromagnétiques (conductivité électrique, indice de réfraction, etc.) sont différentes dues à la présence d'électrons libres.



**Figure I.3 :** Schéma de la différence entre gaz neutre et plasma

En général, les plasmas artificiels sont allumés en appliquant un potentiel électrique à travers le gaz neutre [6]. Pour produire un plasma en laboratoire, l'ionisation des atomes ou molécules est requise. L'ionisation se produit lorsqu'un atome ou une molécule gagne assez d'énergie d'une source extérieure d'excitation ou via une collision avec une autre particule.

Un gaz contient toujours initialement quelques électrons et ions qui sont formés, par exemple, du résultat d'une collision avec un rayon cosmique ou une radiation radioactive avec le gaz.

Ces charges libres sont accélérées par le champ électrique et de nouvelles particules chargées peuvent ensuite être créés lorsqu'ils entrent en collision avec des atomes et des molécules dans le gaz ou avec les surfaces des électrodes. Cela mène à une avalanche de particules chargées qui sont éventuellement équilibrées par des pertes de charges, et un état plasma stationnaire se développe.

### I.2.3- Création du plasma

Dans une enceinte confinée, sous vide partiel ou à pression atmosphérique, dans laquelle on injecte un gaz, on peut générer un plasma en transférant de l'énergie à ce gaz par l'action d'une décharge électrique [7]. Une décharge électrique, est une conversion rapide de l'énergie électrique en énergie cinétique, puis en énergie d'excitation et d'ionisation des atomes et des molécules.

L'énergie électrique apportée au système est en partie convertie par les particules chargées ainsi formées (électrons, ions), en énergie cinétique. Du fait de leur faible masse, les électrons libres récupèrent en général l'essentiel de cette énergie et provoquent, par collision avec les particules lourdes du gaz, leur excitation ou dissociation et donc l'entretien de l'ionisation.

Une décharge plasma est souvent produite sous l'effet de l'application d'une haute tension entre deux électrodes distantes d'une distance  $d$ .

On parle de la création de décharge électrique dans le gaz compris entre ces deux électrodes (claquage du gaz) lorsqu'on arrive à créer un chemin électrique préférentiel entre ces deux électrodes. Ce chemin électrique est créé par l'ionisation des molécules du gaz se trouvant entre les électrodes (voir la figure I.4) [7].

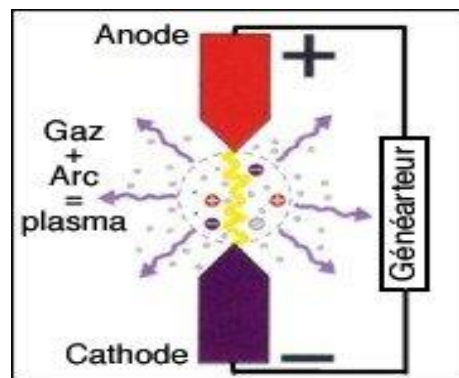
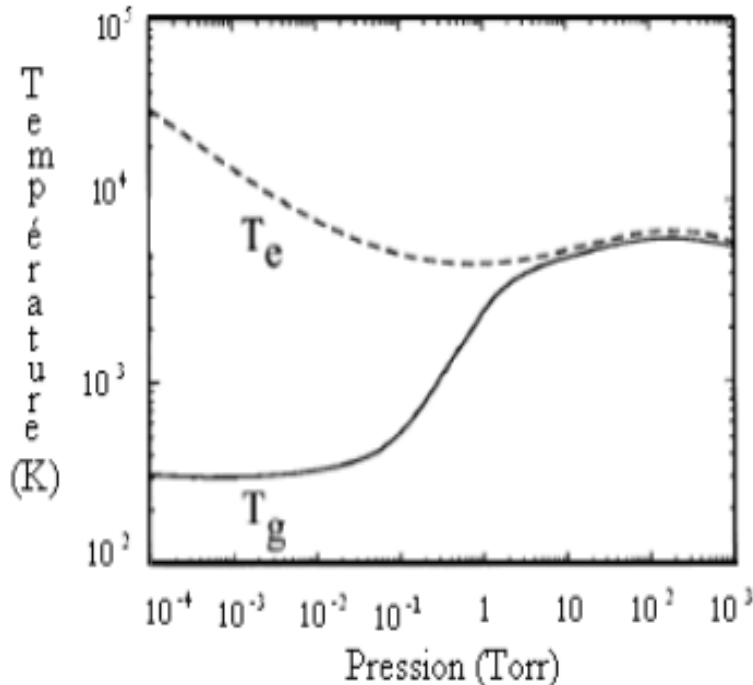


Figure I.4 : Décharge électrique dans un gaz.

### 1.2.4- Plasmas thermiques

Les plasmas thermiques sont caractérisés par une densité d'énergie élevée et une température égale pour toutes les espèces (ions, électrons, neutres). Les plasmas naturels comme les étoiles, les aurores boréales, les flammes, les éclairs, sont en équilibre

thermodynamique local ce qui n'est pas le cas pour la plupart des plasmas créés en laboratoire. On doit travailler à des pressions au-dessus de 10 Torr comme l'indique (voir la figure I.5).



**Figure I.5 :** Variation de la température électronique du gaz en fonction de la pression ( $T_e$  = température électronique,  $T_g$  = température du gaz).

Les plasmas thermiques sont générés par des torches à plasmas ou des arcs. Si le gaz est à haute pression (voisine ou supérieure à la pression atmosphérique), il est assez fortement ionisé, bien qu'il subsiste des atomes et des molécules neutres, les collisions entre toutes les particules qui le composent sont nombreuses, ce qui tend à homogénéiser la température à un Niveau de l'ordre de  $5 \cdot 10^3$  à  $5 \cdot 10^4$  degrés Kelvin.

Les plasmas thermiques dont la puissance varie de quelques kilowatts à quelques Mégawatts, nécessitent la mise en jeu de courants importants [8,9].

### 1.2.5- Plasmas hors équilibre

Les plasmas hors équilibre sont généralement produits par décharge luminescente, décharge filamentaire ou courant inductif (capacitif). Leur température électronique ( $10^3$  à  $10^4$  degrés Kelvin) est très supérieure à la température ambiante du gaz (inférieure ou égale à 500 degrés Kelvin).

Aucun équilibre thermique n'est réalisable et le milieu est faiblement ionisé ( $<10^{-4}$ ). La distance parcourue entre deux collisions est suffisamment importante pour que l'ionisation puisse se faire par collision directe. Dans ce type de plasma, la majeure partie de l'énergie n'est pas convertie en chauffage du gaz mais en réactivité chimique pour produire des espèces métastables, dissociées et ionisées. Les puissances typiquement mises en jeu pour obtenir un plasma hors équilibre vont de quelques watts à quelques kilowatts [8,9].

### I.2.6- Grandeurs caractéristiques des plasmas

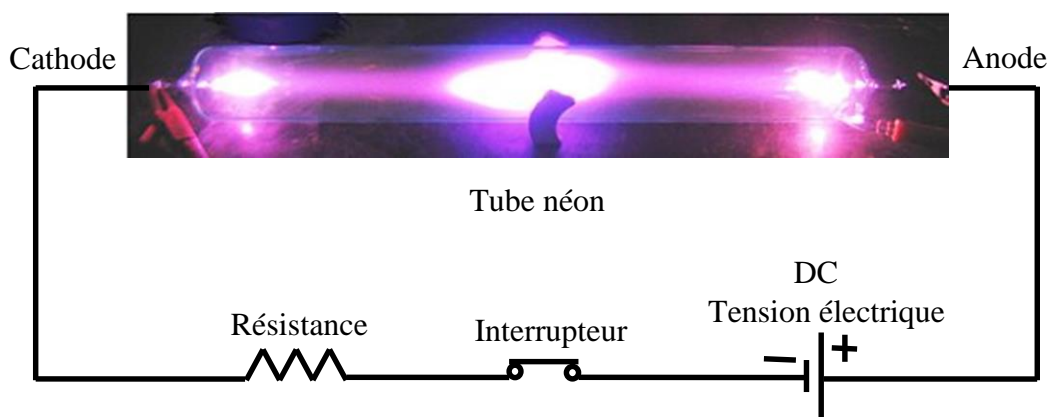
Les caractéristiques uniques du plasma sont devenues vitales pour un grand nombre d'applications de la vie quotidienne pour cela les plasmas peuvent être divisés en deux catégories [10] :

#### a- Les plasmas naturels

C'est très rare de trouver ce type de plasma sur la surface de la terre car ils sont représentés par les étoiles, les milieux interstellaires, l'ionosphère, les nébuleuses, les quasars, les pulsars, les queues de comètes, les vents solaires et également les phénomènes météorologiques tels que les éclairs et les aurores boréales qui correspondent à des émissions lumineuses de plasmas.

#### b- Les plasmas artificiels ou industriels

Ils sont aujourd'hui présents dans différent domaine d'applications. Ce type de plasma est produit artificiellement dans les laboratoires par l'application d'un champ électrique à un gaz neutre sous certaines pressions. L'application de ces plasmas a envahie divers domaines tels que : l'éclairage (lampes à Néons, voir la figure I.6), les écrans à plasma, l'industrie des matériaux (élaboration de couches minces, traitement de tout type de surface et gravure) ainsi que le médical (stérilisateurs à lampes UV, ionisateurs, ...).



**Figure I.6 :** Image d'une décharge lumineuse dans un tube de verre de 40 cm de long, 5 cm de diamètre.

Les différents plasmas sont définis par certains nombre de paramètres, parmi lesquels nous rappelons [11]:

### I.2.6.1- Température des espèces

Un plasma contient des espèces ionisées et des électrons libres. La masse de ces derniers étant beaucoup plus faible que celle des ions, ils sont par conséquent plus accélérés sous l'effet de l'application d'un champ électrique et sont donc plus réactifs.

Il est donc plus facile de donner de l'énergie aux électrons qu'aux espèces plus lourdes (les ions). On peut alors différencier les plasmas comme suit :

- seuls les électrons ont acquis assez d'énergie pour effectuer des réactions chimiques. Ce sont les « plasmas froids » également appelés « plasmas hors équilibre thermodynamique».
- les ions également énergétiques, influencent le comportement du plasma. Ce sont les « plasmas chauds ».

En physique des plasmas, on mesure l'énergie cinétique des électrons ou des ions en fonction de leur température ( $E \approx K_B T$ , où  $k_B$  est la constante de Boltzmann). Cette dénomination fait référence à l'énergie des ions.

- Dans le cas des « plasmas froids », la température (l'énergie) des électrons est très supérieure à celle des ions  $T_i \ll T_e$ . Les ions sont considérés comme « froids » donc non réactifs.
- Dans les plasmas chauds, les ions sont « chauds » donc réactifs.

### I.2.6.2- Densité des espèces

La densité est le nombre d'espèces libres par unité de volume, on a :

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

### I.2.6.3- Taux d'ionisation

Appelé aussi degré d'ionisation, le taux d'ionisation est défini comme étant le rapport entre la densité électronique et la densité des espèces présentes dans le plasma :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_n} \dots\dots\dots (I.1)$$

- $n_e$  : densité électronique ;
- $n_n$  : densité des neutres ;
- $\alpha$  : degré d'ionisation.

✚ Si  $\alpha < 10^{-4}$  le plasma est dit faiblement ionisé.

✚ Si  $\alpha > 10^{-4}$  le plasma est dit fortement ionisé.

#### I.2.6.4- Longueur de Debye

La longueur de Debye est définie comme étant la longueur pour laquelle il n'y a plus d'interaction entre particules. C'est l'échelle de longueur au-dessus de laquelle il peut y avoir une séparation de charge et au-dessus de laquelle le plasma retrouve sa neutralité.

L'expression de la longueur de Debye s'écrit :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e q_e^2}} \dots\dots\dots (I.2)$$

- $\epsilon_0$  : permittivité du vide ;
- $k_B$  : constante de Boltzmann ;
- $T_e$  : température des électrons ;
- $n_e$  : densité des d'électrons ;
- $q_e$  : charge de l'électron ;
- $\lambda_D$  : longueur de Debye.

#### I.2.6.5- Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen d'une particule est la distance moyenne parcourue par cette même particule entre deux successives. Il dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collisions.

#### I.2.6.6- Le potentiel plasma et le potentiel flottant

Le plasma est caractérisé par un potentiel constant appelé potentiel plasma  $V_p$  qui est positif par rapport aux parois.

Le potentiel flottant  $V_f$  est le potentiel pris par toute électrode isolée ou tout diélectrique en contact avec le plasma [11].

#### I.2.7. Classification des plasmas

On peut classer les plasmas en deux grande catégories : les plasmas chaude et plasma froide .Ces deux catégories sont reliés :

### a- Les plasmas chauds

Ce sont les plus répandus dans la nature. On les trouve dans le soleil, les étoiles, les flammes, les éclairs de foudre. Ils sont également appelés plasmas fortement ionisés ou plasmas thermiques.

Ce genre de plasmas est caractérisé par [11] :

➤ Une pression relativement élevée et donc des collisions entre particules plus fréquentes et une transmission aisée de l'énergie, ce qui induit une forte ionisation des particules les constituants ;

➤ Les particules ont presque la même énergie élevée amenant à un équilibre thermodynamique ;

L'interaction entre particules joue le rôle le plus fondamental

### b- Les plasmas froids

A la différence des plasmas thermiques à haute température, les plasmas froids sont à basse température.

Un plasma froid est un gaz partiellement ionisé, à l'état de non équilibre thermodynamique, dont seuls les électrons sont portés à haute température, les autres particules (ions, radicaux, fragments de molécules, neutres stables) restant à température ambiante. Ces derniers sont généralement créés sous l'effet de l'application d'un signal électrique ou d'une radiation lumineuse.

Les plasmas froids, appelés également plasmas faiblement ionisés ou plasmas non thermiques, sont caractérisés par [11] :

➤ Interactions entre particules chargées négligeables. Ce sont les collisions neutres-électrons (sans transfert d'énergie notable à part une déviation de la trajectoire) et/ou neutres-ions qui déterminent la dynamique des particules chargées ;

➤ Un libre parcours moyen élevé

➤ Plasmas hors équilibre thermodynamique

Dans cette étude on s'intéresse à ce type de plasma.

## I.3- Plasmas froids

### I.3.1. Les principales décharges à plasmas froids

Dans le domaine des plasmas froids ils existent de nombreuses sources de plasma qui diffèrent par la pression du travail (basse ou haute pression), par la méthode d'application du champ électrique, soit statique (tensions DC) ou dynamique (champ AC ou RF) et par la

fréquence d'excitation qui va du continu jusqu'au domaine des microondes. Dans la liste qui suit, nous citons les différents types de plasmas les plus utilisés [12 ,13] :

- La décharge DC à courant continu (continu ou 50 Hz).
- La décharge corona ou décharge couronne.
- La décharge à barrière diélectrique ou DBD.
- Les torches à plasma.
- Les jets plasmas.
- La décharge RF à couplage capacitif (13.56 MHz).
- La décharge RF à couplage inductif (13.56 MHz).
- La source hélicon (13.56 MHz).
- La décharge ECR à résonance cyclotronique électronique (2.45 GHz).
- La décharge micro-ondes à cavité résonante (2.45 GHz).
- La décharge micro-ondes à onde de surface (2.45 GHz).

➤ **La décharge continue (décharge DC)**

Comme son nom l'indique, ce type de décharge est créé à l'aide d'un générateur de tension continu. Les espèces chargées suivent le champ électrique inter électrode selon leurs polarités. C'est un système adéquat pour traiter un substrat conducteur, mais délicat lorsque celui-ci est isolant.

➤ **La décharge basse fréquence (BF)**

La décharge basse fréquence (BF), aussi appelée audiofréquence, correspond au cas où :  $f < fp_i < fp_e$  ce qui délimite un domaine de fréquence variant de quelques centaines de Hz à quelques centaines de kHz. Dans ce cas, les ions suivent le signal et pourront en général traverser les gaines résistives.

➤ **La décharge radiofréquence (RF)**

La décharge RF (haute fréquence HF), correspond au cas où  $fp_i < f < fp_e$ , ce qui définit un domaine de fréquences supérieures à 1 MHz. La fréquence la plus utilisée, notamment dans l'industrie, est 13.56 MHz. A de telles fréquences, les ions ne peuvent pas suivre le champ électrique appliqué contrairement aux électrons qui oscillent à la fréquence d'excitation.

➤ **La décharge micro-onde (MW)**

Ce type de décharge correspond à une fréquence d'excitation allant de quelques centaines de MHz à quelques GHz. Son comportement est équivalent à celui des décharges

continues. Les ions sont soumis au champ moyen et ne répondent pratiquement pas aux variations instantanées du champ. Les décharges micro-ondes permettent, en général, d'obtenir des plasmas de densité plus élevée que dans les décharges BF ou RF ( $n_e \cong 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ). Il existe différents systèmes de production de plasmas micro-ondes. Parmi ceux-ci, le système à résonance cyclotronique électronique répartie (RCER). Le plasma se produit en présence d'un champ magnétique statique  $B$  superposé au champ électrique de l'onde incidente.

### 1.3.2. Catégorie de décharge

Lorsqu'une tension suffisante est appliquée aux bornes de deux électrodes planes et parallèles d'un tube cylindrique renfermant un gaz à basse pression (quelques centaines de Pascals en général), il y aura naissance à un courant électrique et donc une décharge électrique. Suivant la tension appliquée et la nature du gaz, on classe la décharge électrique en deux catégories :

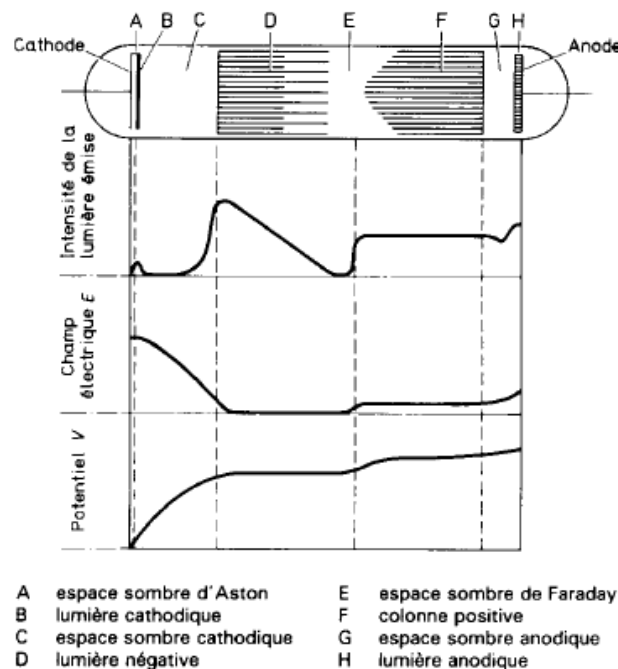
#### a- Décharge lumineuse

La neutralisation des ions et l'excitation des atomes génèrent une lumière. La figure I-4 représente les différentes zones d'émission (zone cathodique, zone de lumière négative, zone anodique,....) répertoriées entre les électrodes d'un tube à une décharge amorcée, ainsi que leurs appellations communément employées. On a fait figurer, de plus, la répartition spatiale de l'intensité lumineuse, du potentiel et du champ électrique. Comme on peut l'observer, le potentiel varie très fortement au voisinage de la cathode ; par voie de conséquence, le champ électrique qui lui est associé prend des valeurs extrêmement élevées dans cette zone. Dans le cas de cette décharge, il existe deux zones :

- ✓ **L'espace sombre cathodique** : est la zone dans laquelle les électrons présents sont accélérés en direction de l'anode et acquièrent une énergie suffisante pour qu'ils deviennent capables, à la suite de chocs, d'ioniser des atomes du gaz. De même, les ions positifs formés à l'issue de tels chocs sont accélérés vers la cathode où ils sont à l'origine de deux effets. Le premier consiste, compte tenu de l'énergie acquise par ces particules sous le fort champ électrique qui règne dans cette zone, à provoquer la pulvérisation ionique de la cathode, ce qui a pour conséquence l'éjection d'atomes ou d'agrégats (clusters) de celle-ci. L'acuité de ce phénomène se traduit par la vitesse d'érosion de la cible ; elle est d'autant plus importante que la tension et l'intensité du courant qui circule dans la décharge sont élevées. Le second est l'émission d'électrons secondaires par la cathode sous impact ionique. Ce sont ces derniers qui vont à leur tour être accélérés dans la gaine cathodique et induire par collisions

(en nombre d'autant plus important que la pression soit élevée) la formation de nouveaux ions, eux-mêmes accélérés vers la cathode et ainsi de suite. La décharge atteint rapidement un équilibre qui correspond au fait que le nombre de particules chargées créées par unité de temps est égal au nombre de celles qui disparaissent dans le circuit électrique ou se neutralisent dans le plasma. Dans un tel processus, le taux d'ionisation moyen des particules du gaz plasmagène est faible et reste inférieur au pour-cent.

- ✓ **La lumière négative** : est la zone au sein de laquelle les collisions ou interactions entre particules se traduisent par l'excitation des atomes ou des ions qui émettent un photon caractéristique en retombant à leur niveau fondamental.



**Figure I.7** : Répartition des zones lumineuses dans un tube à décharge lumineuse [14].

### b- Décharge non luminescente

Cette décharge est non autonome, donc elle ne peut être réalisée qu'en présence d'un agent d'ionisation. Elle est sombre, et caractérise par une densité ionique très faible.

### 1.3.3. Applications industrielles des plasmas froids

La technologie plasma connaît à l'heure actuelle un grand progrès. Cette technologie est basée sur la dissociation des gaz, à température ambiante, par des électrons énergétiques pour produire des espèces (radicaux) chimiques actives qui sont très réactives à la fois dans le gaz et avec les surfaces exposées au gaz. Les plasmas froids sont impliqués dans des applications industrielles qui n'ont cessé de se multiplier et de se diversifier, touchant notamment la micro

optoélectronique, la métallurgie, la sidérurgie, l'automobile, l'aéronautique, l'emballage, l'industrie textile. Les procédés plasmas sont également promis à jouer un rôle dans le domaine médical, que ce soit pour le dépôt de couches biocompatibles (pour les prothèses notamment) ou pour la stérilisation du matériel médical (tels que les endoscopes). Ils apparaissent également comme des candidats prometteurs pour la dépollution d'effluents gazeux (traitement des fumées d'usine, gaz d'échappement des automobiles) et le traitement de surface.

## **I.4. Décharges à barrière diélectrique (DBD)**

### **I.4.1. Généralités sur les décharges à barrière diélectrique**

Le terme décharge contrôlée par barrière diélectrique (DBD) regroupe les configurations de décharges pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche de diélectrique (voir la figure II-4). Pour transporter un courant autre que celui de déplacement (courant passant dans la capacité) dans l'espace de décharge, le champ électrique doit d'être assez intense pour provoquer le claquage du gaz. Pour des valeurs élevées de pression (et de distance inter électrodes), l'augmentation du courant entre deux électrodes métalliques entraîne généralement le passage vers un régime d'arc, synonyme de plasma à haute température et de dommages à la surface. Le rôle du diélectrique est de constituer d'une certaine façon une capacité en série avec l'espace de gaz. Et donc sa charge limitera la tension appliquée au gaz, ce qui permet d'éviter la transition vers un arc. L'accumulation de charges issues du plasma sur le diélectrique solide entraîne une chute du potentiel et du champ appliqués sur le gaz, conduisant à l'extinction de la décharge.

Il agit donc comme un ballast qui, dans le cas idéal, ne consomme aucune énergie. Le diélectrique étant un isolant, sa constante diélectrique et son épaisseur, en combinaison avec la dérivée dans le temps de la tension appliquée, détermine le courant de déplacement qui peut passer à travers le diélectrique. Il ne laisse pas passer le courant continu (DC) et les décharges DBD sont nécessairement pulsées et requièrent donc l'utilisation de tension alternative pour fonctionner [15].

Les matériaux couramment utilisés comme barrière diélectrique sont le verre, le quartz, l'alumine, des couches de polymères et certaines céramiques particulières. Puisque à haute fréquence, la limitation du courant par la barrière diélectrique devient de moins en moins efficace, la DBD est normalement utilisée entre des fréquences de 50 Hz à 10 MHz.

### I.4.2. Historique des DBDs

L'histoire des DBDs démarra en 1839 lorsque Schönbein identifia l'odeur apparaissant autour de l'anode pendant l'électrolyse de l'eau, comme l'attribut d'un nouveau composé chimique qu'il a dénommé ozone [16]. Il a fallu attendre jusqu'en 1857 pour arriver aux premières expérimentations connues sur les décharges à barrière diélectrique ou décharges à barrière (souvent référencées sous l'appellation de décharges silencieuses) réalisées par Von Siemens ; celui-ci breveta l'ozoneur dispositif dont la conception n'a pas fondamentalement évolué depuis.

Les applications principales étaient la production d'ozone ou d'oxyde d'azote. Le système conçu par cet ingénieur allemand était constitué de deux tubes concentriques entre lesquels était injecté un flux d'oxygène. Une électrode tapissait l'intérieur du tube interne alors qu'une autre couvrait l'extérieur du tube externe et l'ensemble était soumis à une forte différence de potentiel via une batterie et une bobine.

La propriété remarquable des décharges alors produites dans l'espace délimité par les deux tubes, appelées décharges silencieuses ("silent discharges"), était de produire une importante quantité d'ozone, alors qu'une décharge d'arc aurait nui à la création de cette molécule instable. En 1932, Buss décrit le caractère filamentaire de cette décharge dans l'air à travers les premiers clichés photographiques et mesures à l'oscilloscope réalisés sur les DBD.

Dans les années soixante dix, les premières simulations et recherches sur les DBDs permettent d'élargir le champ d'application de ces décharges aux traitements de surface, aux dépôts de couche, et plus tard aux lasers, aux écrans plats, aux traitements d'effluents gazeux...

Il faut attendre 1988 pour découvrir l'existence d'un régime de DBD homogène à la pression atmosphérique grâce aux recherches des Japonais [17]. Depuis, de nombreuses recherches ont été menées afin de comprendre les phénomènes physiques régissant les DBDs [18].

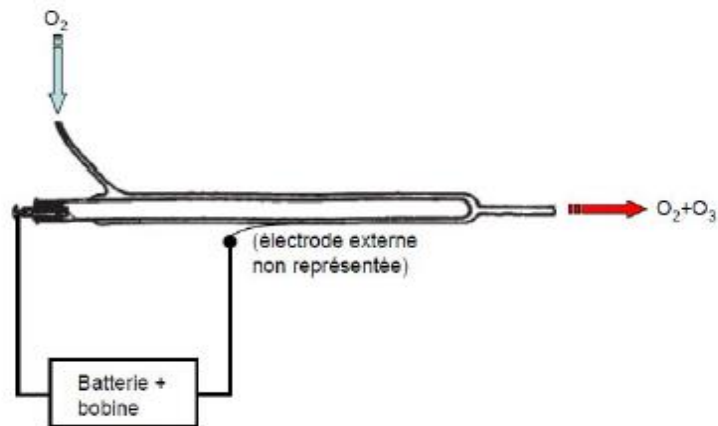


Figure I.8 : Tube à décharge de Werner Von Siemens [18].

### I.4.3. Configuration usuelle des DBDs

Par définition, 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. L'introduction du diélectrique a pour but de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge afin d'éviter le passage au régime d'arc. Sur un plan secondaire, ce diélectrique permet également d'éviter tout contact direct entre les électrodes et le gaz, ce qui évite que ce dernier soit pollué par des impuretés. La figure I.9 illustre une configuration d'une décharge DBD [10].

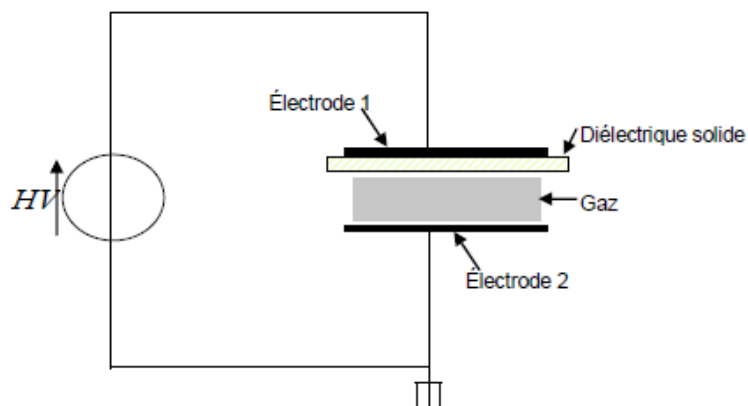


Figure I.9 : Configuration classique d'une DBD [11].

### I.4.3.1. Principe de fonctionnement d'une Décharge à Barrière Diélectrique

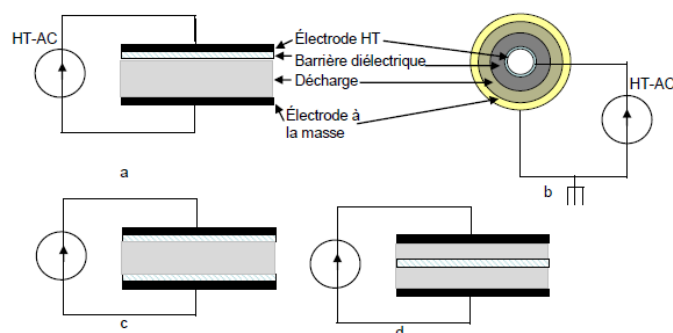
Le principe de fonctionnement d'une DBD est décrit dans le paragraphe suivant. Suite à l'application d'une tension, sur les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur (la localisation de ce canal peut résulter de la présence d'une impureté ou d'une irrégularité à la surface d'une électrode). Le passage du courant induit une accumulation locale de charges sur la surface du diélectrique solide et donc le développement, localisé au voisinage du point de claquage de gaz, d'une tension aux bornes du diélectrique : le diélectrique agit alors comme l'isolant d'un condensateur dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre l'électrode. Si l'augmentation de cette tension aux bornes du diélectrique au fur et à mesure du développement de la décharge est plus rapide que l'augmentation de la tension d'alimentation, elle cause une chute de la tension localement appliquée sur le gaz, ce qui conduit à l'extinction de la décharge.

Ainsi, quelle que soit la taille et la distribution spatiale des décharges, elles sont bloquées bien avant d'atteindre un degré d'ionisation suffisant pour échauffer la cathode et conduire à l'arc. C'est donc une façon simple et sûre de réaliser des plasmas hors équilibre à la pression atmosphérique [10].

### I.4.3.2. Géométries courantes des DBDs

Des configurations typiques cylindriques ou planaires des électrodes des décharges à barrière diélectrique sont montrées sur la figure ci-dessous :

Les DBDs sont caractérisées par la présence d'une ou plusieurs couches de diélectrique dans le chemin du courant entre les électrodes métalliques, en plus du gap de décharge. Comme le montre la figure I.10, deux types de configurations sont présentés : la configuration plane (avec un ou deux diélectriques avec des positions différentes) et la configuration cylindrique [19].



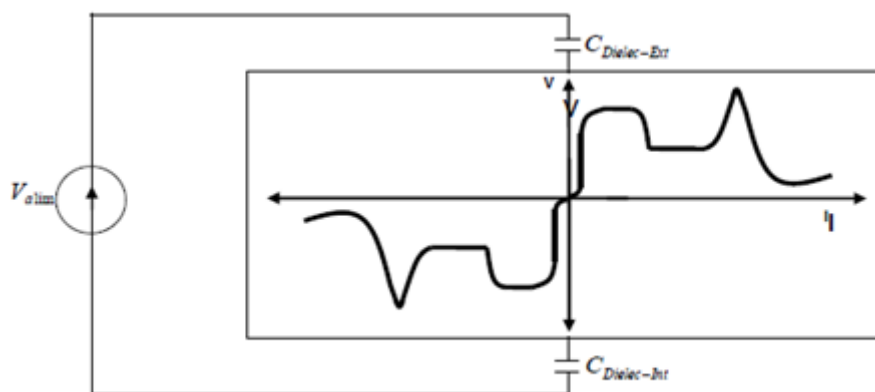
**Figure I.10 :** Configurations géométriques typiques des dispositifs produisant des décharges à barrière diélectrique [19].

### I.4.3.3. Caractéristiques physiques et électriques d'un dispositif DBD

Schématiquement, la lampe DBD peut être représentée comme l'indique la figure I.11. En effet, le chemin que parcourt le courant peut être suivi à travers les différents matériaux physiques. Ce courant imposé par l'alimentation passe par la capacité externe  $C_{Dielec-Ext}$ , représentant la barrière diélectrique externe. Puis, il traverse le gaz, pour sortir à travers la capacité interne  $C_{Dielec-Int}$ , de l'autre barrière diélectrique.

Tant que la tension aux bornes du gaz est inférieure à la tension de claquage, le comportement de l'espace inter-électrode est essentiellement capacitif.

Il faut noter cette description générale s'applique à toutes les configurations des DBDs (coaxiale ou planaire). Nous avons représenté la caractéristique courant-tension du gaz de forme bidirectionnelle, afin de prendre en compte les deux polarités possibles du courant fourni par l'alimentation [20].



**Figure I.11 :** Caractéristique électrique d'une DBD à deux barrières diélectriques [20].

Si nous négligeons les éléments résistifs des câbles et des électrodes, les caractéristiques physiques importantes qui fixent les valeurs électriques sont :

- ❖ La surface de chaque barrière ;
- ❖ L'épaisseur de chaque barrière ;
- ❖ Le constant diélectrique de chaque barrière, afin de déterminer les capacités ;
- ❖ Le type et la pression du gaz confiné ;
- ❖ La distance entre les deux barrières, pour déterminer la tension de claquage et la

caractéristique électrique du gaz [20].

#### I.4.3.4. Types de décharges à barrière diélectriques

Il existe trois types de décharges à barrière diélectriques :

##### I.4.3.4.1. La décharge filamentaire

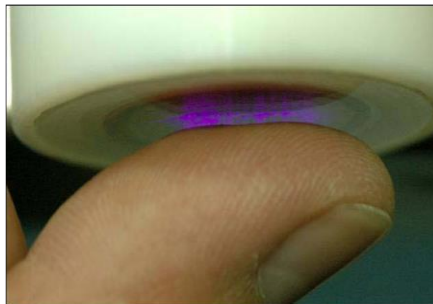
Le claquage du gaz se fait par la création de filaments de diamètre de quelques dizaines de microns et de durée de vie très courte (quelques dizaines de nanosecondes) entre les deux électrodes espacées de quelques mm.

##### a- La décharge homogène

L'obtention d'une décharge homogène n'est possible que sous certaines conditions dépendant de la nature du gaz, de la configuration des électrodes, de la durée de décharge et de la tension appliquée.

##### b- Décharge plasma à barrière diélectrique à électrode flottante

La décharge plasma à barrière diélectrique à électrode flottante a le même principe qu'une Décharge plasma à Barrière Diélectrique. Ce pendant dans ce type de décharge l'électrode reliée à la haute tension n'est pas fixe, elle reste flottante et parfaitement isolée. Elle est manipulée par l'utilisateur alors que l'électrode de masse reste non nécessaire pour créer la décharge (voir la figure I.12).



**Figure I.12 :** *Décharge à Barrière Diélectrique à électrode flottante.*

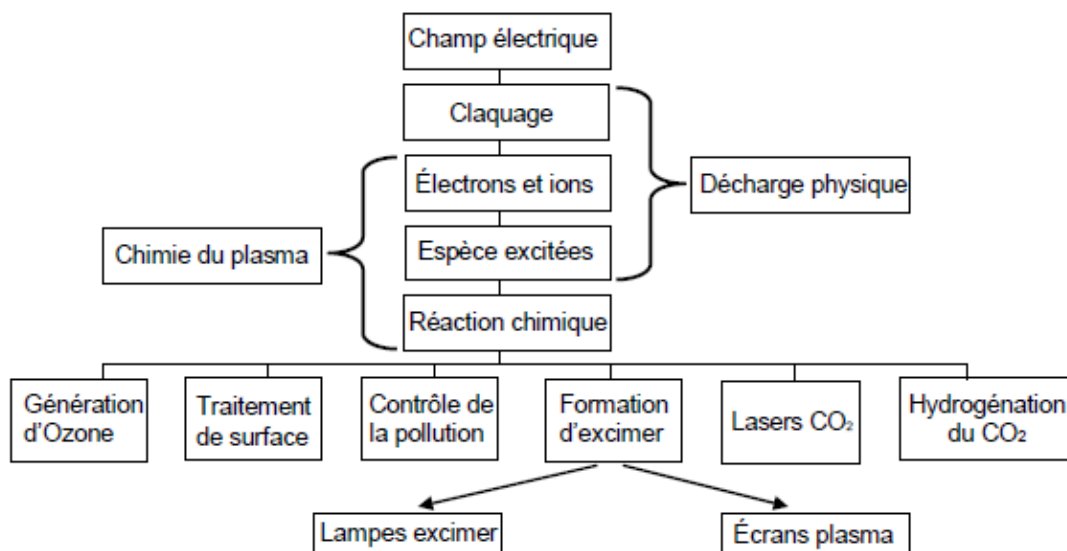
Ce type de décharges plasmas commence à être étudié uniquement depuis les années 2000 et beaucoup de recherches sont actuellement développées pour leur application en traitement thérapeutique tels que :

- ❖ La destruction des cellules cancéreuses d'un Mélanome ;
- ❖ La coagulation ;
- ❖ La stérilisation de la peau ;
- ❖ Le traitement des angiomes cutanés.

### I.4.3.5. Applications des décharges à barrière diélectrique

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 issues 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 suivante résume le principe général des DBDs et énumère leurs applications majeures [16]. Certaines d'entre elles sont détaillées dans les paragraphes suivants.

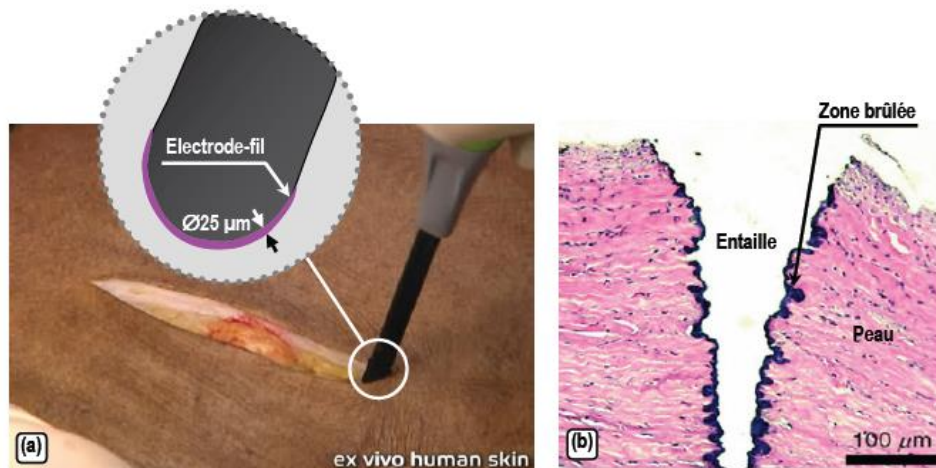


**Figure I.13 :** Diagramme indiquant le principe général des DBDs et leurs applications [21].

#### a- Electrochirurgie

La PME californienne PEAK Surgical, spécialisée dans la fabrication et la distribution de matériel chirurgical, a mis au point un scalpel dont la lame tranchante est remplacée par un fil métallique de diamètre 25  $\mu\text{m}$ . La photo de la figure I.14-a, montre une entaille pratiquée à l'aide de ce scalpel sur un tissu humain ex vivo. Ce fil, alimenté par une tension RF (0.1-4 MHz), forme une électrode qui, au contact du tissu, génère un micro-plasma [22]. Le micro-plasma agit en plusieurs étapes :

- Le chauffage local à une centaine de degrés Celsius, la vaporisation puis l'ionisation de l'eau contenue dans la zone tissulaire en contact avec la lame-électrode ;
- La vaporisation puis la scission du tissu.



**Figure I.14 :** (a) Réalisation d'une entaille sur tissu humain avec le scalpel micro-plasma.  
(b) Vue transversale de l'entaille au microscope optique [22].

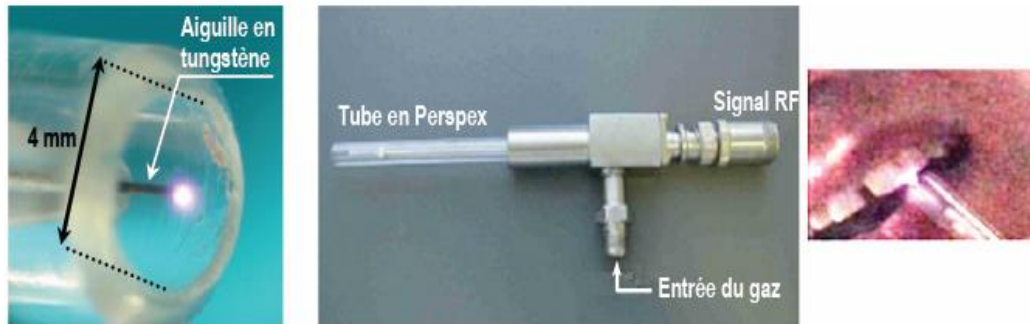
La profondeur de pénétration dans le tissu est déterminée par la géométrie du champ électrique appliqué, qui dépend lui-même de la taille et de la forme de l'électrode. Ce scalpel permet ainsi de réaliser des entailles plus fines et plus profondes que celles obtenues avec un scalpel classique. De plus, comme l'indique clairement la photo de la figure II-14-b, sur une épaisseur inférieure à  $25 \mu\text{m}$  (zone en noir). Quant au rayon d'action de la zone de diffusion thermique, il est déterminé par la durée des impulsions.

### b- Soins dentaires

Une carie endommage la structure de la dent en atteignant d'abord l'émail. Si des soins ne sont pas rapidement apportés, une cavité se creuse, atteignant successivement la dentine, la pulpe dentaire, le nerf et le desmodonte (tissu entourant la racine de la dent). Pour soigner la carie, il faut obturer la cavité en déposant un amalgame dentaire, mais il faut au préalable nettoyer et stériliser les tissus que la carie a infectés. Cette étape s'effectue normalement par des techniques mécaniques ou au laser, ce qui a pour principal inconvénient de créer un fort chauffage local au point d'entraîner une destruction substantielle des tissus non infectés [23]. L'utilisation d'une aiguille micro-plasma, développée par ces auteurs, présente trois avantages par rapport à ces techniques classiques :

- Le plasma (mélange air-He) génère de nombreux radicaux, qui jouent un rôle de décontamination bactériologique ;
- Son fonctionnement génère un micro-plasma à température ambiante, (avec un maximum de  $26^\circ\text{C}$  au bout de 100 s), ce qui n'endommage pas les tissus sains.

➤ Contrairement au laser, le plasma peut accéder aux cavités très petites et irrégulières. Ce système de traitement dentaire se présente sous la forme d'un appareil portable [19], constitué d'une aiguille en tungstène de 0.3 mm de diamètre, placée le long de l'axe central d'un tube en Perspex, de diamètre intérieur 4 mm (voir la figure I.15). Le plasma est généré dans un mélange airhélium, l'hélium permettant ici d'allumer le plasma à plus faible tension. Une tension RF de 13,56 MHz est appliquée à l'aiguille.



**Figure I.15 :** *Système de traitement dentaire à micro-plasma RF [23].*

### c - Cultures cellulaires et bactériologie

En plus de son usage dans le domaine dentaire, l'aiguille plasma de Stoffels et al. peut être utilisée en biologie pour séparer un agrégat de cellules du reste d'une culture cellulaire, sans endommager les cellules au contact du micro-plasma [24].

Les micro-plasmas sont aussi pressentis pour avoir un rôle important à jouer en bactériologie, notamment pour stériliser des bio-films. La stérilisation correspond au temps nécessaire pour qu'il ne reste plus qu'1 ppm de bactéries survivantes après traitement. Les bio-films sont des réseaux complexes de bactéries se structurant sur des surfaces.

## I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les plasmas, la méthode de création d'un plasma a été également décrit. Des notions générales sur les paramètres fondamentaux caractérisant un plasma. Ainsi que la configuration de la décharge à barrière diélectrique (DBD) et quelques applications ce type de générateur.

## Chapitre II

Dispositifs expérimentales :  
générateur DBD et angle de  
contact

## II.1. Introduction

Pour créer un plasma en vue de l'utiliser pour la décharge, nous avons besoin d'un générateur de haute tension (quelques kV). Parmi les différents types des générateurs de haute tension on s'intéresse dans ce chapitre au générateur Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) qui est l'objectif de notre étude. Pour cela, nous présentons dans cette partie du mémoire aussi les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser notre générateur DBD. Ainsi que le dispositif de mesure l'angle de contact statique à base d'un arduino piloté par un ordinateur.

## II.2. Présentation du schéma synoptique

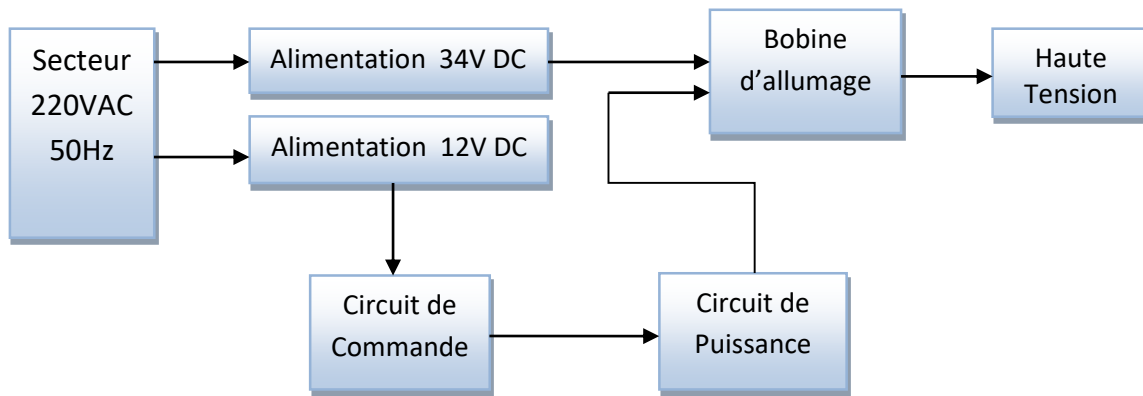
Pour la réalisation de notre générateur DBD (voir la figure II.1), nous avons utilisé une technologie déjà présente dans l'industrie automobile, à savoir l'allumage des bougies d'une voiture à essence pour générer la haute tension.



**Figure II.1 :** Générateur haute tension.

La figure II.2 présente le schéma synoptique de notre générateur. Il est composé de :

- Un générateur d'impulsion (circuit de commande) associé à un circuit de mise en forme du signal de commande.
- Une alimentation DC 12Volts pour alimenter le circuit de commande.
- Une alimentation DC 34Volts variable pour alimenter le primaire de la bobine d'allumage HT.
- Un étage de puissance à base d'un transistor de puissance fonctionnant en commutation.
- Une bobine d'allumage HT d'un véhicule automobile.



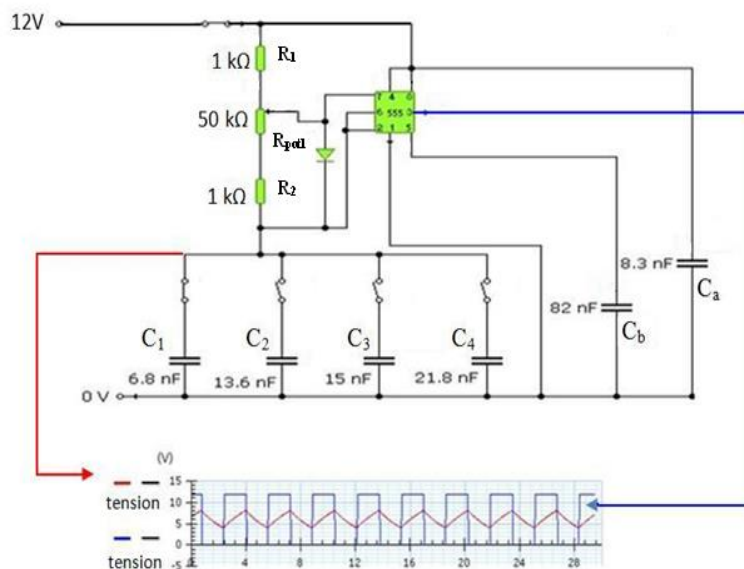
**Figure II.2 :** Schéma synoptique d'un générateur haute tension.

## II.3. Principe de fonctionnement de chaque bloc

### II.3.1. Circuit de commande

Pour la commande de l'étage de puissance, nous avons besoin d'un signal rectangulaire périodique. Pour répondre à ce besoin, nous avons utilisé le circuit intégré NE 555 monté en mode astable. Deux résistances, un potentiomètre et des condensateurs permettent de modifier la fréquence d'oscillation ainsi que le rapport cyclique, c'est à dire de générer des impulsions de forme rectangulaire.

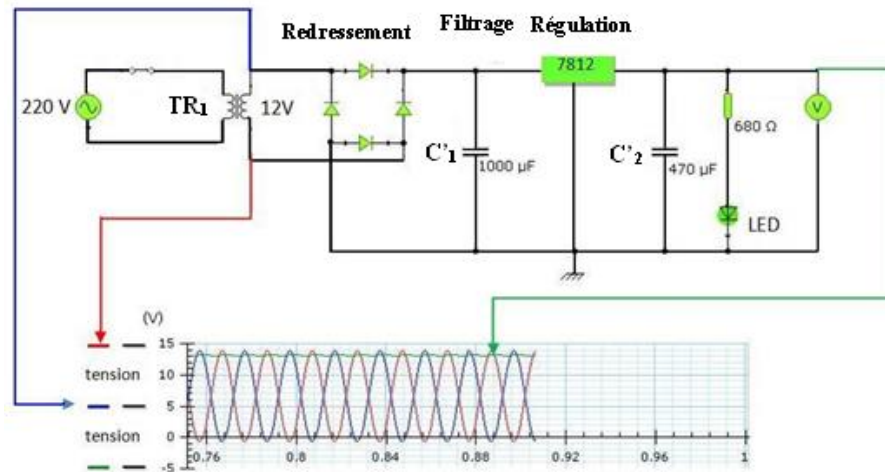
La figure II.3 présente le schéma électrique de cet étage de commande.



**Figure II.3 :** Schéma du circuit de commande.

### II.3.2. Alimentation de 12 Volts

Le circuit de commande présenté précédemment fonctionne sous une alimentation de 12 Volts continue. Le schéma du circuit qui assure l'alimentation du circuit de commande est représenté sur la figure II.4.



**Figure II.4 :** Schéma de l'alimentation 12 Volts DC.

L'alimentation fournit une tension continue stable égale à 12 Volts DC, cette valeur est obtenue grâce à un transformateur abaisseur  $TR_1$  dont la tension du primaire est égale à 220 Volts AC et la tension du secondaire est 13 Volts AC (voir la figure II.5).



**Figure II.5 :** Image d'un transformateur de type EI48X21.5 (PT-6900-1).

Un pont de GRAETZ supportant un courant de 1 Ampère qui assure le redressement double alternance du signal sinusoïdal issu du transformateur (tension alternative).

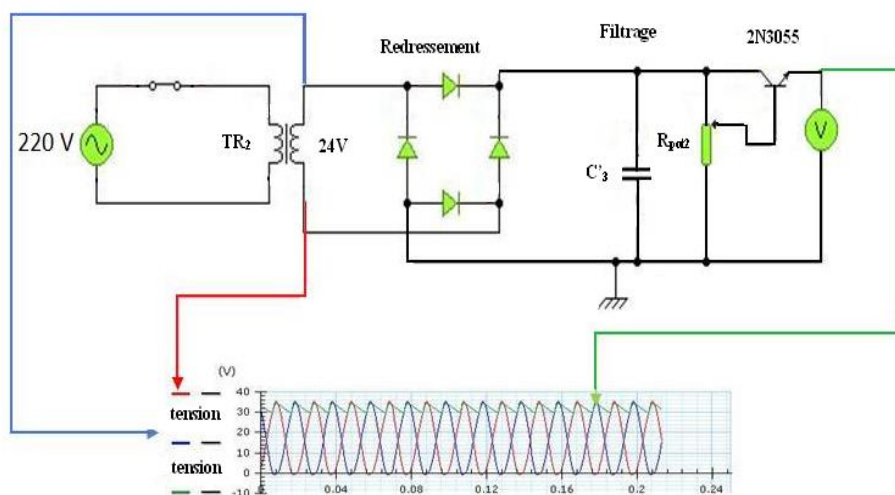
A la sortie du pont, nous avons inséré un condensateur électrolytique  $C'_1$  de 1000  $\mu$ F/63 Volts pour filtrer la tension redressée.

Un régulateur de tension 7812 assure la régulation de la tension filtrée par le condensateur  $C'_1$ . Il est nécessaire d'adjoindre un dissipateur thermique à ce régulateur. Un condensateur  $C'_2$  de  $470 \mu\text{F}/25\text{Volts}$  assure le filtrage de la tension issue du régulateur pour obtenir une tension quasi continue. Pour visualiser le signal de sortie, nous avons disposé d'une diode électroluminescente LED verte et une résistance de protection  $R$  de  $680 \Omega$ . Un voltmètre est branché à la sortie de l'alimentation pour afficher la valeur de la tension.

### II.3.3. Alimentation variable de 34 Volts

Pour faire varier la tension de sortie HT, il est nécessaire d'exciter la bobine d'allumage par une tension impulsionnelle variable, dans notre étude, de 0 à 34 Volts, le schéma de l'alimentation est représenté par la figure II.6.

Nous avons utilisé un transformateur abaisseur  $\text{TR}_2$  d'une puissance 26 VA dont la tension du primaire est égale à 220 Volts AC et une tension de 24Volts AC aux bornes du secondaire.



**Figure II.6 :** Schéma de l'alimentation 34 Volts DC.

Une tension continue est obtenue après redressement par un pont de GRAETZ et filtrage par le condensateur électrolytique  $C'_3$  qui est égale à  $220 \mu\text{F}/200\text{Volts}$ . La tension à la sortie de ce condensateur est proche de 34 Volts.

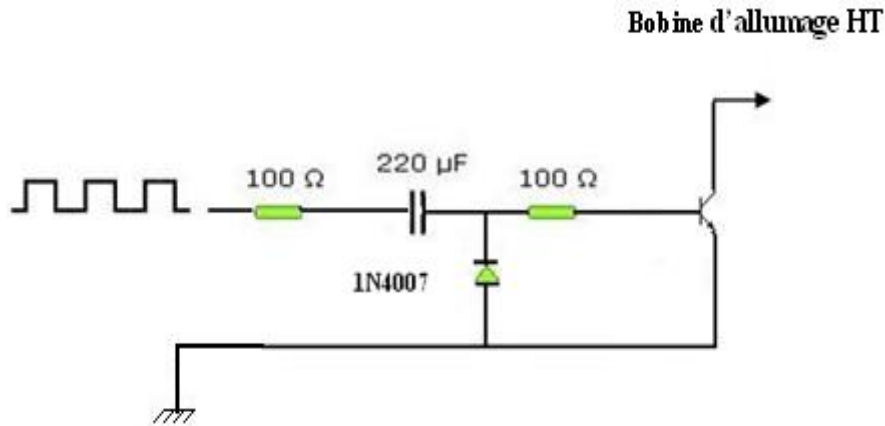
Pour varier la tension développée aux bornes du condensateur  $C'_3$ , le circuit dispose d'un système de réglage de la tension afin de l'adapter à nos besoins.

Un transistor de puissance 2N3055 de type NPN est monté en suiveur de tension (base commune), nous avons fait varier la tension de sortie par l'intermédiaire d'un potentiomètre

$R_{pot2}$  d'une valeur égale à  $5\text{ k}\Omega$  relié à la base du transistor. La tension de sortie prise entre l'émetteur et la masse, varie de 0 à 34 Volts.

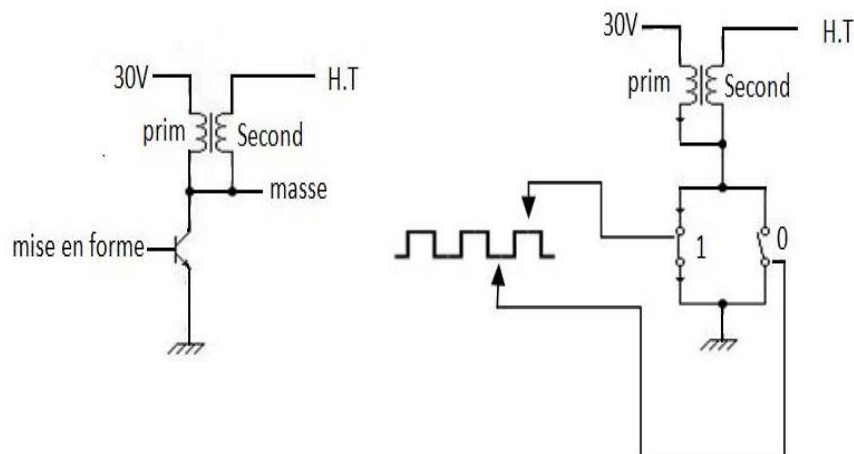
### II.3.4. Etage de puissance

La figure II.7 montre le schéma électrique de l'étage de puissance.



**Figure II.7 :** Schéma de l'étage de puissance.

Le transistor en commutation est utilisé afin d'ouvrir ou de fermer un circuit (voir la figure II.8). On assimile généralement le circuit de sortie du transistor à un interrupteur qui est commandé par une tension, cette tension est celle de la sortie du circuit de mise en forme qui rentre par la base, le courant de base est soit très faible (transistor bloqué) soit très intense (transistor saturé).



**Figure II.8 :** Schéma d'un transistor en commutation.

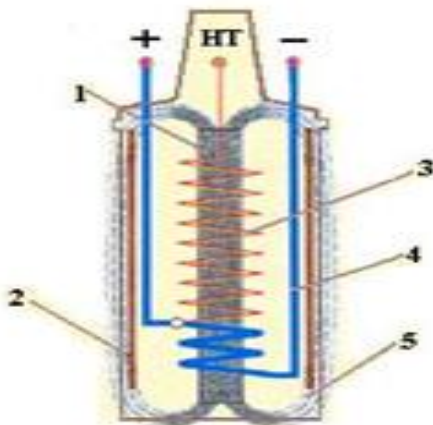
## II.4. Bobine d'allumage HT

Pour créer une haute tension, nous avons utilisé un transformateur élévateur constitué d'une bobine d'allumage de référence **PEUGEOT-404, 504**.

La bobine d'allumage est constituée de :

- Un enroulement primaire qui reçoit l'énergie électrique et la transforme en énergie magnétique.
- Un circuit magnétique (cadre en matériau ferromagnétique) assurant la canalisation des lignes du champ magnétique.
- Un enroulement secondaire qui, étant traversé par le champ magnétique produit par le primaire, fournit un courant de même fréquence mais de tension supérieure à la tension du primaire.
- La carcasse de la bobine est étanche et remplie d'huile pour le refroidissement.

La figure II.9 représente les enroulements primaires et secondaires ainsi que les lignes de flux.



- HT** : Sortie haute tension.  
 + : Entrée basse tension (primaire).  
 - : Sortie basse tension.  
**1** : Noyau magnétique.  
**2** : Revêtement magnétique.  
**3** : Enroulement secondaire.  
**4** : Enroulement primaire.  
**5** : Lignes de flux.

**Figure II.9** : Schéma interne d'une bobine d'allumage.

### II.4.1. Principe de fonctionnement de la bobine d'allumage HT

Le principe de base de la transformation de la bobine est très simple. On laisse circuler un courant continu  $I_p$  dans le primaire de la bobine, en suite on la coupe brutalement en ouvrant l'interrupteur, cet interrupteur est de type électronique (transistor de puissance). Ce courant  $I_p$  est de 3 à 6 Ampères (suivant la tension de la bobine). La circulation de  $I_p$  dans le circuit primaire crée un champ magnétique  $B$ , celui-ci crée alors une variation de flux magnétique  $\Phi$  qui traverse la bobine.

La canalisation du flux est assurée par le noyau ferromagnétique, donc il s'établit dans le secondaire une tension (FEM) à cause de cette variation de flux, la tension établit est proportionnelle au nombre de spires.

Les bobinages primaire et secondaire, soumis à cet établissement de champ magnétique, sont traversés par un flux magnétique variable.

Les lois de transformation des tensions et des courants sont :

$$\Phi = B \times S \dots\dots\dots (II.1)$$

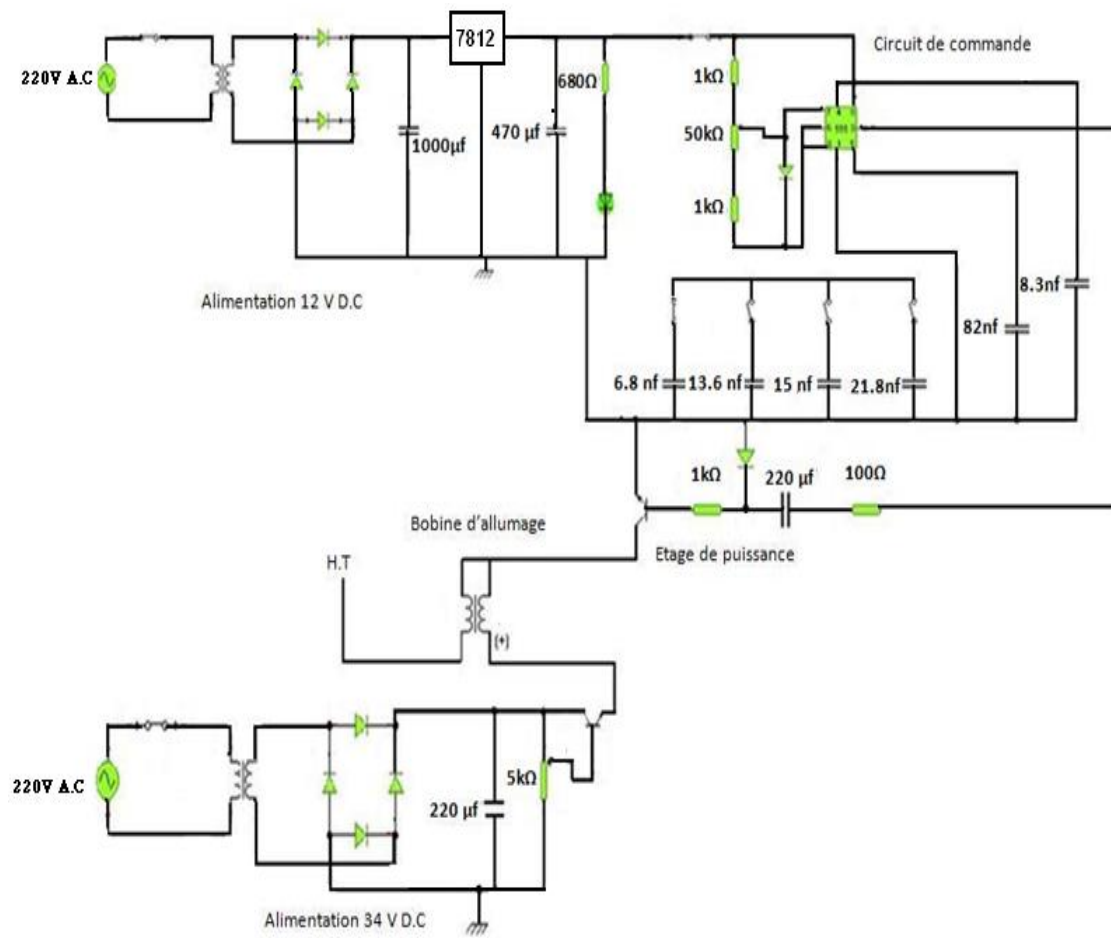
$$B = (K \times N \times i) / l \dots\dots\dots (II.2)$$

Avec :

- ❖ B : Champ magnétique.
- ❖  $\Phi$  : Flux magnétique.
- ❖ N : Nombre de spires de la bobine.
- ❖ l : Longueur de la bobine.
- ❖ i : Intensité dans la bobine.
- ❖ S : Surface de la bobine.
- ❖ K : Une constante.

## II.5. Schéma électrique d'un générateur DBD

La figure II.10 montre le schéma électrique du notre générateur HT.

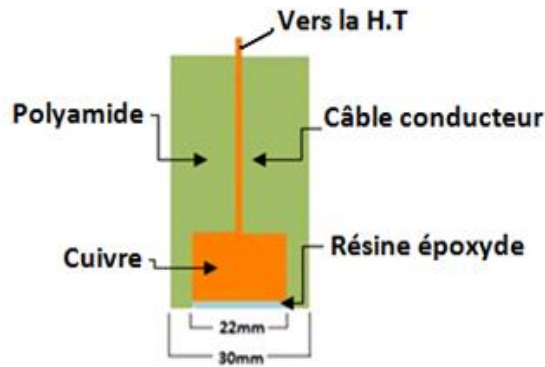


**Figure II.10 :** Schéma électrique de notre générateur haute tension.

## II.6. Réalisation des électrodes

Dans une décharge plasma à barrière diélectrique à électrode flottante nous avons besoin d'une électrode pour la création du plasma. Après avoir conçu le générateur haute tension, nous devons réaliser une électrode qui convient à notre système. Notre électrode est en cuivre, de forme cylindrique de 22 mm de diamètre, entourée d'un polymère isolant (Téflon) résistant à la chaleur et dont l'usinage est facile. A la base de l'électrode est fixée une barrière diélectrique en résine époxyde de 2 mm d'épaisseur et ce pour éviter la transition à l'arc (voir la figure II.11).

Cette électrode va être reliée au générateur haute tension par l'intermédiaire d'un câble conducteur bien isolé



**Figure II.11 :** Schéma de l'électrode.

## II.7. Résultats et discussions

Les valeurs possibles de la fréquence pour avoir un plasma stable sont reportées dans le tableau ci-dessous :

$I_1I_2I_3I_4$	Fréquence (Hz)	$I_1I_2I_3I_4$	Fréquence (Hz)
<b>0000</b>	-	1000	1303
<b>0001</b>	3420	1001	0942
<b>0010</b>	2310	1010	0832
<b>0011</b>	1372	1011	0668
<b>0100</b>	2190	1100	0817
<b>0101</b>	1330	1101	0659
<b>0110</b>	1120	1110	0602
<b>0111</b>	0842	1111	0514

**Tableau II.1 :** Valeurs de fréquences possibles du circuit de commande.

### II.7.1. Mesure de la tension de sortie

Dans la mesure de la tension de sortie, nous avons besoin d'un pont diviseur pour pouvoir mesurer la haute tension et d'un appareil de mesure qui la supporte (voir la figure II.12).

Pour cela nous avons utilisé :

- ❖ Un pont diviseur composé de 5 résistances de 22 M  $\Omega$  plus une résistance de 1 M  $\Omega$ .
- ❖ Un oscilloscope pour la mesure et la visualisation des signaux.

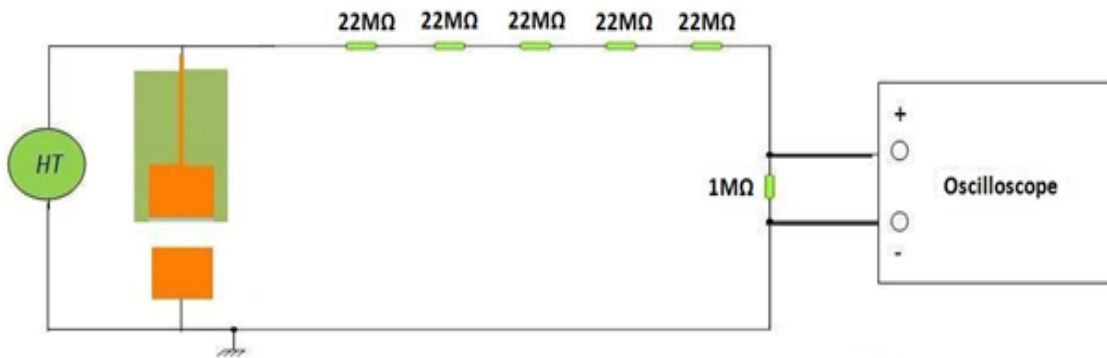
L'expression de la haute tension est donnée par :

$$\tau = (R + \sum R_i) / R = 111 \dots\dots\dots (II.3)$$

$$V_{HT} = V_{mes} \times \tau \dots\dots\dots (II.4)$$

Avec :

- ❖  $\tau$  : le rapport des résistances.
- ❖  $V_{mes}$  : la tension mesurée.



**Figure II.12 :** Schéma du dispositif de la mesure de la HT.

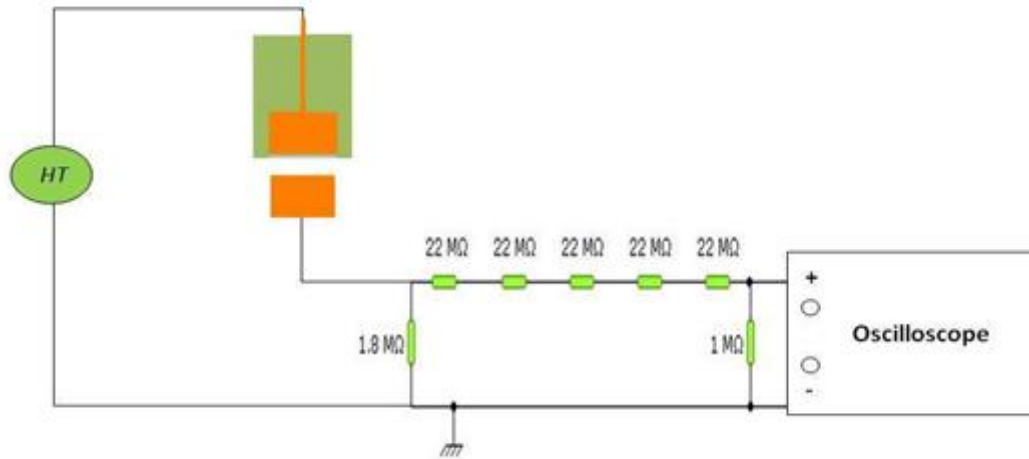
**II.7.2. Variation du courant plasma**

Pour mesurer le courant du plasma qui traversera un tissu biologique, nous avons mis à la sortie de l'électrode de masse une résistance de 1.8 MΩ. En mesurant la tension entre les bornes de cette résistance nous avons eu besoin d'un pont diviseur de tension et d'un appareil de mesure fiable (figure II.13).

La méthode utilisée est la même que dans la mesure de la tension de sortie.

L'expression du courant traversant cette résistance est donnée par :

$$I_{plasma} = V_{HT} / R' \dots\dots\dots (II.5)$$



**Figure II.13 :** Schéma du dispositif de la mesure du courant plasma.

### II.7.3. Variation de la haute tension en fonction du rapport cyclique

Nous avons fixé la tension d'entrée à 30 V, la distance inter-électrodes à 2 mm et nous avons fait varier le rapport cyclique en mesurant la tension de sortie (tableau 2).

	$f1=400Hz$	$f2=1.3KHz$	$f3=2KHz$
$\rho(\%)$	$V_{HT1}(V)$	$V_{HT2}(V)$	$V_{HT3}(V)$
0	0	0	0
10	0	0	1887
20	4434	5550	7215
50	5994	9990	7770
70	10650	10212	9435
80	5994	8325	8214
100	0	0	0

**Tableau II.2 :** Variation de la tension de sortie du générateur en fonction du rapport cyclique pour différentes fréquences.

## II.8. Dispositif de mesure de l'angle de contact

La figure suivante résume le dispositif utilisé pour mesurer l'angle de contact connecté à un ordinateur et contrôlé par une interface d'animation Labview.

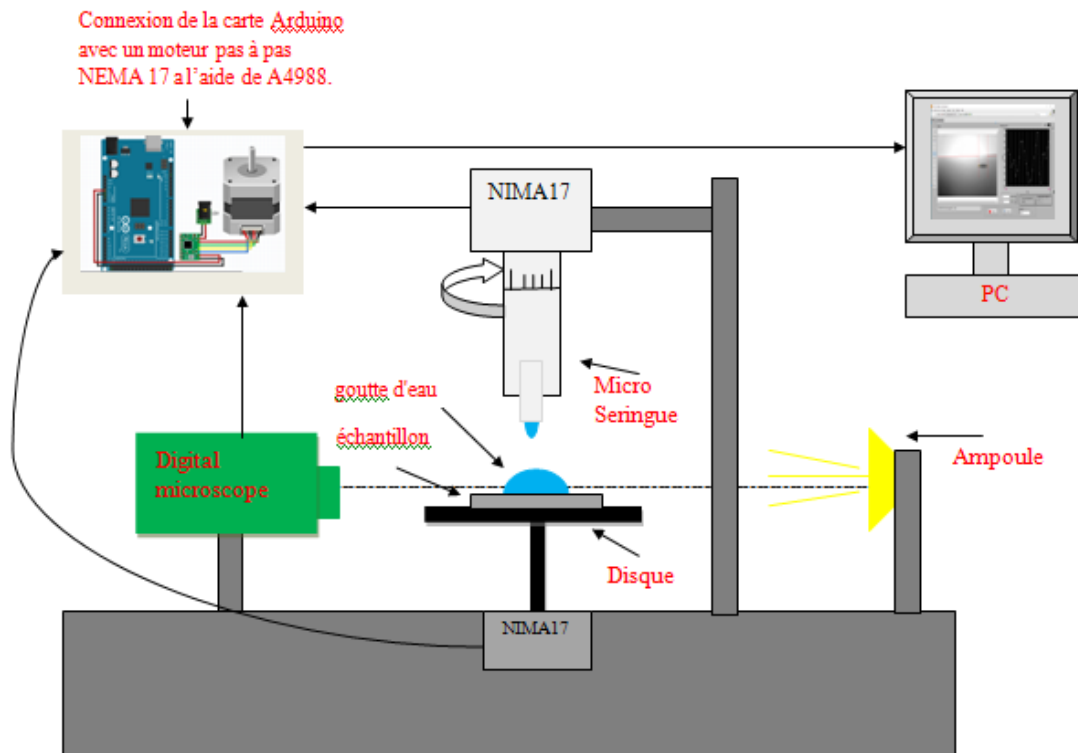


Figure II.14 : Dispositif de mesure de l'angle de contact.

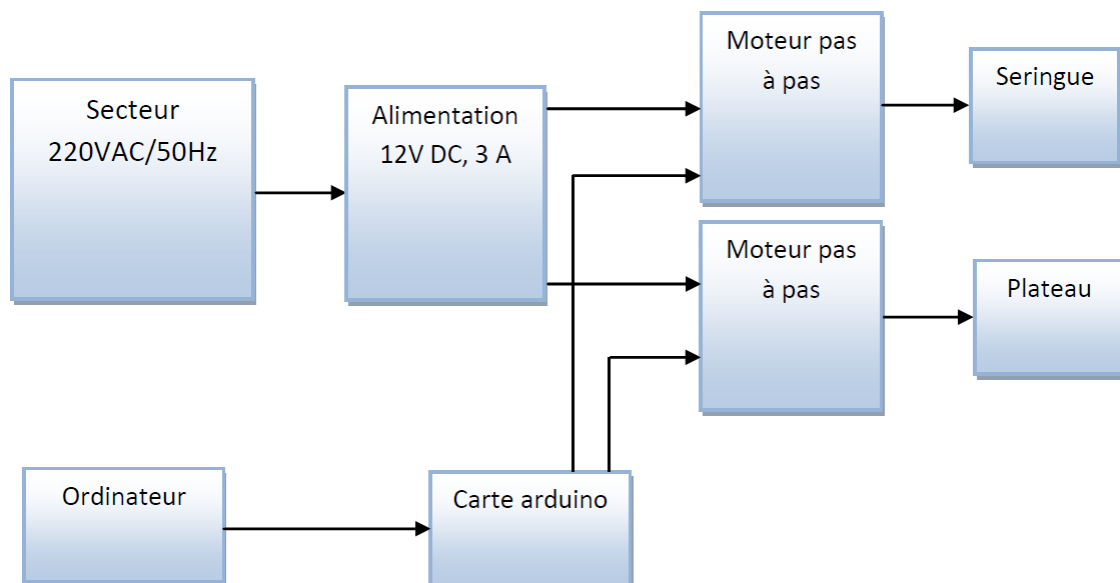
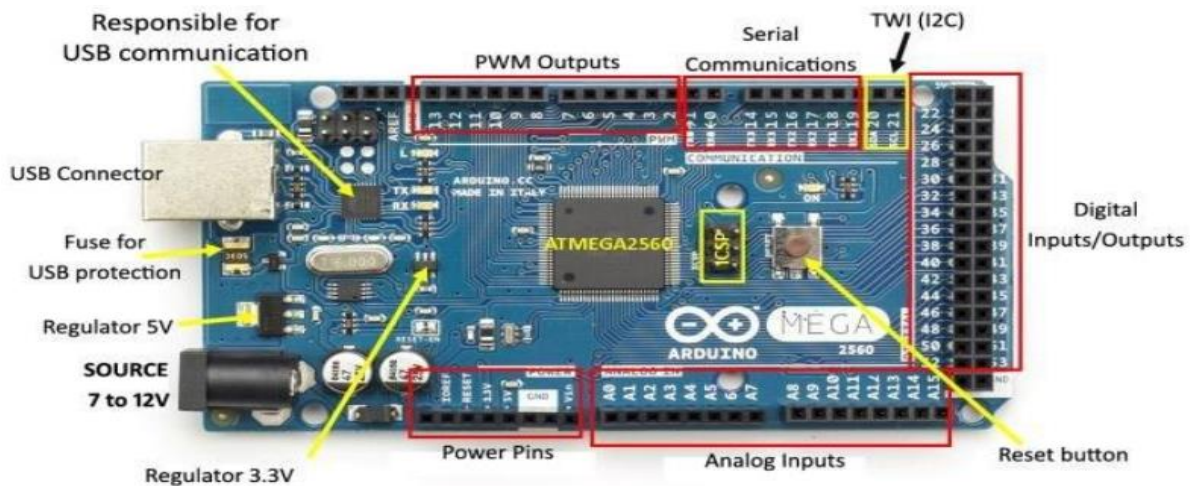


Figure II.15 : Schéma synoptique de dispositif de mesure de l'angle de contact.

Le schéma synoptique de notre dispositif de mesure de l'angle de contact piloté par PC est représenté ci-dessous (voir la figure II.15). Il est constitué de :

- ✚ Un PC pour alimenter la carte d'interface (5 V, port USB) et pour piloter les deux moteurs pas à pas afin de relever les valeurs de l'angle de contact et leur stocker dans le PC.
- ✚ Une carte Arduino de type mega 2560.

La carte Arduino Mega 2560 est basée sur un ATmega2560 cadencé à 16 MHz. Elle dispose de 54 E/S dont 14 PWM, 16 analogiques et 4 UARTs. Elle est idéale pour des applications exigeant des caractéristiques plus complètes que l'Uno. Des connecteurs situés sur les bords extérieurs du circuit imprimé permettent d'enfiler une série de modules complémentaires. Elle peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega2560 contient un boot loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur. Le logiciel est téléchargeable gratuitement. La carte est illustrée dans la figure ci-dessous.



**Figure II.16 :** *Arduino mega 2560.*

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de la carte Arduino.

Version	Rev. 3.
Dimensions:	107 x 53 x 15 mm
Tension d'Alimentation	5V Via port USB où Tension d'entrée de 7 à 12 V sur connecteur d'alimentation.
Microprocesseur	ATmega2560
Broches E/S Numériques	54 broches d'E/S dont 14 PWM
Broches d'entrées analogiques	16 entrées analogiques 10 bits.

Intensité maximale disponible par broche E/S (5V)	40 Ma
Intensité maximale disponible la sortie (3.3V)	50 mA
Intensité maximale disponible la sortie (5V)	Fonction de l'alimentation utilisée 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire programme flash	256 KB dont les 8 KB utilisé pour boot loader
Mémoire SRAM	8 KB
Mémoire EEPROM	4 KB
Vitesse de l'horloge (Cadencement)	16 MHz
Nombre de port série	3 ports séries
Bus et protocole de communication	Bus I2C et SPI

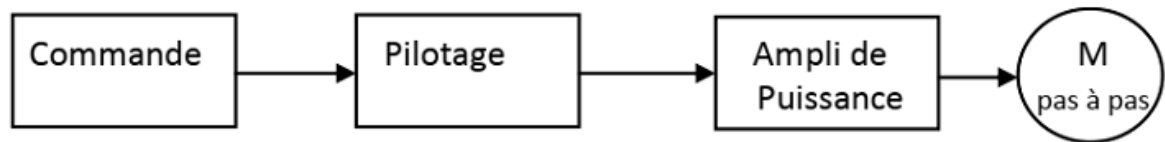
**Tableau II.3 :** *Les caractéristiques de la carte Arduino Méga.*

✚ Deux moteurs pas à pas de type NEMA 17.

Les moteurs pas à pas sont des moteurs à courant continu qui se déplacent en étapes discrètes. Ils ont plusieurs bobines qui sont organisées en groupes appelés "phases". En alimentant chaque phase dans l'ordre, le moteur tourne, une étape à la fois. Avec un pas contrôlé par ordinateur, vous pouvez obtenir un positionnement et/ou un contrôle de vitesse très précis. Pour cette raison, les moteurs pas à pas sont le moteur de choix pour de nombreuses applications de contrôle de mouvement de précision. Les moteurs pas à pas sont disponibles dans de nombreuses tailles et styles différents et caractéristiques électriques.



**Figure II.17 :** *Images d'un moteur pas à pas de type NEMA 17.*



**Figure II.18 :** *Principe de commande en position d'un moteur à courant continu.*

Le principe de fonctionnement des moteurs pas à pas repose sur la commutation successive des enroulements stator (ou phase). Pour cela, une impulsion électrique est traduite par un séquenceur agissant sur une électronique de commutation (drivers ou transistors de puissance) qui distribue les polarités dans les enroulements. Une seule commutation provoque un seul pas quelle que soit la durée de l'impulsion (supérieur à une valeur minimale).

Un moteur pas à pas est caractérisé par sa résolution ou encore son nombre de pas par tour. Il peut avoir une valeur comprise entre  $0.9^\circ$  et  $90^\circ$ . Les valeurs les plus couramment rencontrées sont :

- ✓  $0.9^\circ$  : soit 400 pas par tour.
- ✓  $1.8^\circ$  : soit 200 pas par tour.
- ✓  $3.6^\circ$  : soit 100 pas par tour.
- ✓  $7.5^\circ$  : soit 48 pas par tour.
- ✓  $15^\circ$  : soit 24 pas par tour.

✚ Un plateau cylindrique de diamètre 12 cm.

✚ Une seringue.

La seringue utilisée dans ce travail est de type micropipette comme montre la figure II.19.



**Figure II.19 :** *Photo d'une seringue micropipette.*

Parmi les caractéristiques de la micropipette, on peut citer :

- ❖ Entièrement autoclavable.
- ❖ Affichage clair et facile à lire avec de grands nombres et de petits incréments.
- ❖ Les pipettes couvrent une plage de volume de 0.1  $\mu\text{l}$  à 25  $\mu\text{l}$ .
- ❖ Facile à calibrer et à entretenir avec l'outil fourni.
- ❖ Fabriqué à partir de matériaux innovants.

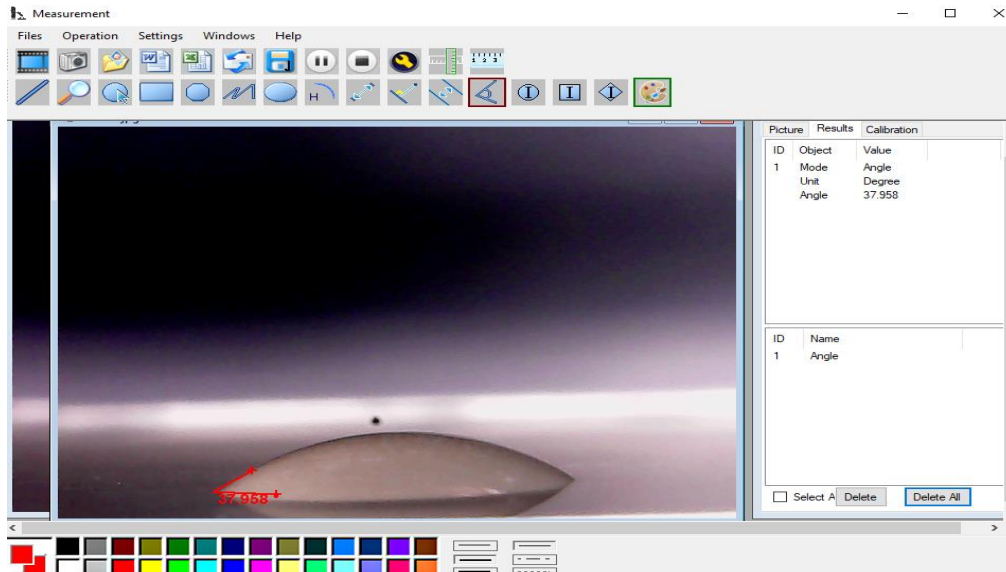
#### Digital **microscope**

Pour capturer l'angle de contact, nous avons utilisé un microscope numérique (voir la figure II.20) pour nous aider à étudier l'expérience au fil du temps et avec une bonne précision en connectant le microscope à l'ordinateur afin que nous puissions contrôler les mesures.



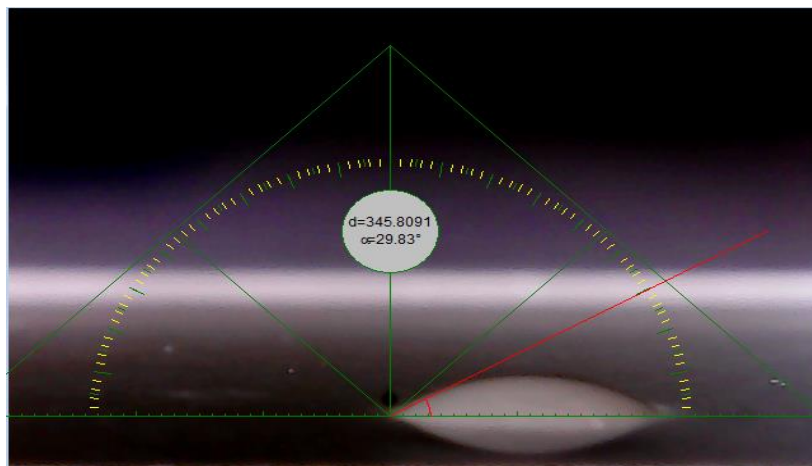
**Figure II.20 :** *Image de digital microscope.*

Pour lire le traitement d'image sur l'ordinateur, le microscope numérique fournit une interface graphique pour afficher l'image et pour contrôler l'heure et la précision de la capture comme indiqué dans la figure suivante :



**Figure II.21 :** *Digital microscope.*

Pour mesurer l'angle de contact, nous pouvons appliquer une interface **MB-Ruler** à une interface graphique pour mesurer et déterminer l'angle de contact comme illustré dans la figure II.22.



**Figure II.22 :** *Exemple de mesure d'un angle de contact à base de logicielle MB-Ruler.*

## II.9.conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents blocs utilisés pour réaliser le générateur Décharge à Barrière Diélectrique (DBD). Après, on présent aussi les différents blocs du dispositif de l'angle de contact piloté par un PC.

# Chapitre III

## Résultats et discussions

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence de traitement à base de générateur DBD sur la surface des films de l'oxyde de zinc (ZnO). Pour cela, nous avons mesuré l'angle de contact dynamique et statique des films à partir de ZnO avant et après traitement. De plus, nous avons calculé le travail d'adhésion toujours pour le même substrat avant et après traitement.

### III.2. L'oxyde de Zinc (ZnO)

#### III.2.1. Définition

L'oxyde stannique ZnO est un semi-conducteur de type n faisant partie de la famille des TCOs (TCO : Transparent Conductive Oxyde), non toxiques et très abondants sur Terre. C'est un atout indéniable car il permet de réduire les coûts de fabrication. De plus, c'est un matériau chimiquement inerte et dur mécaniquement ; il résiste aux hautes températures et est stable vis à vis de l'atmosphère.

#### III.2.2. Applications de ZnO

En raison de leur transparence optique élevée et de leurs propriétés de faible résistivité électrique, les TCOs ont trouvé des applications dans divers dispositifs photovoltaïques, tels que les cellules solaires, les diodes électroluminescentes (LED), les écrans à cristaux liquides (LCD) et les écrans tactiles.

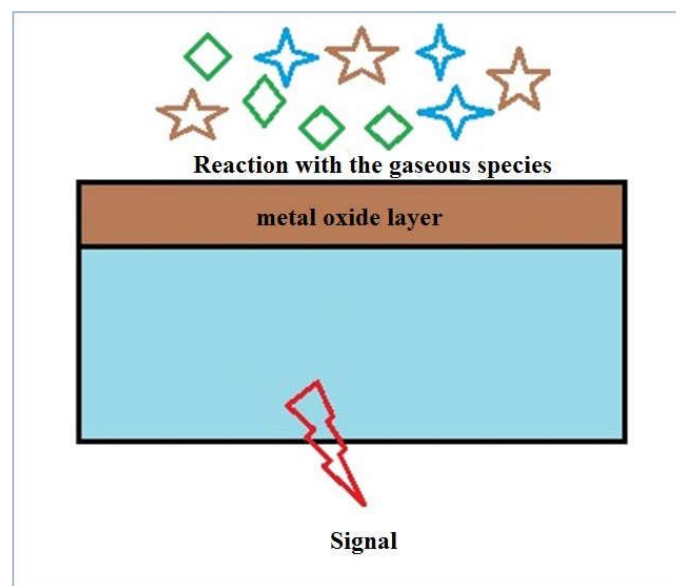
Le ZnO en particulier a été utilisé comme composant dans plusieurs appareils. Sa large bande interdite à température ambiante (3.37 eV) est similaire à celle du nitrure de gallium [GaN] (3.44 eV). Cela permet des applications pour les deux matériaux en optoélectronique dans la région bleu/UV, comme les LEDs, les diodes laser et les photodétecteurs. Nous reportons ici quelques applications des films de SnO<sub>2</sub> en se référant aux travaux courants de recherche.

##### a- Capteurs à gaz

En raison des préoccupations croissantes concernant la sécurité industrielle, le contrôle chimique et la pollution de l'environnement, des efforts continus sont déployés dans le développement de capteurs de gaz [25]. Les applications de l'oxyde métallique nanocristallin dans les capteurs de gaz ont beaucoup attiré attention en raison de leurs avantages tels que le faible coût, la synthèse facile, la taille compacte, la durabilité, la facilité de maintenance, la faible consommation d'énergie et la faible dérive du signal sur une longue période. De plus et plus important encore, une sensibilité élevée, une réponse rapide et une faible température de

fonctionnement sont nécessaires pour le meilleur capteur de gaz candidat [26]. Récemment, les capteurs de gaz basés sur les oxydes métalliques semi-conducteurs tels que  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{CdO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$  et  $\text{ZnO}$  se sont révélés très utiles pour détecter une grande variété de gaz au niveau ppm.

Le mécanisme de détection fondamental des capteurs de gaz à base d'oxyde métallique repose sur une modification de la conductivité électrique due à l'adsorption/désorption du gaz cible dans un environnement donné. Généralement, les gaz d'intérêt comprennent le  $\text{CO}$ , le  $\text{H}_2\text{S}$ , le  $\text{H}_2$ , le  $\text{NH}_3$ , le  $\text{SO}_2$ , le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$  et d'autres hydrocarbures. Ces gaz peuvent être nocifs pour la santé humaine s'ils sont présents au-delà d'une certaine concentration [27]. Ainsi, un capteur de gaz idéal est considéré comme sensible, sélectif, actif rapidement, non contaminant et à des températures de fonctionnement inférieures. Un capteur à oxyde métallique est généralement composé de deux éléments comme le montre la figure III.1, un élément sensible (couche d'oxyde métallique) sur lequel s'effectue la réaction avec les espèces gazeuses. Le second est un système de transducteur qui convertit l'interaction entre le gaz et l'élément de détection en un signal (électrique) mesurable [28].



**Figure III.1 :** Schéma d'un capteur de gaz à base d'oxyde métallique.

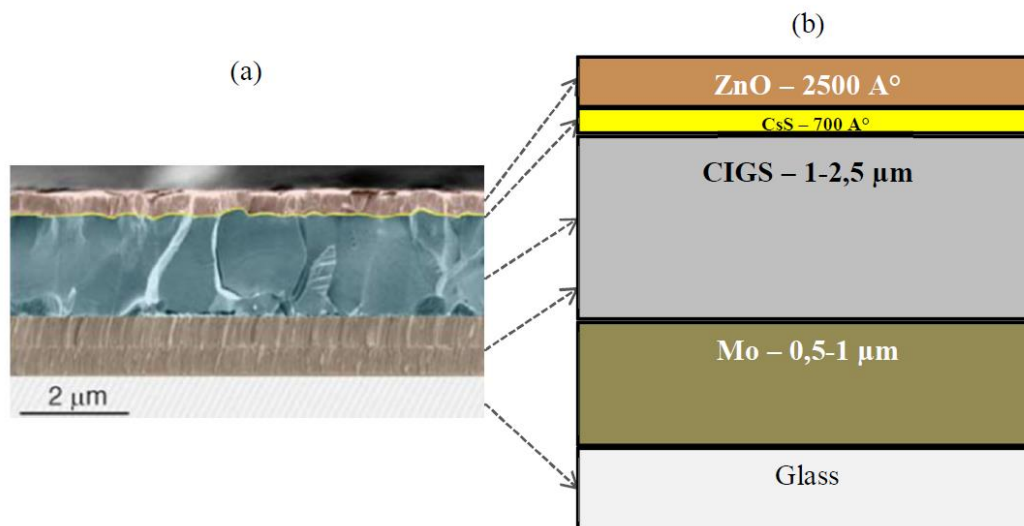
Des capteurs de gaz ont été utilisés à divers endroits, de la détection de gaz à l'intérieur à la surveillance de la pollution de l'environnement et des processus industriels à différentes températures [29] tels que :

- Sécurité dans l'environnement domestique.
- Détection de fuite de CO Hygiène dans l'environnement domestique.

- Contrôle des odeurs Sécurité en milieu industriel.
- Détection de solvant, risque d'explosion.
- Détection de CO dans les parkings souterrains et les tunnels.

### b- Cellules solaires photovoltaïques

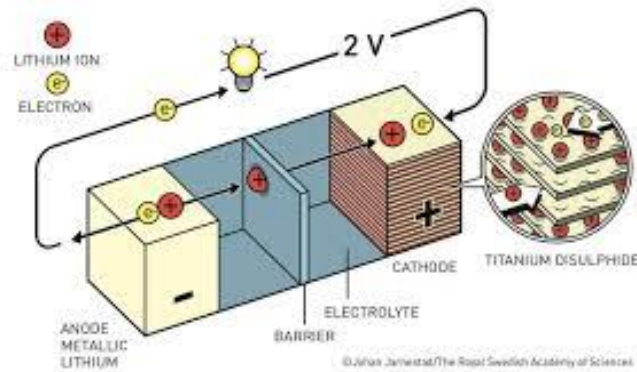
L'application la plus simple des matériaux à base de ZnO dans le photovoltaïque est les revêtements et les contacts antireflets et/ou piégeant la lumière. Pour des applications comme contacts transparents dans des cellules solaires (voir la figure III.2), le dopage avec des éléments du groupe III est usuel. Alors que les électrodes ZnO dopées sont couramment utilisées à la fois comme contacts et pour améliorer le piégeage de la lumière dans les cellules solaires à couches minces via une surface d'électrode texturée. La majorité des travaux d'électrodes à base de ZnO ont été rapportés pour les cellules solaires inorganiques [30].



**Figure III.2 :** Exemple d'une cellule solaire à base de ZnO [30].

### c- Piles au lithium

Les appareils électroniques utilisés de nos jours tels que nos téléphones et ordinateurs portables suscitent des sources d'alimentation miniaturisées. Depuis 1983, de nombreux scientifiques travaillent sur cet axe et cherchent à améliorer les performances de ces batteries en améliorant le matériau des différentes parties de ces batteries (l'électrode positive, l'électrolyte et sur l'électrode négative) [31] (voir la figure III.3).



**Figure III.3 :** Exemple d'une Piles au lithium [32].

Pour la fabrication de ces sources d'alimentation miniaturisées qui sont des piles à accumulation au lithium qui est depuis longtemps utilise du fait de sa forte densité en énergie et ses capacités de stockage énergétique. Dans le cas de telles piles, le compose au lithium constitue la cathode, l'anode est composée de carbone graphite, les deux électrodes séparées par une membrane perméable aux ions, baignant dans un électrolyte liquide contenant des ions mobiles lorsque la batterie est en charge, les ions du lithium se déplacent dans l'électrolyte de la cathode vers l'anode, créant ainsi une différence de potentiel entre les deux électrodes ces électrodes sont constituées par des matériaux qui jouent un rôle primordial pour la performance des batteries. Des recherches sur de nouveaux matériaux sont en cours afin d'augmenter la capacité de stockage d'énergie et écourter le temps de charge de la batterie.

Durant ces dernières années, un grand intérêt a été donné à ZnO pour ses capacités importantes, il a été qualifié comme remplaçant du graphite potentiel a cause de la haute capacité spécifique, un faible cout.

### III.3. Traitement de la surface

#### III.3.1. Définition d'une surface

La surface d'un matériau (solide ou liquide) s'étend sur une épaisseur de quelques atomes ou molécules. Elle sépare l'intérieur du matériau du milieu extérieur [33]. On peut donc la définir comme étant la dernière couche atomique incluant éventuellement des atomes étrangers (la présence de liaisons pendantes). Pour cette raison, les propriétés électriques des surfaces des matériaux polymères peuvent être différentes de celles du volume; ces propriétés dépendent de la structure chimique du matériau et de l'arrangement atomique/moléculaire [34].

### III.3.2. Pourquoi les traitements de surfaces des solides

Les traitements de surface des solides sont largement utilisés dans l'industrie afin de modifier la structure chimique et la réactivité des surfaces (augmentation de l'énergie de surface) pour améliorer les caractéristiques d'adhésion des matériaux. Le traitement de surface permet d'avoir plusieurs rôles [34] :

- ✚ Elimination des contaminants : revêtements provenant de la mise en forme, pollution organique...
- ✚ Création de rugosité, afin d'augmenter la surface de contact à l'interface, le nombre d'ancrage, ou l'ancrage mécanique.
- ✚ Modification de la tension de surface afin d'augmenter ou diminuer l'hydrophilie.
- ✚ Création de fonctions chimiques pour favoriser les interactions chimiques à l'interface.

### III.3.3. Techniques de traitements de surfaces

Les traitements de surface sont des procédés chimiques, mécaniques ou physiques ; et sont choisis en fonction du type d'assemblage, du type de matériaux et des données géométriques des pièces à traiter. Les traitements de surfaces les plus ou moins couramment utilisés dans l'industrie sont classés selon cinq familles [34].

#### a. Traitements chimiques

Les traitements chimiques sont encore très répandus dans l'industrie. Leur principal avantage est de s'adapter aux formes les plus complexes. Ils présentent des problèmes de manque d'uniformité et de reproductibilité par rapport à d'autres méthodes. Dans le principe, la pièce à traiter est noyée dans un bain de réactif en solution, acide, organométallique, ou complexe ou encore soumise au passage d'un gaz réactif [35].

#### b. Traitements mécaniques

Les traitements mécaniques sont utilisés pour nettoyer et modifier physiquement la surface. Leur intérêt est très limité pour les polymères [34].

#### c. Traitements thermiques

Les traitements thermiques ou flammages sont couramment utilisés industriellement citons par exemple la préparation des polyoléfines avant application d'une peinture (par-choc de voiture). Il s'agit de porter la surface du polymère à très haute température pendant un court

instant à l'aide d'une flamme. Les effets sont structuraux et chimiques (oxydation). L'avantage de ces traitements est leur simplicité de mise en œuvre [34].

#### d. Traitements par rayonnements

Les traitements par rayonnement (le bombardement par faisceaux d'électrons, les lampes UV et les lasers) qui sont de nos jours les moins utilisés en industrie probablement à cause de fort coût d'investissement des installations. Leurs effets sont principalement chimiques (oxydation) mais peuvent également modifier physiquement la surface [34].

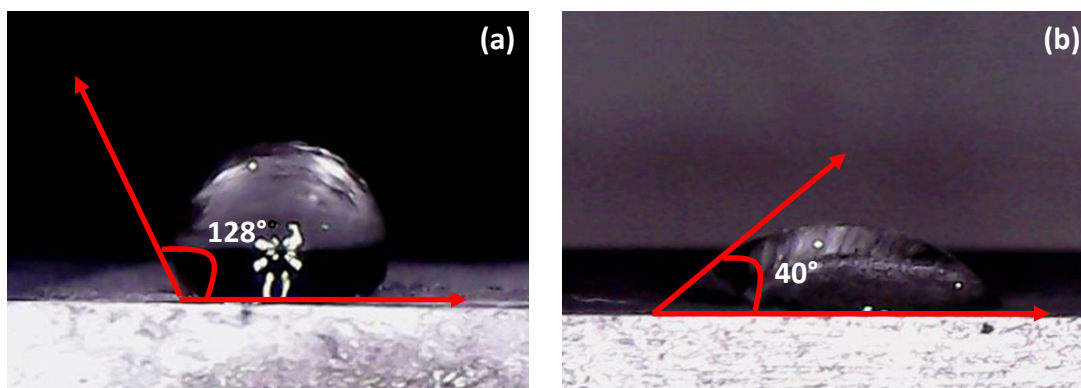
#### e. Traitements par décharges électriques

La décharge électrique, peut être définie comme le passage du courant électrique dans un gaz. Pour générer ces décharges, on introduit un gaz dans une enceinte et on le soumet sous une pression donnée, à une tension électrique  $V$  appliquée entre deux électrodes. Suivant la nature du gaz, la géométrie des électrodes, les variations spatiales ou temporelles du champ électrique appliqué, on peut obtenir différents types de décharges [34]. Les traitements par décharges électriques (couronne, plasmas froids) sont très efficaces.

Dans le cadre de notre travail nous nous intéresserons aux décharges à barrière diélectrique (DBD).

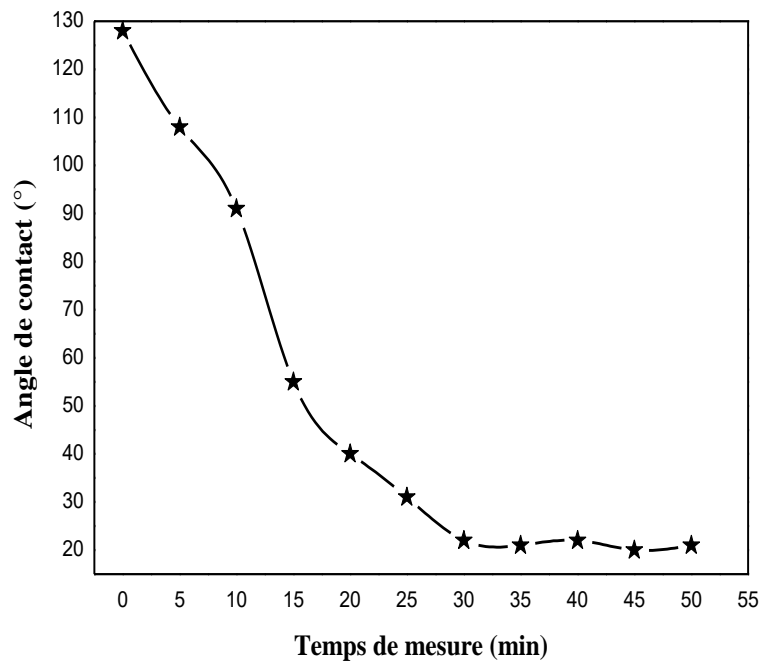
### III.4. Angle de contact avant traitement

#### III.4.1. Effet du temps de mesure



**Figure III.4 :** Image de l'angle de contact pour une surface de ZnO en fonction de temps : (a) 0 seconde et (b) 20 secondes.

La figure III.4 représente les images de la goutte d'eau distillée d'un volume =  $5 \mu\text{l}$  sur des substrats en verre ordinaire/ZnO mesurés pour 0 s et 20 s dans une température ambiante.



**Figure III.5 :** Evolution de l'angle de contact d'une goutte d'eau déposée sur un film ZnO non traité en fonction du temps de mesure.

Sur la figure III.5, nous avons représenté la variation de l'angle de contact d'une goutte d'eau d'un volume égal à 5  $\mu\text{l}$  déposée sur la surface de ZnO non traité en fonction du temps de mesure. Nous remarquons d'après la figure ci-dessous que la valeur de l'angle de contact diminue en fonction de temps de mesure pour atteindre le régime de saturation après le 30 seconde. Cette diminution de l'angle de contact peut être expliquée par l'évaporation de l'eau distillée. Par conséquent, toutes les mesures de l'angle de contact dans ce travail ont été effectuées après 30 secondes.

Pour calculer le travail d'adhésion ( $W_{sl}$ ) on utilise l'équation de Young (voir le chapitre I) :

$$W_{sl} = \gamma_l (1 + \cos\theta) \dots\dots\dots(III.1)$$

Avec :  $\gamma_{sl}$  est l'énergie interfaciale entre le liquide et le solide et  $\gamma_l = 72.8 \text{ mJ.m}^{-2}$  pour l'eau.

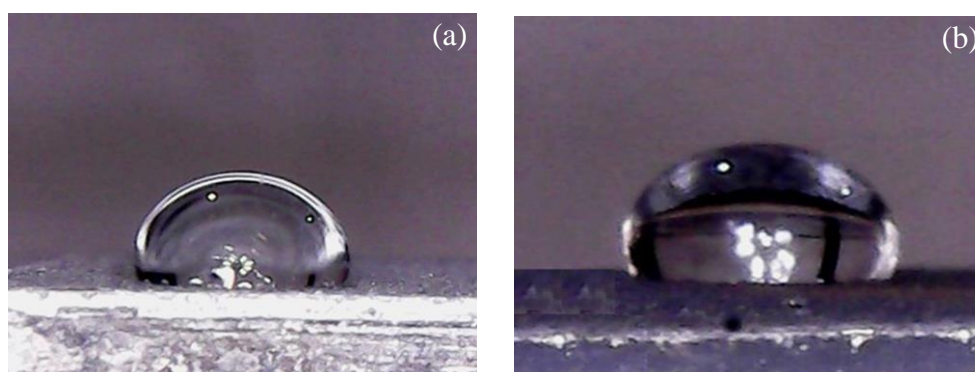
Le tableau III.1 regroupe les valeurs du travail d'adhésion en fonction de différents temps de mesure.

Temps de mesure, (s)	Angle de contact, (°)	Travail d'adhésion, (mJ.m <sup>-2</sup> )
0	128	27.97
5	108	50.30
10	91	71.52
15	55	114.55
20	40	128.56
25	31	135.20
30	22	140.29
35	21	140.76
40	22	140.29
45	20	141.20
50	21	140.76

**Tableau III.1 :** *Variation du travail d'adhésion de film ZnO non traité en fonction du temps de mesure.*

Suivant le tableau III.1 on remarque que le travail d'adhésion augmente avec le temps de mesure avec une grande valeur pour le temps supérieur à 30 secondes. Ce comportement est du probablement à la présence des pores. Selon les travaux de N. Guermat et al. [36] la présence des pores diminue l'angle de contact est donc augmente le travail d'adhésion. Suivant M. Khalfallah et al. [37] la présence des pores améliore les propriétés optiques de la cellule solaire. D'après N. Guermat et al. [38] la présence des pores dans le matériau peut l'utilisé comme couche sensible dans les capteurs d'humidité.

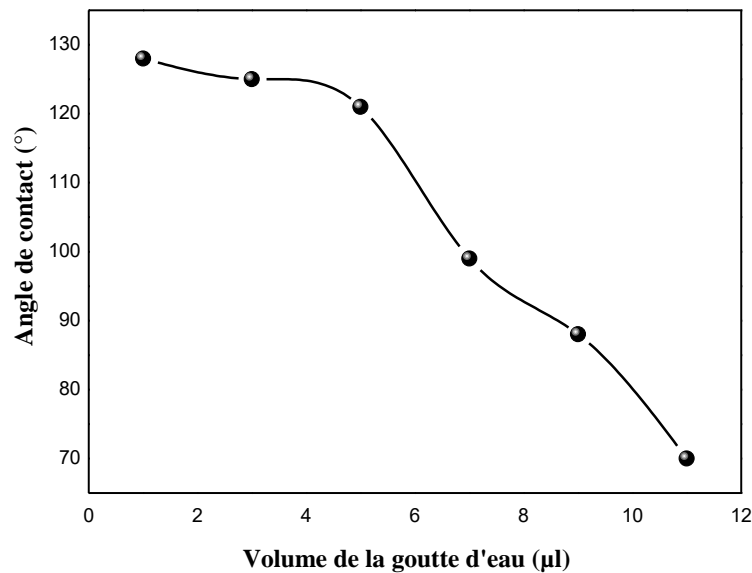
#### III.4.2. Effet du volume de la goutte



**Figure III.6 :** *Image de l'angle de contact pour une surface de ZnO en fonction du volume : (a) 5 µl et (b) 10 µl.*

La figure III.6 représente les images de la goutte d'eau distillée sur des substrats en verre ordinaire/ZnO mesurés pour un volume de 5  $\mu\text{l}$  et 10  $\mu\text{l}$  dans une température ambiante.

L'étude de l'effet de volume de la goutte d'eau a révélé la présence de deux domaines de variation de l'angle de contact relativement distincts (voir la figure III.7). Le premier domaine pour les faibles volumes 1 à 5  $\mu\text{l}$ , l'angle de contact reste pratiquement constant. Le deuxième domaine au-delà de 5  $\mu\text{l}$  du volume, l'angle de contact commence à diminuer linéairement avec l'augmentation du volume de la goutte d'eau. Cette variation peut s'expliquer par l'effet du poids du liquide (effet de gravité). Donc, dans notre étude, pour mesurer l'angle de contact, nous avons choisi une goutte de liquide d'un volume égal à 5  $\mu\text{l}$  pour éviter l'effet de son poids.



**Figure III.7 :** Variation de l'angle de contact de l'eau en fonction du volume de la goutte d'eau distillée pour un film de ZnO non traité.

Les valeurs du travail d'adhésion en fonction du volume de la goutte d'eau sont regroupées dans le tableau III.2.

Volume de la goutte, ( $\mu\text{l}$ )	Angle de contact, ( $^{\circ}$ )	Travail d'adhésion, ( $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )
1	128	27.97
3	125	31.04
5	121	35.30

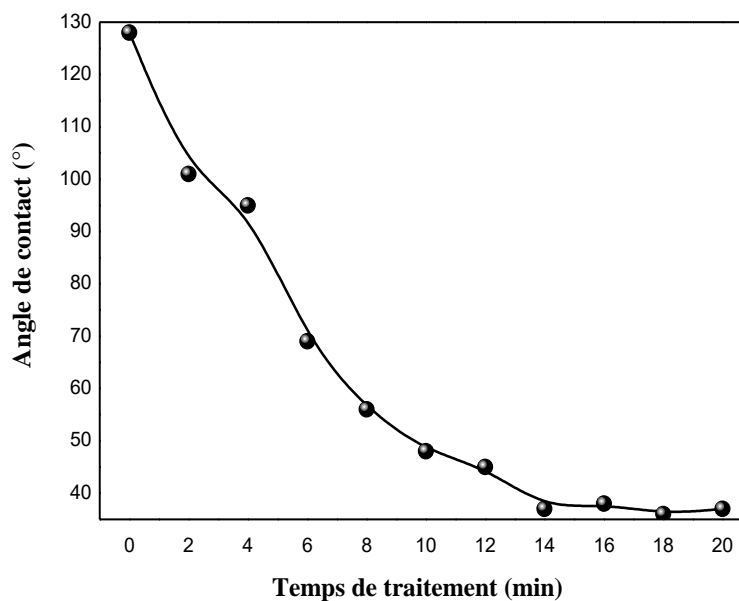
7	99	61.41
9	88	75.34
11	70	97.69

**Tableau III.2 :** *Variation du travail d'adhésion de film ZnO non traité en fonction du volume de la goutte d'eau.*

D'après le tableau III.2, les valeurs du travail d'adhésion pour le film ZnO non traité sont augmentées en fonction du volume de la goutte de l'eau distillé. Ce comportement est du probablement au poids de la goutte qui sera grande en fonction du volume ce qui mène une surface plus grande est donc un travail plus élevé.

### III.5. Angle de contact après traitement

Dans cette partie, nous étudions la variation de l'angle de contact et le travail d'adhésion toujours pour le même substrat à base de ZnO et l'eau distillé mais après traitement par décharge à barrière diélectrique (DBD) en fonction du temps de traitement.



**Figure III.8 :** *Variation de l'angle de contact de l'eau distillée sur la surface de film ZnO en fonction du temps de traitement.*

L'évolution de l'angle de contact de l'eau distillée sur la surface de film en fonction du temps de traitement est illustrée sur la figure III.8. Suivant la figure III.8 on remarque une diminution de l'angle de contact de l'eau distillé en fonction de l'augmentation du temps de traitement. De plus, on observe aussi au-delà de 14 min (temps de traitement) la valeur de

l'angle de contact presque constante. Ce comportement est du probablement à la morphologiques de la surface de ZnO qui à été modifié après le traitement par la décharge électrique. Suivant les travaux de N. Guermat et al. [39], cette variation de l'angle de contact est due à la rugosité de la couche en contact avec la goutte d'eau.

Le tableau III.3 regroupe les valeurs du travail d'adhésion d'une goutte d'eau en fonction du temps de traitement.

Temps de de traitement, (s)	Angle de contact, (°)	Travail d'adhésion, (mJ.m <sup>-2</sup> )
0	128	27.97
2	101	58.90
4	95	66.45
6	69	98.88
8	56	113.50
10	48	121.51
12	45	124.27
14	37	130.94
16	38	130.16
18	36	131.69
20	37	130.94

**Tableau III.3 :** *Variation du travail d'adhésion de film ZnO traité en fonction du temps de traitement.*

Suivant le tableau III.3 on remarque que les valeurs du travail d'adhésion d'une goutte de l'eau distillé pour le film ZnO augmentées en fonction du temps de traitement. Ce comportement est du probablement à la rugosité de la couche en contact avec la goutte d'eau.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus de l'angle de contact et le travail d'adhésion pour le film ZnO non traité et traité à partir de la décharge électrique. Les résultats obtenus d'après cette étude montrent une bonne corrélation entre l'angle de contact et le travail d'adhésion pour les deux types de film à base de ZnO non traité et traité.

# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

Le but de notre travail consiste à étudier l'effet du traitement par décharge à barrière diélectrique (DBD) sur les propriétés surfaciques de film de ZnO. Cette étude a été effectuée grâce générateur DBD et le dispositif de mesure de l'angle de contact.

A partir des résultats obtenus en fonction de traitement des films de ZnO, on peut conclure que :

✚ L'étude de l'évolution de l'angle de contact pour le film de ZnO non traité a montré qu'une diminution en fonction de temps de mesure avec un régime de saturation après les 30 secondes. Par contre, le travail d'adhésion augmente avec le temps de mesure avec une grande valeur pour le temps supérieur à 30 secondes.

✚ L'étude de l'effet de volume de la goutte d'eau pour le film de ZnO non traité a révélé la présence de deux domaines de variation de l'angle de contact relativement distincts. Le premier domaine pour les faibles volumes 1 à 5  $\mu\text{l}$ , l'angle de contact reste pratiquement constant. Le deuxième domaine au-delà de 5  $\mu\text{l}$  du volume, l'angle de contact commence à diminuer linéairement. De plus, les valeurs de travail d'adhésion augmentent en fonction du volume de la goutte de l'eau distillé.

✚ Une diminution de l'angle de contact de l'eau distillé en fonction de l'augmentation du temps de traitement. De plus, au-delà de 14 min la valeur de l'angle de contact presque constante. Autrement dit, les valeurs du travail d'adhésions calculées augmentent en fonction du temps de traitement.

Comme perspectives, nous pouvons proposer la continuité dans cet axe de recherche par l'étude de l'effet de la température de décharge électrique sur l'angle de contact et le travail d'adhésion.

# Référence

### Référence

- [1] Ardjani Benamar, "Application de la Méthode de Monté Carlo dans le Calcul des Coefficients de Transport d'un Gaz Faiblement Ionisé "Magister en Physique des plasmas Et des gaz ionisés, UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAID DE TLEMCEN septembre 2006
- [2] [Http://plasmas.agmat.asso.fr/technologie/images/illus2.jpg](http://plasmas.agmat.asso.fr/technologie/images/illus2.jpg).
- [3] Guermat Noubel, "Élaboration des couches minces sensibles à la présence de vapeur d'eau par polymérisation", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, (2011).
- [4] [Http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/principes/plasma.gif](http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/principes/plasma.gif) HELD.
- [5] "Physique des plasmas", J.-L. Delcroix, A. Bers, Eds., Paris 1994.
- [6] H. Conrads, M. Schmidt, Plasma Sources Sci. Technol. **2000**, 9, 441.
- [7] M. Djibrillah, "Éléments de conception d'un générateur électrique pour l'alimentation d'un dispositif à décharge à barrière diélectrique", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (2011).
- [8] A-M. Pointu, J. Perrin, J. Jolly, "Plasmas froids de décharge", Technique de l'ingénieur, Université de Toulouse, (2001).
- [9] E. Kuffel, W.S Zaengl, J. Kuffel, "High voltage Engineering : Fundamentals", Second Edition, Newnes 2000.
- [10] K. Hassouni, F. Massines, J-M. Pouvesle, "Plasmas Froids : Génération, Caractérisation et Technologies", I Ed des Presses de Saint Etienne, 2004.
- [11] J. Reece Roth, "Industrial Plasma Engineering : Principles", Thèse de doctorat, Université de London, (1995).
- [12] U. Kogelschatz, "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications", Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 23, No. 1, 2003.
- [13] 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.
- [14] Guermat Noubel, "Étude du pouvoir d'absorption d'humidité de films minces déposés à partir de vapeurs d'HEXAMETHYLDISILOXANE (HMDSO)", Mémoire de Magister, Université de Constantine, (2006).
- [15] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki, S. Okazaki, "Stable glow plasma at atmospheric pressure", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, 838 (1988)

## Références

---

- [16] U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli, "Modelling of dielectric barrier discharge chemistry", *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 66, No.6, pp. 1275-1286, 1994.
- [17] Z. Falkenstein, "Applications of dielectric barrier discharges", in *High-Power Particle Beams, 1998. BEAMS '98. Proceedings of the 12th International Conference on*, vol. 1, 1998, pp. 117–120 vol.1.
- [18] R. Diez Medina, "Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (2008).
- [19] A.A. Pikulev, V.M. Tsvetkov, "Simulation of the Discharge Process in a Barrier Discharge Cell Based on a Three-Parameter Models". *Technical Physics*, 2007, Vol. 52, No. 9, pp. 1121–1126.
- [20] D. Palanker, A. Vankov, P. Jayaraman, "On mechanisms of interaction in electrosurgery", *New Journal of Physics*, 2008.
- [21] E. Stoffels, *Biomedical applications of plasmas*, Workshop Plasma santé, Orléans, France, 2008.
- [22] R. E. J. Sladek, E. Stoffels, R. Walraven, P. J. A. Tielbeek, R. A. Koolhoven, *Plasma treatment of dental cavities: a feasibility study*, *IEEE Transactions on plasma science*, 2004, 32, 1540-1543.
- [23] I. E. Kieft, N. A. Dvinskikh, J. L. V. Broers, D. W. Slaaf, E. Stoffel, *Effect of plasma needle on cultured cells*, *Proceedings of SPIE*, 2004, 5483, 247.
- [24] <http://www.tract-old-engines.com/allumage.html#lien03>.
- [25] Y. Hou and A. H. Jayatissa, "Sensors and Actuators B : Chemical Low resistive gallium doped nanocrystalline zinc oxide for gas sensor application via sol – gel process," *Sensors And Actuators B: Chem.*, vol. 204, pp. 310–318, 2014.
- [26] A. M. Soleimanpour, Y. Hou, and A. H. Jayatissa, "Evolution of hydrogen gas sensing properties of sol-gel derived nickel oxide thin film," *Sensors And Actuators B: Chem.*, vol. 182, pp. 125–133, 2013.
- [27] M. K. Deore, "Synthesis, characterisation and gas sensing application of nano ZnO material," *Inter. J. of Nanoparticles*, vol. 7. 1, pp. 57–72, 2014.
- [28] D. Ju, H. Xu, Z. Qiu, J. Guo, J. Zhang, and B. Cao, "Highly sensitive and selective triethylamine-sensing properties of nanosheets directly grown on ceramic tube by forming NiO/ZnO PN heterojunction," *Sensors And Actuators: B Chem.*, vol. 200, pp. 288–296, 2014.

## Références

---

- [29] H. Sefardjella, “Propriétés opto-électriques des films minces du dioxyde d’étain”, Thèse de Doctorat, Université de Skikda, 2015.
- [30] A. B. Djurišić, X. Liu, and Y. H. Leung, *phys. Status Solidi RRL*, 8 (2014) 123-132.
- [31] Chourouk NASSIRI, “Contribution à l’étude des propriétés structurales, optiques et électriques des couches minces de dioxyde d’étain (SnO<sub>2</sub>) dopé (Fer, Antimoine, Fluor)”, Thèse de Doctorat, Université Mohammed V-Rabat, 2017.
- [32] <https://www.google.com/search?q=%09+image+Piles+au+lithium++%C3%A0+base+de+Sn2+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjW76-0oYrxAhUI-YUKHQzRAR0Q2->
- [33] Encyclopédie ; Encarta ; Version 2006.
- [34] S. Petit-Boileau, “Préparation de surface du PET avant métallisation : étude et comparaison des procédés laser excimère et plasma hors-équilibre”, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie de Paris, (2003).
- [35] Evelyne Darque-Ceretti, Eric Felder, “Adhésion et adhérence”, Collection Sciences et Techniques de l’ingénieur dirigée par Suzanne LAVAL, CNRS EDITION, Paris, 2003.
- [36] Noubel Guermat, Warda Daranféd, Kamel Mirouh, “Extended Wide Band Gap Amorphous ZnO Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis”, *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, Vol. 44, N°. 05, pp. 347 – 352, 2020.
- [37] Mehdi Khalfallah, Noubel Guermat, Warda Daranféd, Nadir Bouarissa, Haddi Bakhti, “Hydrophilic nickel doped porous SnO<sub>2</sub> thin films prepared by spray pyrolysis”, *Physica Scripta*, Vol. 95, N°. 09, pp. 095805, 2020.
- [38] N. Guermat, A. Bellel, S. Sahli, Y. Segui, P. Raynaud, “Thin plasma-polymerized layers of hexamethyldisiloxane for humidity sensor development”, *Thin Solid Films*, 517, pp. 4455-4460, 2009.
- [39] Noubel Guermat, “Elaboration and Characterization of Thin Water Molecule Sensitive Layers Deposited from Hexamethyldisiloxane”, *Atiner Conference Paper Series No: IND2016-1999*, pp. 01-13, 2016.

### Annexe

#### - Tableau des composants

	Composant	Symbole	nombre	observation
01	NE 555	U1	01	8 broches
02	transformateur abaisseur	TR <sub>1</sub>		220 AC/12 AC, la puissance 6 VA
03	régulateur de la tension	7812		7812
04	transistor de puissance	T1		2N3055 de type NPN
05	Interrupteur inverseur	I		/

- Interrupteur Marche/Arrêt de l'alimentation générale.
- Secteur 220 V AC/50Hz..
- bobine d'allumage de référence **PEUGEOT-404,504.**

### Résumé

Dans ce travail, nous présentons les résultats expérimentaux sur l'effet de la décharge à barrière diélectrique (DBD) sur un film de ZnO. L'évolution de l'état de surface de nos films est caractérisée par la mesure de l'angle de contact formé par une goutte d'eau distillée déposée sur la surface de ZnO et les valeurs du travail d'adhérence en fonction de temps de mesure et le volume de la goutte avant et après traitement par le générateur DBD. Nous avons conclu que l'angle de contact et le travail d'adhésion dépendent fortement des propriétés morphologiques de la surface des films de ZnO sans et avec traitement électrique.

**Mots clés :** DBD, ZnO, Angle de contact, travail d'adhérence.

### Abstract

In this work, we present the experimental results on the effect of dielectric barrier discharge (DBD) on a ZnO film. The evolution of the surface condition of our films is characterized by measuring the contact angle formed by a drop of distilled water deposited on the ZnO surface and the values of the work of adhesion as a function of time of measurement and volume of the drop before and after treatment by the DBD generator. We concluded that the contact angle and the work of adhesion strongly depend on the morphological properties of the surface of ZnO films without and with electrical treatment.

**Keywords:** DBD, ZnO, contact angle, adhesion work.

### ملخص

قمنا في هذا العمل بعرض النتائج التجريبية لعملية التفريغ الكهربائي العازلي (DBD) على سطح غشاء من ZnO, تطور حالة سطح الأغشية متعلق بقياس زاوية المماس التي تشكلها قطرة ماء مقطر التي نضعها فوق سطح ZnO. وعملية الالتصاق بدلالة زمن القياس وحجم قطرة الماء قبل وبعد المعالجة ب (DBD). استنتجنا بان زاوية المماس وعملية الالتصاق يتعلق غالبا بخصائص المورفولوجية لسطح أغشية ZnO سواءا بالمعالجة الكهربائية او بدونها  
**الكلمات الرئيسية :** DBD ، ZnO، زاوية التلامس ، عملية الالتصاق