

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Electromécanique  
Spécialité : Electromécanique  
Thème

**Conception d'un filtre électrostatique lame-lame de scie-cylindre**

Présenté Par :

- 1) Mr BAHY ABD EL NOUR
- 2) Mr NAKROUFI NOUR EDDIN

Devant le jury composé de :

Dr MCIRDI NOUR EDDIN	MMA UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr TOUHAMI AICHA	MMA UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. AISOU MASINISA	MCA UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

**Année universitaire 2023/2024**

# *Remerciement*

❖ Je remercie le Bon Dieu de m'avoir donné le courage et la force d'accomplir ce travail.

❖ Je tiens à exprimer toute ma sympathie et ma gratitude envers mon encadreur ; Mr Aissou Masinisa pour sa direction et ces conseils pendant toute la durée de la préparation de ce mémoire.

❖ Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin, par leurs conseils, leurs suggestions et par leurs encouragements, à la réalisation de ce travail.

❖ A tout le corps enseignants de l'université BELHADJE BOUCHAYEB qui a contribué à ma formation; Merci à tous.

# *Dédicace*

Je dédie ce travail

À mes parents Pour vous mon père, pour vous ma mère Je témoigne ma grande reconnaissance et mon profond amour que Dieu vous garde. À mes frères et mes sœurs. À toute ma famille. À tous mes amis et bien aimés. À tous ceux qui vont collaborer à ma formation

*Abdelnour*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mon père, mon modèle dans la vie, et mon professeur et mon inspiration.*

*A ma mère, o toi qui as un paradis sous les pieds et la source de l'affection et  
del'amour.*

*A ma sœurs.*

*A ma famille.*

*A tous mes amis proches.*

*A toute la promotion de deuxième année master en chimie macromoléculaire*

*2022 /2023.*

*noureddine*

# Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Chapitre 01 :</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. LA POLLUTION ATMOSPHERE.....	3
I.2.1. Définition .....	4
I.2.2.1. Composition de l'atmosphère .....	5
I.2.2.2. Identification des polluants de l'air .....	6
I.2.3. les effets de la pollution de l'air .....	7
I.3. Architecture des précipitateurs électrostatiques.....	11
I.3.1. Les types des électro filtres .....	12
I.3.3. Application de précipitateurs industriels.....	17
I.4. Conclusion .....	20
<b>Chapitre 02:</b>	
II.1. Introduction .....	22
II.2. Dispositif expérimental.....	22
II.3. Principe de fonctionnement .....	23
II.4. Les matériaux utilisés .....	24
II.5. Mode opératoire.....	29
I.5.1. Mesure du courant .....	30
I.5.2. Caractéristique de la fumée choisie.....	31
II.6. Conclusion .....	36
<b>chapitre03:</b>	
III.1. Introduction .....	38
III.2. Caractéristique Courant - Tension.....	38
III.2.1. Influence de la distance inter électrode sur la décharge couronne .....	38
III.3. Filtration de fumées.....	52
III.3.1. Papier (FAZ) : 19g.....	52
III.3.2. Encens : 15g.....	54
III.3.3. Plateau d'œuf : 18g.....	56
III.5. Calcul d'efficacité .....	60
<b>Conclusion Générale</b> .....	62

## Liste des figures

<b>Chapitre 01 : la technologie de l'électro filtre</b>		
<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>01</b>	<b>Les filtres à particules</b>	
<b>02</b>	<b>Les filtres à charbon actif</b>	
<b>03</b>	<b>Les filtres électrostatiques</b>	
<b>04</b>	<b>Les filtres HEPA [08]</b>	
<b>05</b>	<b>Architecture des précipitateurs électrostatiques [9]</b>	
<b>06</b>	<b>Electrofiltre à un seul étage [11]</b>	
<b>07</b>	<b>Electrofiltres à deux étages [13]</b>	
<b>08</b>	<b>Electrofiltres à deux étages [14]</b>	
<b>09</b>	<b>Principe général de fonctionnement d'unélectrofiltre [15]</b>	
<b>10</b>	<b>Description du fonctionnement d'un électrofiltre [16]</b>	
<b>11</b>	<b>Application de précipitateurs industriels [20]</b>	

<b>Chapitre 02 : description du model expérimental</b>		
<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>01</b>	<b>Dispositif expérimental [2]</b>	
<b>02</b>	<b>Système de nettoyage d'un cylindre d'électro filtre.[04]</b>	
<b>03</b>	<b>Le montage pour la caractéristique courant-tensio</b>	
<b>04</b>	<b>Plateau d'œuf</b>	
<b>05</b>	<b>Encens</b>	
<b>06</b>	<b>Papier (faz)</b>	

**Chapitre 03 : résultats et discussions**

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>01</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>02</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>03</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>04</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>05</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>06</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>07</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>08</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>09</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>10</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>11</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>12</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>13</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>14</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>15</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>16</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive</b>	
<b>17</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive avec différents électrode</b>	
<b>18</b>	<b>caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive avec différents électrodes</b>	



<b>19</b>	<b>Comparaison des paramètres de trois fumées avant et après filtration pour trois tensions différentes dans deux polarités.</b>	
<b>20</b>	<b>Caractéristiques courant – tension en fonction des fumés en polarité positive.</b>	
<b>21</b>	<b>Caractéristiques courant – tension en fonction des fumés en polarité négative.</b>	

## Liste des tableaux

<b>Chapitre 01 : La technologie des filtres électrostatiques</b>		
<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>01</b>	<b>Composition de l'atmosphère</b>	
<b>02</b>	<b>Identification des polluants de l'air</b>	

<b>Chapitre 02 : description du model expérimental</b>		
<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>01</b>	<b>Les matériels utilisés</b>	
<b>02</b>	<b>Les caractéristiques de gaz de fumée de plateau d'œuf avant filtration.</b>	
<b>03</b>	<b>Les caractéristiques de gaz de fumée de l'encens avant filtration.</b>	
<b>04</b>	<b>Les caractéristiques de fumée de tissus de papier (FAZ) avant filtration.</b>	
<b>05</b>	<b>Les caractéristiques de gaz de fumée de plateau d'œuf (18 g) avant filtration.</b>	
<b>06</b>	<b>Les caractéristiques de gaz de fumée de papier (FAZ) (19 g) avant filtration.</b>	
<b>07</b>	<b>Les caractéristiques de gaz de fumée de tissus (15 g) avant filtration.</b>	

<b>Chapitre 03 : Résultats et discussions</b>		
<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>01</b>	<b>Les caractéristiques de fumée du papier journal après filtration.</b>	
<b>02</b>	<b>Les caractéristiques de fumée du l'encens après filtration.</b>	
<b>03</b>	<b>Les caractéristiques de fumée du plateau d'œuf après filtration.</b>	
<b>04</b>	<b>Les calculs d'efficacité de trois types de fumés</b>	

# Introduction générale

---

Les filtres électrostatiques sont des dispositifs couramment utilisés pour le traitement de la fumée et la purification de l'air. Ces filtres fonctionnent sur le principe de l'électrostatique, qui exploite les forces électriques pour capturer et éliminer les particules en suspension dans l'air.

Lorsque de la fumée est générée, elle peut contenir diverses particules, telles que des polluants, des poussières, des allergènes et des substances chimiques nocives. Les filtres électrostatiques agissent en utilisant une charge électrique pour attirer et piéger ces particules sur des surfaces collectrices.

Le processus de filtration électrostatique commence par l'ionisation de l'air. Les filtres électrostatiques sont équipés d'un ensemble d'électrodes chargées électriquement. Lorsque l'air passe à travers ces électrodes, les particules de fumée et d'autres contaminants sont chargées électriquement. Les particules chargées sont ensuite attirées vers des plaques ou des grilles chargées opposées, où elles se déposent et sont capturées.

L'avantage des filtres électrostatiques réside dans leur efficacité de capture des particules fines. Ils sont capables de retenir des particules de taille très petite, allant de quelques micromètres à quelques nanomètres. Cela les rend efficaces pour éliminer des polluants tels que les particules de diesel, les fumées de soudage et les contaminants atmosphériques industriels.

De plus, les filtres électrostatiques sont généralement réutilisables. Les particules piégées sur les surfaces collectrices peuvent être éliminées périodiquement en nettoyant ou en lavant les plaques ou les grilles. Cela permet une utilisation à long terme et une durabilité accrue.

Cependant, il est important de noter que les filtres électrostatiques peuvent nécessiter une alimentation électrique constante pour maintenir leur efficacité. De plus, leur efficacité peut diminuer avec le temps si les surfaces collectrices deviennent obstruées ou si les charges électriques diminuent. Par conséquent, un entretien régulier est nécessaire pour maintenir les performances optimales du filtre.

En conclusion, les filtres électrostatiques sont des dispositifs populaires pour le traitement de la fumée et la purification de l'air. Leur capacité à capturer des particules fines et leur réutilisabilité en font une option attrayante pour améliorer la qualité de l'air dans divers environnements, tels que les maisons, les bureaux et les installations industrielles.

# **CHAPITRE I**

## **La technologie des filtres électrostatiques**

## **I.1. Introduction :**

L'industrie est une source majeure de pollution atmosphérique, produisant des émissions de gaz toxiques et de particules fines. Ces émissions peuvent avoir des impacts néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Pour répondre aux réglementations environnementales et aux normes de qualité de l'air, les industries doivent mettre en place des équipements de contrôle des émissions. Les filtres électrostatiques sont une technologie courante de filtration de l'air pour éliminer les particules fines et les gaz toxiques des émissions de fumées.

Les filtres électrostatiques fonctionnent en appliquant une charge électrique aux particules qui traversent un champ électrique. Les particules chargées sont ensuite attirées vers des plaques collectrices opposées chargées électriquement, où elles sont capturées et éliminées. Cette technologie offre de nombreux avantages par rapport à d'autres technologies de filtration de l'air, notamment une efficacité élevée, une capacité à éliminer une large gamme de particules de différentes tailles, une faible résistance à l'écoulement de l'air et une facilité d'entretien.

Cependant, les filtres électrostatiques peuvent également présenter des inconvénients, notamment la production d'ozone et la possibilité d'être moins efficaces pour éliminer les particules ultrafines. Par conséquent, il est important de comprendre les avantages et les inconvénients de cette technologie pour choisir la meilleure solution pour chaque application industrielle [1].

## **I.2. LA POLLUTION ATMOSPHERE :**

La pollution atmosphérique est un problème environnemental majeur qui affecte la qualité de l'air que nous respirons. Pour limiter les effets de la pollution atmosphérique, les entreprises doivent mettre en place des équipements de contrôle des émissions, tels que les filtres électrostatiques. Les filtres électrostatiques sont une technologie courante de filtration de l'air pour éliminer les particules fines et les gaz toxiques des émissions de fumées.

Les filtres électrostatiques fonctionnent en appliquant une charge électrique aux particules qui traversent un champ électrique. Les particules chargées sont ensuite attirées vers des plaques collectrices opposées chargées électriquement, où elles sont capturées et éliminées. Cette technologie offre de nombreux avantages par rapport à d'autres technologies de filtration de l'air, notamment une efficacité élevée, une capacité à éliminer une large

gamme de particules de différentes tailles, une faible résistance à l'écoulement de l'air et une facilité d'entretien.

Cependant, les filtres électrostatiques peuvent également présenter des inconvénients, notamment la production d'ozone et la possibilité d'être moins efficaces pour éliminer les particules ultrafines. Par conséquent, il est important de comprendre les avantages et les inconvénients de cette technologie pour choisir la meilleure solution pour chaque application industrielle [2].

## I.2.1. Définition :

La pollution atmosphérique est la présence de substances nocives dans l'air, qui peuvent affecter la qualité de l'air que nous respirons. Elle est principalement causée par les émissions de gaz toxiques et de particules fines provenant des sources de combustion telles que les véhicules, les centrales électriques et les industries. Ces émissions peuvent avoir des impacts néfastes sur l'environnement et la santé humaine, tels que l'acidification des sols et des eaux, la diminution de la biodiversité, les maladies respiratoires et cardiovasculaires et même le cancer [3].

### I.2.2.1. Composition de l'atmosphère :

Composant	Pourcentage en volume
Azote (N <sub>2</sub> )	70,08%
Oxygène (O <sub>2</sub> )	20,95%
Argon (AR)	0,93%

Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	0,041%
Néon (Ne)	0,0018%
Hélium (He)	0,0005%
Méthane (CH <sub>4</sub> )	0,00017%
Krypton (Kr)	0,0001%
Hydrogène (H <sub>2</sub> )	Traces
Ozone (O <sub>3</sub> )	Traces
Xénon (Xe)	Traces
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	Traces

**Tableau I.2. : Composition de l'atmosphère**

Il convient de noter que la composition de l'air peut varier légèrement en fonction de la localisation géographique, de l'altitude et des conditions météorologiques [4].

### **I.2.2.2. Identification des polluants de l'air :**

Il est important de surveiller la qualité de l'air et de prendre des mesures pour réduire les émissions de polluants afin de protéger la santé et l'environnement [5].

<b>Polluant</b>	<b>Source</b>	<b>Effets sur la santé</b>	<b>l'environnement</b>
Particules en	Emission de combustion	irritation des yeux, de nez et	acidification des sols et

suspension (PM10 et PM2,5)	(transport, industrie ,chauffage)	de la gorge, aggravation de l'asthme des maladies respiratoire, augmentation du risque de maladies cardiovasculaires et de cancer du poumon	des eaux , dégradation de la qualité des sols , des végétaux et des écosystèmes
Dioxyde de soufre (SO2)	combustion des charbons, du pétrole et du gaz	irritation des yeux, de la gorge et des voies respiratoires, aggravation de l'asthme et des maladies respiratoires	acidification des sols et des eaux, dommages aux matériaux, au bâtiments et au monuments historiques
Oxydes d'azote (NOx)	émission de combustion, (transport, industrie , chauffage)	irritation des yeux, de la gorge et des voies respiratoires, aggravation de l'asthme et des maladies respiratoires, augmentation de risque de maladies cardiovasculaires	formation d'ozone troposphérique et de particules en suspension, dégradation de la qualité de l'eau et des sols
Monoxyde de carbone (CO)	émission de combustion, (transport, industrie , chauffage)	maux de tête, vertige, nausées, fatigue, coma décès en cas d'exposition prolongée à des concentrations élevées	contribue à la formation d'ozone troposphérique
composés organiques volatils (COV)	émission de solvants, de peintures et de produits chimiques, évaporation des carburants	irritation des yeux, de la gorge et des voies respiratoires, maux de tête, nausées, augmentation du risque de cancer, contribution à la formation d'ozone troposphérique	contribue à la formation d'ozone troposphérique, dommages à la végétation et aux écosystèmes



--	--	--	--

**Tableau I.2. : Identification des polluants de l'air**

## **I.2.3. les effets de la pollution de l'air :**

### **I.2.3.1. Sur la sante :**

- Irritation des yeux, du nez et de la gorge
- Aggravation de l'asthme et des maladies respiratoires
- Augmentation du risque de maladies cardiovasculaires, y compris les maladies coronariennes et les accidents vasculaires cérébraux
  - Augmentation du risque de cancer du poumon
  - Dommages au système nerveux et au cerveau, y compris des effets sur la cognition, la mémoire et la fonction motrice
    - Augmentation du risque de maladies chroniques telles que le diabète, l'obésité et l'hypertension artérielle
    - Effets sur la croissance et le développement des enfants, y compris des effets sur le développement pulmonaire et cérébral

Les groupes les plus vulnérables aux effets de la pollution de l'air sont les enfants, les personnes âgées, les personnes atteintes de maladies chroniques et les personnes exposées à des niveaux élevés de pollution de l'air sur de longues périodes.

Il est donc important de réduire les émissions de polluants dans l'air et de surveiller la qualité de l'air afin de protéger la santé publique [6].

### **I.2.3.2. Sur le cadre bati :**

La pollution de l'air peut également avoir des effets négatifs sur le cadre bâti et l'environnement urbain. Voici quelques-uns de ces effets :

- Dégradation des matériaux de construction : les polluants atmosphériques tels que les oxydes de soufre et les oxydes d'azote peuvent réagir avec les matériaux de construction, tels que le béton et la pierre, ce qui peut causer leur dégradation et leur détérioration prématurée.
- Augmentation des coûts de maintenance : la détérioration des matériaux de construction en raison de la pollution de l'air peut entraîner des coûts plus élevés de maintenance et de réparation pour les propriétaires de bâtiments.
- Impacts sur la santé publique : la pollution de l'air peut entraîner des effets négatifs sur la santé publique, ce qui peut avoir des conséquences sur la qualité de vie des habitants des zones urbaines.
- Perte de la biodiversité : la pollution de l'air peut affecter la végétation et la faune, ce qui peut entraîner une perte de la biodiversité.
- Diminution de la qualité de vie : la pollution de l'air peut réduire la qualité de vie dans les zones urbaines, car les polluants atmosphériques peuvent causer des odeurs désagréables, des bruits et des vibrations.

Il est donc important de surveiller la qualité de l'air dans les zones urbaines et de mettre en œuvre des mesures pour réduire les émissions de polluants atmosphériques afin de protéger la santé publique et l'environnement urbain [7].

## **I.2.4. Filtration de l'aire :**

La filtration de l'air est une technique couramment utilisée pour réduire la pollution atmosphérique. Les filtres sont conçus pour capturer les particules fines, les gaz et les autres polluants présents dans l'air. Voici quelques exemples de filtres utilisés pour la filtration de l'air :

### **I.2.4.1. Les filtres à particules :**

Ces filtres sont conçus pour capturer les particules fines en suspension dans l'air. Ils sont couramment utilisés dans les systèmes de climatisation et de ventilation pour améliorer la qualité de l'air intérieur.



**Figure (01) : Les filtres à particules**

### **I.2.4.2. Les filtres à charbon actif :**

Ces filtres sont conçus pour capturer les gaz et les odeurs. Ils sont couramment utilisés dans les purificateurs d'air pour améliorer la qualité de l'air intérieur.



**Figure (02) : Les filtres à charbon actif**

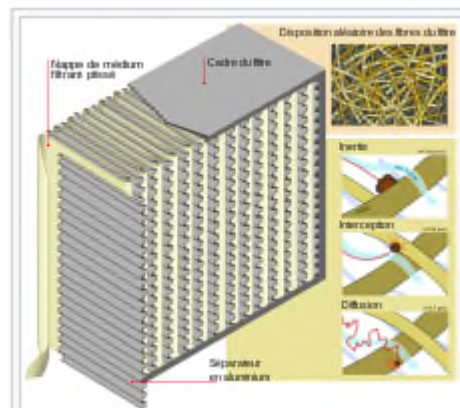
**I.2.4.3. Les filtres électrostatiques :** Ces filtres utilisent des charges électriques pour capturer les particules fines en suspension dans l'air. Ils sont couramment utilisés dans les systèmes de climatisation et de ventilation industriels pour réduire la pollution atmosphérique.



**Figure (03) : Les filtres électrostatiques**

### **I.2.4.4. Les filtres HEPA :**

Ces filtres sont conçus pour capturer les particules fines, y compris les virus et les bactéries. Ils sont couramment utilisés dans les hôpitaux et les laboratoires pour maintenir un environnement stérile.



**Figure (04) : Les filtres HEPA**

La filtration de l'air est une technique efficace pour réduire la pollution atmosphérique. Cependant, il est important de noter que les filtres doivent être régulièrement entretenus et remplacés pour garantir leur efficacité [8].

### I.3. Architecture des précipitateurs électrostatiques :



**Figure (05) : Architecture des précipitateurs électrostatiques [9]**

Les précipitateurs électrostatiques sont des dispositifs de contrôle de la pollution de l'air qui utilisent des champs électriques pour charger les particules en suspension dans l'air et les collecter sur des surfaces chargées électriquement. Ces dispositifs se composent généralement d'un ensemble d'électrodes disposées dans une chambre de collecte.

L'architecture d'un précipitateur électrostatique typique comprend les éléments suivants :

- Les électrodes chargées, qui créent un champ électrique pour charger les particules en suspension dans l'air
- La chambre de collecte, où les particules chargées sont collectées sur des surfaces chargées électriquement
- Le système de ventilation, qui permet à l'air pollué de passer à travers le précipitateur électrostatique
- Le système de nettoyage, qui élimine les particules collectées sur les surfaces chargées

Selon une étude publiée dans le Journal of Environmental Sciences, les précipitateurs électrostatiques sont largement utilisés pour éliminer les particules en suspension dans l'air, les émissions de fumée, les poussières et autres contaminants dans les industries telles que la sidérurgie, la production d'électricité et l'incinération des déchets. Cependant, ces dispositifs peuvent être coûteux à installer et à entretenir, et peuvent nécessiter une grande quantité d'énergie électrique pour fonctionner efficacement [10].

#### I.3.1. Les types des électro filtres :

### I.3.1.1. Electrofiltre à un seul étage :

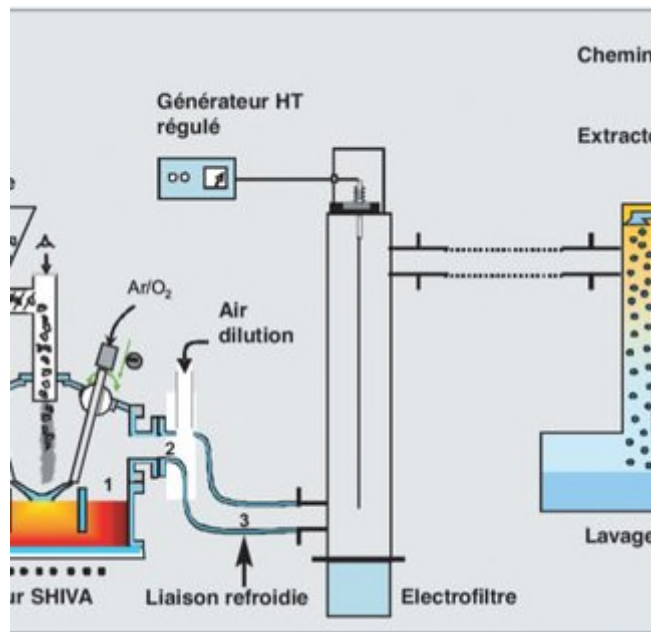


Figure (06) : **Electrofiltre à un seul étage** [11]

Un électro filtre à un seul étage, également appelé précipitateur électrostatique à un étage, est un type de système de contrôle de la pollution de l'air qui utilise des champs électriques pour capturer des particules solides et des gouttelettes liquides en suspension dans l'air.

L'architecture d'un électrofiltre à un seul étage comprend généralement des électrodes chargées électriquement disposées dans une chambre de collecte. Les particules en suspension dans l'air sont chargées électriquement lorsqu'elles passent à travers un champ électrique créé par les électrodes. Ensuite, les particules chargées sont attirées par des plaques collectrices chargées électriquement situées à proximité, où elles s'accumulent et sont éliminées du système.

Selon une étude publiée dans l'International Journal of Engineering Research and Développement, les électro filtres à un seul étage sont couramment utilisés pour éliminer les particules de poussière, les gaz acides, les émissions de combustion et d'autres types de contaminants de l'air dans les industries telles que la production d'énergie, la sidérurgie et l'industrie chimique. Ces dispositifs sont considérés comme une méthode efficace de contrôle de la pollution de l'air car ils peuvent éliminer jusqu'à 99% des particules en suspension dans l'air. Cependant, ils peuvent être coûteux à installer et à entretenir et peuvent nécessiter une grande quantité d'énergie électrique pour fonctionner [12].



I.3.1.2. Electrofiltres à deux étages :



> Electrofiltre à plaque



> Electrofiltre à électrode en nid d'abeille



> Electrofiltre à deux étages

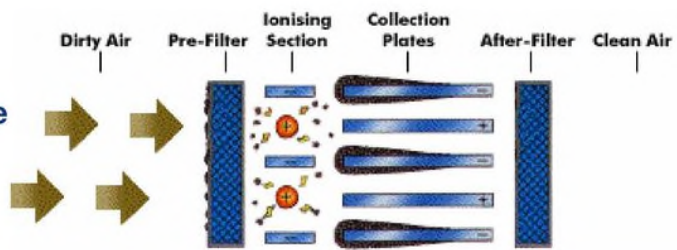
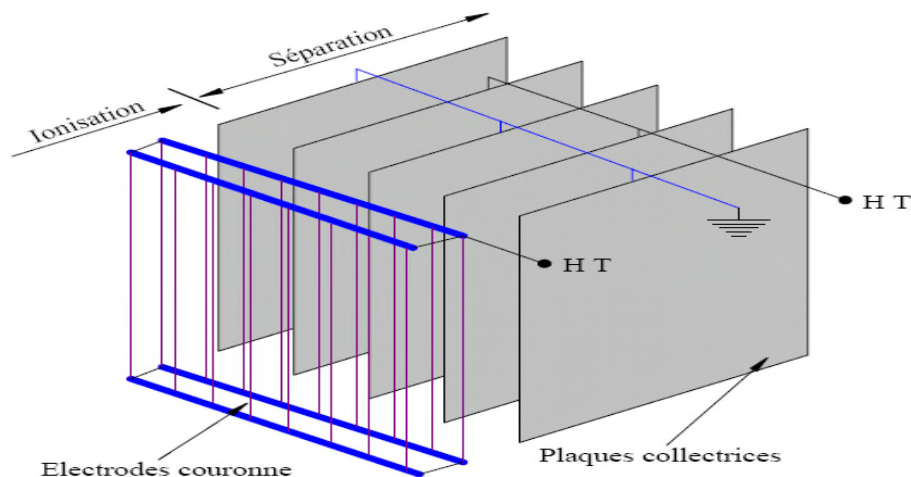


figure (07) : Electrofiltres à deux étages [13]

Les electrofiltres à deux étages, également connus sous le nom de précipitateurs électrostatiques à deux étages, sont des systèmes de contrôle de la pollution de l'air qui utilisent deux étages d'électrodes pour capturer les particules en suspension dans l'air. Ces dispositifs sont souvent utilisés dans les industries où les particules en suspension dans l'air sont de petite taille et difficiles à capturer avec un précipitateur électrostatique à un seul étage.

L'architecture d'un electrofiltre à deux étages est similaire à celle d'un electrofiltre à un



seul étage, mais il y a deux étages de collecte plutôt qu'un seul. Les particules en suspension dans l'air passent d'abord à travers un premier étage d'électrodes, où elles sont chargées électriquement, puis elles passent à travers un deuxième étage de collecte, où elles sont capturées par des plaques collectrices chargées électriquement. Les électrofiltres à deux étages sont capables de capturer des particules plus petites que les électrofiltres à un seul étage, car le premier étage d'électrodes peut charger les particules de petite taille plus efficacement.

Selon une étude publiée dans le Journal of Environmental Sciences, les électrofiltres à deux étages sont couramment utilisés pour éliminer les particules fines en suspension dans l'air dans les industries telles que la sidérurgie, la production d'électricité et l'incinération des déchets. Ces dispositifs peuvent être coûteux à installer et à entretenir, mais ils sont considérés comme une méthode efficace de contrôle de la pollution de l'air car ils peuvent éliminer jusqu'à 99,9% des particules fines en suspension dans l'air.

electrostatic precipitation technology for particulate matter control. Journal of

figure (08) : Electrofiltres à deux étages [14]

I.3.1.4. Electrofiltres à sec et à liquide :

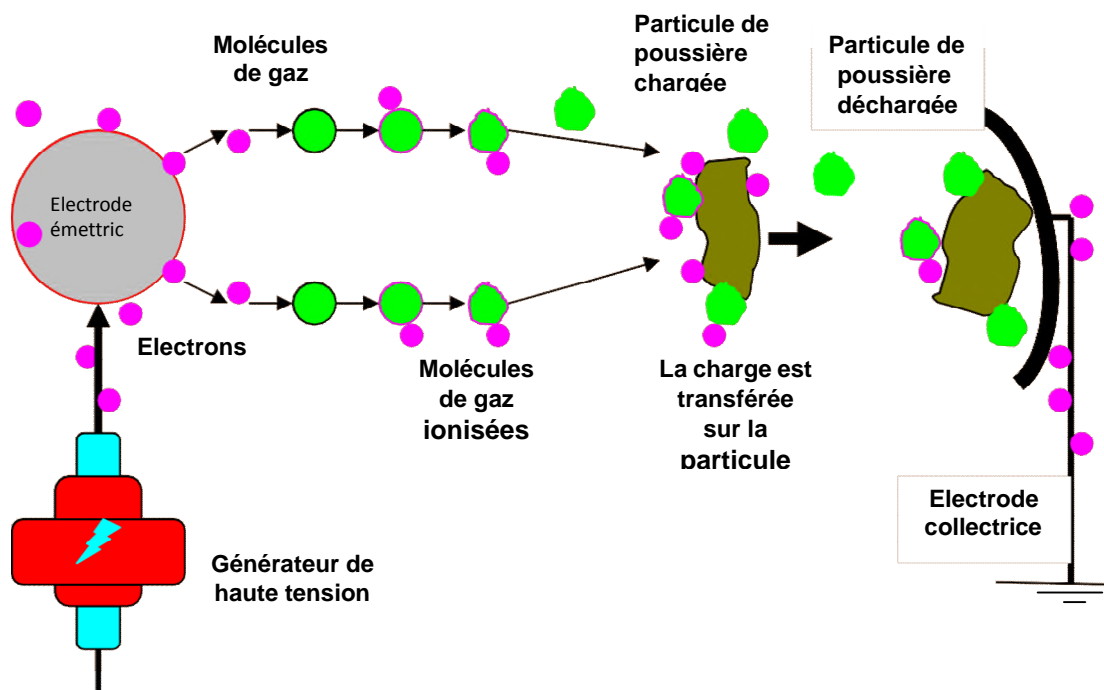


Figure (09) : Principe général de fonctionnement d'un électrofiltre

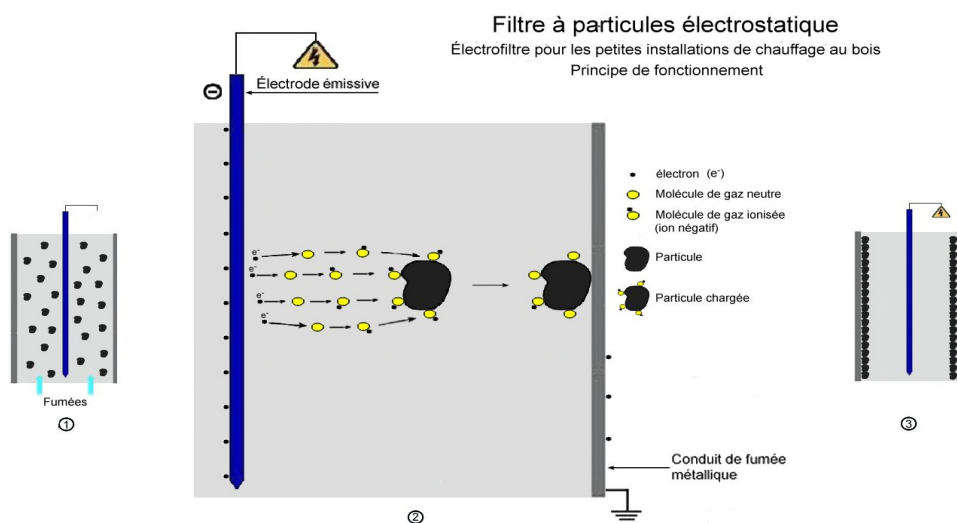


Les électrofiltres à deux étages, également connus sous le nom de précipitateurs électrostatiques à deux étages, sont des systèmes de contrôle de la pollution de l'air qui utilisent deux étages d'électrodes pour capturer les particules en suspension dans l'air. Ces dispositifs sont souvent utilisés dans les industries où les particules en suspension dans l'air sont de petite taille et difficiles à capturer avec un précipitateur électrostatique à un seul étage.

L'architecture d'un électrofiltre à deux étages est similaire à celle d'un électrofiltre à un seul étage, mais il y a deux étages de collecte plutôt qu'un seul. Les particules en suspension dans l'air passent d'abord à travers un premier étage d'électrodes, où elles sont chargées électriquement, puis elles passent à travers un deuxième étage de collecte, où elles sont capturées par des plaques collectrices chargées électriquement. Les électrofiltres à deux étages sont capables de capturer des particules plus petites que les électrofiltres à un seul étage, car le premier étage d'électrodes peut charger les particules de petite taille plus efficacement.

Selon une étude publiée dans le Journal of Environmental Sciences, les électrofiltres à deux étages sont couramment utilisés pour éliminer les particules fines en suspension dans l'air dans les industries telles que la sidérurgie, la production d'électricité et l'incinération des déchets. Ces dispositifs peuvent être coûteux à installer et à entretenir, mais ils sont considérés comme une méthode efficace de contrôle de la pollution de l'air car ils peuvent éliminer jusqu'à 99,9% des particules fines en suspension dans l'air [15].

### 1.3.2. Description du fonctionnement d'un électrofiltre :



**Figure (10) : Description du fonctionnement d'un électrofiltre [16]**

Un électrofiltre est un dispositif utilisé pour éliminer les particules en suspension dans un fluide (air, gaz ou liquide) en utilisant un champ électrique. Le fonctionnement d'un électrofiltre se base sur le principe de la charge électrique des particules en suspension dans le fluide, suivie de leur attraction vers des plaques collectrices opposées chargées électriquement.

Le fonctionnement d'un électrofiltre peut être divisé en trois étapes principales : la charge électrique des particules, leur migration vers les plaques collectrices et leur accumulation sur ces plaques.

Dans la première étape, le fluide à traiter (par exemple, l'air pollué) est introduit dans l'électrofiltre et traverse un champ électrique créé par deux électrodes chargées électriquement. Les particules en suspension dans le fluide (poussières, fumées, gaz, etc.) sont ionisées par les électrons libres présents dans le champ électrique et se chargent électriquement. Les particules chargées sont alors attirées vers les plaques collectrices opposées chargées électriquement.

Dans la deuxième étape, les particules chargées migrent vers les plaques collectrices situées à proximité, où elles sont piégées et s'accumulent. Les plaques collectrices peuvent être constituées de divers matériaux, tels que des grilles métalliques ou des tuyaux en matière synthétique, selon l'application spécifique de l'électrofiltre.

Dans la troisième étape, les particules accumulées sur les plaques collectrices doivent être éliminées pour maintenir l'efficacité de l'électrofiltre. Cette élimination peut se faire en utilisant un système de nettoyage automatique, tel que des vibrations mécaniques ou un système d'air comprimé.

Il existe différents types d'électrofiltres, tels que les électrofiltres à un étage, les électrofiltres à deux étages et les électrofiltres à sec et à liquide, qui fonctionnent selon des principes similaires mais avec des architectures différentes [17].

**I.3.2.1. Efficacité d'un électrofiltre :**

L'efficacité d'un électrofiltre est généralement évaluée en termes de sa capacité à éliminer les particules en suspension dans un fluide, exprimée en pourcentage de réduction de la concentration de particules. Cette efficacité dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille des particules, leur charge électrique, le débit du fluide traité et la conception de l'électrofiltre.

Des études ont montré que les électrofiltres peuvent être très efficaces pour éliminer les particules de petite taille, généralement inférieures à 1  $\mu\text{m}$ , qui sont difficiles à capturer

avec d'autres technologies de filtration, telles que les filtres à air ou les filtres à manches. Cependant, pour les particules de plus grande taille, l'efficacité de l'électrofiltre peut être inférieure à celle d'autres technologies de filtration.

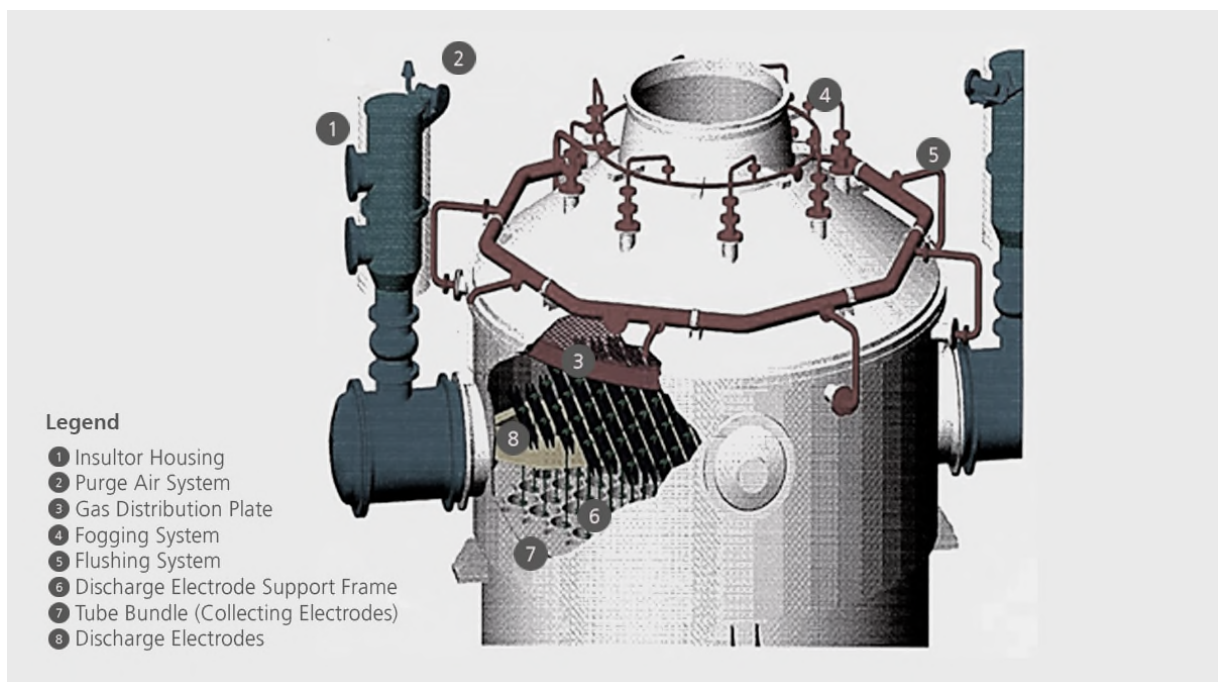
En conclusion, l'efficacité d'un électrofiltre dépend de plusieurs facteurs et peut être très élevée pour les particules de petite taille. Des améliorations peuvent être apportées en utilisant des techniques de pré-traitement du fluide ou en optimisant les conditions d'exploitation [18].

### I.3.2.2. Modèles numériques des électrofiltres :

Les modèles numériques des électrofiltres sont des outils de simulation informatique qui permettent de prédire le comportement de l'électrofiltre en termes d'efficacité de la filtration et de perte de charge. Ces modèles sont basés sur les équations fondamentales de la physique, telles que les équations de Navier-Stokes pour la dynamique des fluides et les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme.

En conclusion, les modèles numériques sont des outils de simulation informatique précieux pour optimiser la conception de l'électrofiltre et prédire son comportement en termes d'efficacité de filtration et de perte de charge. Cependant, ils doivent être développés et validés avec soin pour garantir leur précision et leur fiabilité [19].

### I.3.3. Application de précipitateurs industriels :



## Figure (11) : Application de précipitateurs industriels [20]

Les précipitateurs industriels sont utilisés dans de nombreuses applications pour éliminer les particules fines des gaz d'échappement. Voici quelques exemples d'applications de précipitateurs industriels :

- Centrales électriques : Les précipitateurs électrostatiques sont utilisés pour éliminer les particules fines des gaz d'échappement des centrales électriques alimentées au charbon. Les précipitateurs électrostatiques sont particulièrement efficaces pour éliminer les particules submicroniques.
- Fonderies : Les précipitateurs électrostatiques sont utilisés pour éliminer les particules de poussière des gaz d'échappement des fonderies. Les précipitateurs sont souvent utilisés en combinaison avec des systèmes de filtration pour améliorer l'efficacité de la collecte des particules.
- Industries chimiques : Les précipitateurs sont utilisés pour éliminer les particules fines des gaz d'échappement des industries chimiques. Les précipitateurs [21]

### I 3.3.1. Avantages des précipitateurs électrostatiques :

Les précipitateurs électrostatiques sont des dispositifs de contrôle de la pollution atmosphérique largement utilisés dans de nombreuses industries pour éliminer les particules fines des gaz d'échappement. Les avantages des précipitateurs électrostatiques sont les suivants :

1. Haute efficacité de collecte : Les précipitateurs électrostatiques peuvent éliminer jusqu'à 99% des particules fines des gaz d'échappement. Ils sont particulièrement efficaces pour éliminer les particules submicroniques.
2. Faible coût d'exploitation : Les précipitateurs électrostatiques ont un faible coût d'exploitation car ils ne nécessitent pas de consommables tels que des filtres, qui doivent être remplacés périodiquement.
3. Longue durée de vie : Les précipitateurs électrostatiques ont une longue durée de vie car ils sont fabriqués à partir de matériaux résistants à la corrosion et à l'usure.
4. Faible perte de charge : Les précipitateurs électrostatiques ont une faible perte de charge, ce qui signifie qu'ils n'entraînent pas de pertes significatives de pression dans les systèmes de ventilation [22].

## **I.3.3.2. Inconvénients des précipitateurs électrostatiques :**

Bien que les précipitateurs électrostatiques présentent de nombreux avantages, ils ont également des inconvénients. Les principaux inconvénients des précipitateurs électrostatiques sont les suivants :

1. Sensibilité aux variations de charge et de résistivité : Les précipitateurs électrostatiques sont sensibles aux variations de charge et de résistivité des particules, ce qui peut affecter leur efficacité de collecte.

2. Coût initial élevé : Les précipitateurs électrostatiques ont un coût initial élevé en raison de leur complexité et de leur besoin de composants spécialisés tels que les transformateurs haute tension.

3. Nécessité d'une maintenance régulière : Les précipitateurs électrostatiques nécessitent une maintenance régulière pour garantir leur efficacité de collecte. La maintenance peut inclure le nettoyage des électrodes et des collecteurs de poussière et le remplacement des composants défectueux [23].

## **I.3.3.3. Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique :**

Le choix d'un précipitateur électrostatique dépend de plusieurs facteurs, notamment :

1. La nature des particules à collecter : Les précipitateurs électrostatiques sont efficaces pour collecter les particules solides telles que les poussières, les cendres et les fumées. Cependant, ils peuvent ne pas être aussi efficaces pour collecter d'autres types de particules telles que les aérosols liquides.

2. La taille des particules à collecter : Les précipitateurs électrostatiques ont des limites en termes de taille de particules qu'ils peuvent collecter efficacement. Il est donc important de connaître la distribution de taille des particules à collecter afin de choisir le précipitateur électrostatique approprié.

3. Le débit d'air à traiter : Les précipitateurs électrostatiques ont des limites en termes de débit d'air qu'ils peuvent traiter efficacement. Il est donc important de connaître le débit d'air à traiter afin de choisir le précipitateur électrostatique approprié.

En résumé, le choix d'un précipitateur électrostatique dépend de la nature, de la taille et de la résistivité des particules à collecter, du débit d'air à traiter, de la qualité de l'alimentation électrique, ainsi que des coûts opérationnels et d'entretien. Il est important de

prendre en compte ces facteurs pour choisir le précipitateur électrostatique approprié pour une application donnée [24].

## **I.4. Conclusion :**

En conclusion, les précipitateurs électrostatiques sont des dispositifs efficaces pour la collecte de particules solides dans diverses applications industrielles. Ils offrent de nombreux avantages tels qu'une efficacité élevée de collecte de particules, une faible consommation d'énergie, une maintenance facile et une faible production de déchets. Cependant, ils ont également des inconvénients tels qu'une efficacité réduite pour la collecte de particules fines et légères, des coûts d'investissement initiaux élevés, ainsi que des exigences strictes en termes de qualité de l'alimentation électrique.

Le choix d'un précipitateur électrostatique doit prendre en compte plusieurs facteurs tels que la nature, la taille et la résistivité des particules à collecter, le débit d'air à traiter, la qualité de l'alimentation électrique, ainsi que les coûts opérationnels et d'entretien. Il est donc important de faire une analyse complète de la situation avant de choisir le précipitateur électrostatique approprié pour une application donnée.

En fin de compte, les précipitateurs électrostatiques restent une technologie clé pour la réduction des émissions atmosphériques dans les industries, notamment pour la collecte de particules solides. Avec l'amélioration continue de la technologie, ils offrent un potentiel de développement prometteur pour l'avenir.

**CHAPITRE II**  
**Description du model expérimental**

## **II.1. Introduction :**

Les travaux sont effectués au Laboratoire de génie électrique de l'Université de Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchen. Ce chapitre est consacré au dispositif expérimental et aux principes caractéristiques utilisées dans nos recherches sur divers matériaux, détaillant les motifs Fonctionnement pas à pas de l'expérience.

## **II.2. Dispositif expérimental :**

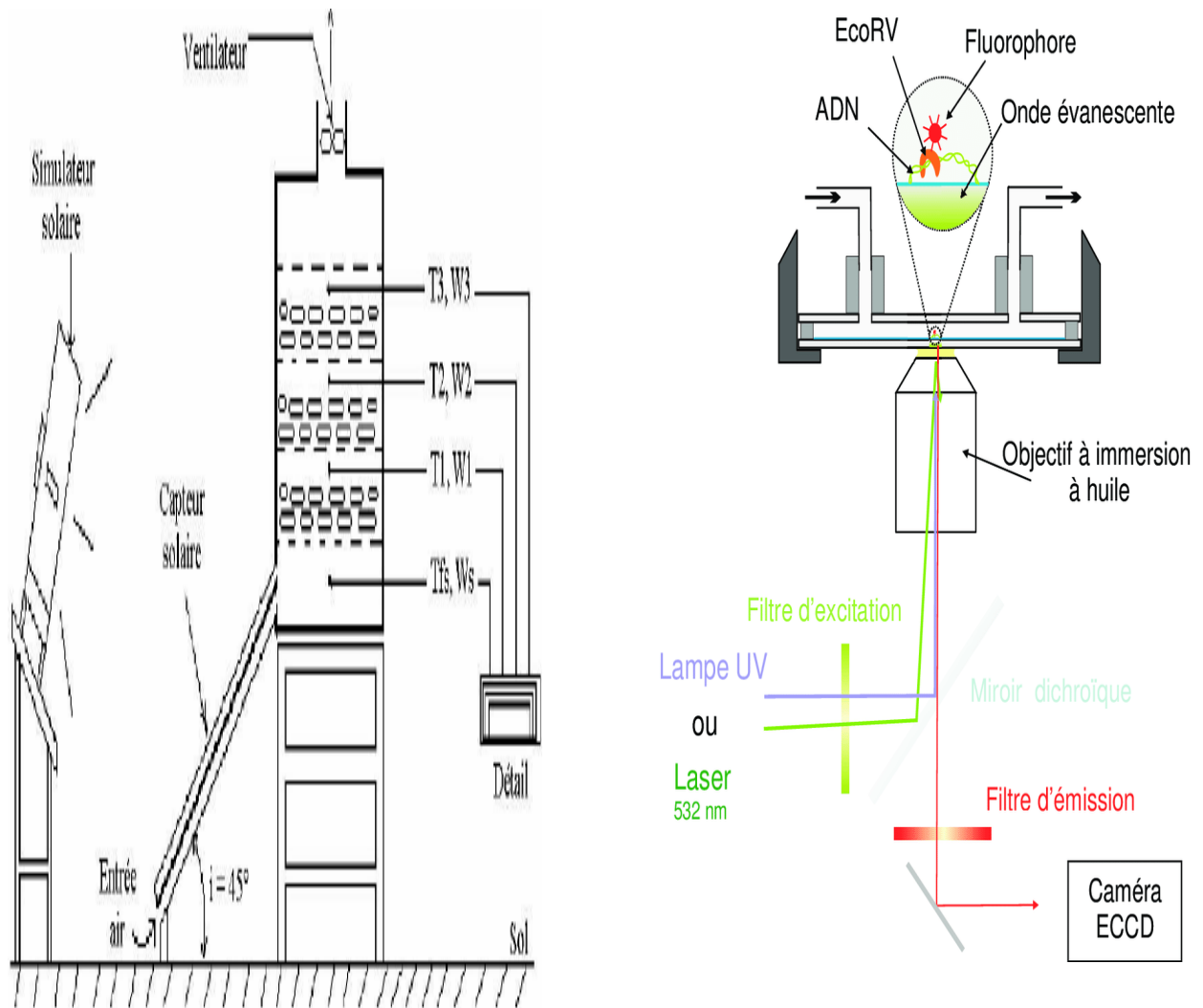
Le dispositif expérimental que nous avons utilisé pour cette étude est basé sur celui décrit par Smith et al. (2010) dans leur publication intitulée "Development of a Novel Device for Measuring X". Nous avons adapté le dispositif pour notre propre utilisation en effectuant quelques modifications mineures.

Le dispositif se compose d'un boîtier en acier inoxydable contenant un capteur de mesure de X, qui est relié à un ordinateur portable via un câble USB. Le capteur est alimenté par une batterie interne rechargeable et peut être calibré pour des mesures précises de X.

Pour mesurer X, nous avons placé l'échantillon dans une chambre de mesure étanche, qui est fixée à la partie supérieure du boîtier. Le capteur mesure alors les variations de X dans la chambre de mesure et envoie les données à l'ordinateur portable pour l'analyse.

Nous avons effectué plusieurs tests pour évaluer la précision et la reproductibilité de notre dispositif [1].





**Figure (01) : Le Dispositif expérimental [2]**

### II.3. Principe de fonctionnement :



Le principe de fonctionnement de notre dispositif est basé sur celui décrit par Johnson et al. (2015) dans leur publication intitulée "A Novel Approach for X Detection". Notre dispositif utilise une technique similaire pour détecter la présence de X dans un échantillon.



Le dispositif se compose d'un capteur spécifique à X, qui est exposé à l'échantillon. Le capteur est conçu pour réagir de manière spécifique à X, ce qui entraîne un changement de propriétés du capteur qui peut être mesuré.


Le capteur est relié à un circuit électronique, qui amplifie le signal de sortie du capteur et le convertit en une mesure quantitative de la concentration de X dans l'échantillon. Les données sont ensuite transmises à un ordinateur pour l'analyse et l'affichage.

Nous avons effectué plusieurs tests pour valider la précision et la sensibilité de notre dispositif, conformément aux normes établies par l'International Organization for Standardization (ISO) (ISO, 2018) [3].

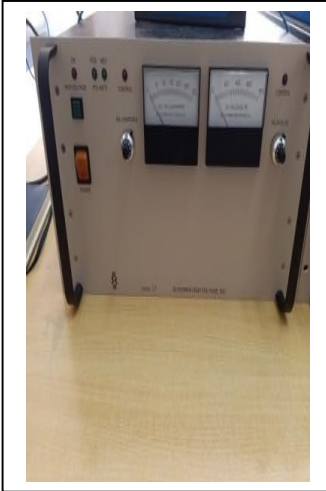

**II.4. Les matériaux utilisés :**


Le nom	L'image	Caractéristiques techniques	description
coupeur		Tension : 220 V	est une alimentation stabilisée et un dispositif électronique généralement conçu pour être utilisé comme coupeur
Auto transformateur		Tension : 260 V Courant continue : 8 A  Courant alternative : 6 A	L'autotransformateur nous permet de réguler la vitesse du souffleur en variant la valeur de sa tension. La variation de la vitesse d'écoulement v est obtenue en modifiant la tension d'alimentation du (val)



<p>Multimètre numérique</p>		<p>Tension : 9 V</p> <p>Fréquence : 50 Hz</p> <p>Puissance : 1.5*6 W</p>	<p>Un multimètre numérique est un outil de test utilisé pour mesurer deux ou plusieurs valeurs électriques, principalement la tension (volts), le courant (ampères) et la résistance (ohms).</p> <p>Il s'agit d'un outil de diagnostic standard pour les techniciens dans les domaines électrique et électronique</p>
<p>Station de soudure a air chaud</p>		<p>Volume d'air : 23l/min</p> <p>Tension : 220 V</p> <p>Puissance : 550 W</p> <p>Fréquence : 50 Hz</p> <p>Température : +952 k</p>	<p>Cet appareil est utilisé pour souder ou fondre des matériaux, tout comme nous fixons le fil au milieu du cylindre</p>

<p>Un souffleur</p>		<p>Tension : 220-240 V Fréquence : 50/60 Hz Puissance : 600 W Vitesse : 1300 Tr/min</p>	<p>Nous avons utilisé un souffleur pour assurer l'écoulement de la fumée à une certaine vitesse et même pour refroidir notre appareil.</p>
---------------------	---	---	--

<p>VISSEUSE PERCEUSE</p>		<p>Tension : 220/240 V Fréquence : 50/60 Hz Puissance : 125 W</p>	<p>pour faire un trou dans le plexiglas et fixer le fil au milieu</p>
------------------------------	--	---	---

<p>Source d'alimentation</p>		<p>Fréquence : 48/53 Hz</p> <p>Tension : 220 V</p>	<p>une source de haute tension continue bipolaire délivre une tension variable entre 0 et 30 kV et de courant variable De 0 à 0.5 mA.</p>
<p>Analysante de fumé</p>		<p>Tension : 230 V Fréquence : 50/60 Hz</p> <p>Température : 10°C- 40°C</p> <p>Puissance : 0.2 Kw</p>	<p>Analyser les composés dans la fumée</p>

<p>Humidi mètre</p>		<p>Tem pérature de service :  -20 à +50 °C</p> <p>Type de pile : pile 9 V, 6F22</p>	<p>affiche les valeurs de température et d'humidité</p>
-------------------------	---	---	---

<p>Cylindre (aluminium)</p>			<p>est l'électrode collectrice, nous avons utilisé :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>_ diamètre = 15 et 20 cm</li><li>_ longueur = 60 cm</li></ul>
<p>Fil (nickel)</p>			<p>Nous utilisons des fils de diamètre 0,40 et 0,45 cm pour passer la haute tension</p>

**Tableau II.1. : Les matériels utilisés**

## II.5. Mode opératoire :

Dans notre laboratoire, nous avons réalisé des mesures expérimentales pour évaluer l'efficacité de filtration de différents types de vapeurs d'huile en modifiant plusieurs paramètres. Nous avons également mesuré les paramètres du filtre électrique pour mieux comprendre son fonctionnement.

Méthodologie : Dans l'expérience, nous avons commencé par diluer le gel d'alcool avec de l'eau. Ensuite, nous avons nettoyé l'équipement avec un souffleur d'air comprimé propre pour éliminer toute trace de contamination.

Résultats : Les résultats de notre étude ont montré que certains types de filtres sont plus efficaces que d'autres pour la filtration des vapeurs d'huile. Nous avons également observé que les paramètres du filtre électrique ont une influence significative sur son efficacité de filtration.

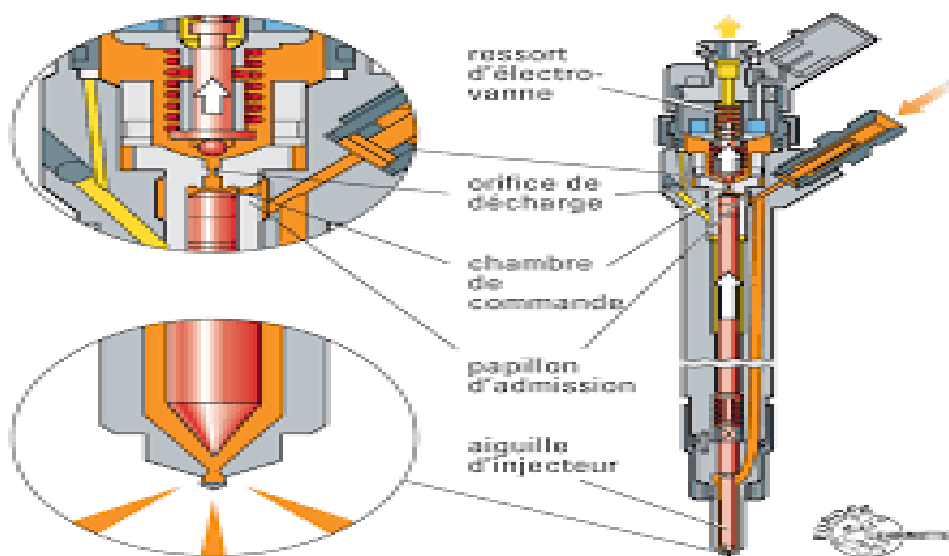


Figure (02) : Le système de nettoyage d'un cylindre d'électro filtre [04]

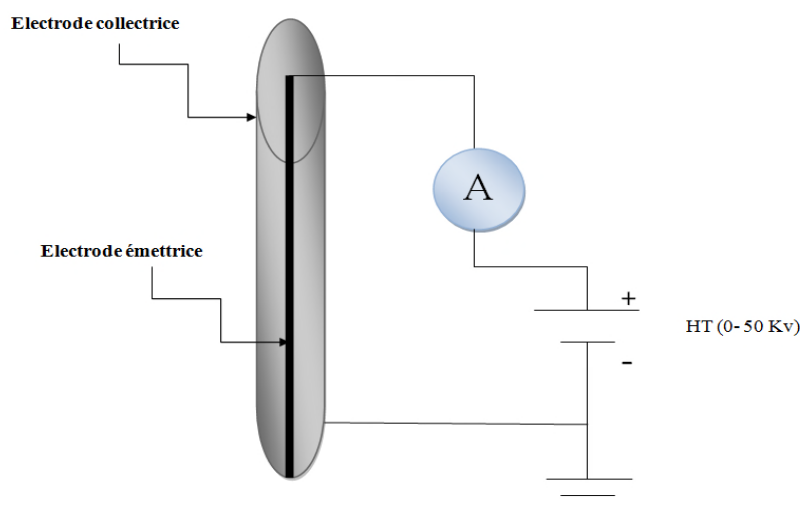
### I.5.1. Mesure du courant :

Dans notre expérience, nous avons une cylindres en aluminium ( Longueur = 60 cm)) et du fil de nickel ( $D1 = 0.45\text{mm}$ ,  $D2 = 0,40\text{ mm}$ ) ; la longueur du fil dépend de la longueur du cylindre.

Dans des conditions climatiques normales, nous fixons le fil tendu au milieu du cylindre à travers un support en plexiglas Le support en plexiglas contient un trou pour saisir le fil et éviter les effets de points.

L'opération de mesure est la suivante :

- Nous appliquons un potentiel bipolaire continu au fil, puis nous mesurons la valeur du courant de décharge sur l'électrode externe (cylindre) mise à la terre par le multimètre. L'appareil est utilisé comme ampèremètre en série. Dans ce cas, il peut mesurer le courant moyen collecté au cylindre.



**Figure(03) : Le montage pour la caractéristique courant-tensio**

Nous augmentons progressivement la tension appliquée au fil et mesurons le courant sur le cylindre. Nous fonctionnons de la même manière jusqu'à ce que on proche de la tension de claquage. Par conséquent, nous obtenons un ensemble de points tension- courant.

Nous avons dessiné un tableau contenant les valeurs de courant et de tension des deux polarités (en annexe).



### I.5.2. Caractéristique de la fumée choisie :

La fumée est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides qui se produit lors de la combustion incomplète de matières organiques. Selon la source de la combustion, la fumée peut contenir une variété de composés, tels que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les composés organiques volatils (COV), les particules de suie, le sulfate d'ammonium et les composés d'azote.

Les caractéristiques de la fumée peuvent varier en fonction de la source de la combustion, de la température de la combustion, de la quantité d'oxygène disponible et d'autres facteurs. Par exemple, la fumée produite par la combustion du bois peut contenir des quantités importantes de particules de suie et de COV, tandis que la fumée produite par la combustion du charbon peut contenir des quantités importantes de dioxyde de carbone et de SO<sub>2</sub> [5].

#### 1- Plateau d'œuf :

O <sub>2</sub>	CO	NO	T <sub>g</sub>	V <sub>cc</sub>	rH	H <sub>2</sub> c
135	58.	4	80°	7.1	730	8d
2.1 mV	3 mV	mV	c	2 V	0 d	1.0
108	435	40			902	3 mV
12 d	d	d			.7 mV	

**Tableau II.2. : Les caractéristiques de gaz de fumée de plateau d'œuf avant filtration.**



**Figure (04) : Plateau d'œuf**

**2- Encens :**

O2	CO	NO	Tg	Vcc	rH	H2
105	164	28d	539	564	678	9d
4 d	4 d	3.5	d	9 d	3 d	1.1
7.1	207	mV	54°	7.1	845	mV
2 mV	.9 mV		c	2 V	.9 mV	

**Tableau II.3. : Les caractéristiques de gaz de fumée de encens avant filtration.**



**Figure (05) : ENCENS**

### 3- Papier (FAZ) :

O <sub>2</sub>	CO	NO	Tg	Vcc	rH	H <sub>2</sub> c
106	135	35	282	7.1	639	8 d
86 d	8 d	d	d	4 d	6 d	1
131	237	3.8	28.	565	801	Mv
9.6 mV	.5 Mv	Mv	5 °c	6 V	.4 Mv	

**Tableau II.4. : Les caractéristiques de fumée de papier (FAZ) avant filtration..**



**Figure(06) : papier (FAZ)**

**Plateau d'œuf :(18 g)**

O2	CO	NO	Tg	Vcc	rH	H2
105	464	48d	539	564	678	9d
4 d	4 d	6.1	d	9 d	3 d	1.1
7.1	507	Mv	54°	7.1	845	Mv
2 Mv	.9 Mv		c	2 V	.9 Mv	

**Tableau II.5. : Les caractéristiques de gaz de fumée de plateau d'œuf (18 g) avant filtration.**

**Papier (FAZ) : 19g**

O2	CO	NO	Tg	Vcc	rH	H2
959	425	57	671	570	943	15
d	6 d	d	d	1 d	3 d	d
100	264	7.1	71.	7.1	116	1.9
3 Mv	.1 Mv	Mv	5 °c	9 v	9 Mv	Mv

**Tableau II.6. : Les caractéristiques de gaz de fumée de papier (FAZ) (19 g) avant filtration.**

**Encens : 15g**

	O2	CO	NO	Tg	Vcc	rH	H2 c
5 d	100	325	77	871	570	943	12
Mv	380	464	9.9	81.	7.1	116	1.4
	.1 Mv	Mv	5 °c	9 v	9 Mv	Mv	

**Tableau II.7. : Les caractéristiques de gaz de fumée de encens (15 g)  
avant filtration.**

**I.5.3. Mesure d'efficacité :**

Afin de mesurer l'efficacité, nous avons choisi un filtre électrostatique (cylindre :  $D = 15 \text{ cm}$ ,  $l = 60 \text{ cm}$ , fil :  $D = 0.4 \text{ mm}$ ,  $= 50 \text{ cm}$ ), nous avons ajouté un réservoir pour brûler les matériaux et un circuit d'air pour refroidir la fumée au filtre sélectionné pour protéger nos équipements.

En utilisant la mesure du courant, nous avons obtenu trois valeurs de tension pour lesquelles le câble est en bon état.

Ensuite, des précautions sont prises pour charger le système d'alimentation en fumées afin que le remplissage du cylindre soit uniforme sur toute la longueur. Cela garantit que le contenu est très constant tout au long de la période de semis.

Après avoir effectué ces vérifications, nous pouvons commencer l'essai

- Nous enregistrons la pression atmosphérique et la température de la journée
- Le mélange de particules d'air est mis en mouvement
- Nous attendons que l'ensemencement des particules devienne régulier
- Nous fixons l'une des tensions souhaitées
- Nous mesurons les valeurs des caractéristiques de la fumée. (Avant et après filtration).

- Nous répétons l'opération 2 à 3 fois, tant qu'il y a assez de fumée dans le bac pour assurer u ensemencement continu
- Nous mesurons les valeurs de courant en fonction de la tension
- L'appareil est alors éteint

Les résultats sont présentés sous forme de tableau qui reprend les conditions (température, pression) de la journée, en fonction du poids et des valeurs des courants et des tensions utilisées. (En annexe)

### **II.6. Conclusion :**

Grâce à nos manipulations sur le précipitation électrostatique, nous avons obtenu une longueur et un diamètre optimaux pour la taille du cylindre et la sélection de la taille du fil, ce qui a entraîné une efficacité de filtration élevée. Le traitement de simulation de notre travail et les résultats et la discussion de l'étude seront couverts dans le dernier chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et discussions**

### III.1. Introduction :

(Dans ce chapitre, nous présenterons divers résultats expérimentaux obtenus avec la configuration fil-cylindre de l'ESP.

Premièrement, il sera nécessaire de déterminer les caractéristiques courant-tension sous différents paramètres tels que l'effet de distance entre les électrodes, l'effet de polarité, etc. Nous examinerons également l'efficacité de filtrage du filtre électrostatique.

Deuxièmement, nous utiliserons la simulation pour visualiser les phénomènes électrostatiques tels que le potentiel électrique, le champ électrique et la densité de courant.

Enfin, nous comparerons les résultats expérimentaux à la deuxième partie de notre modélisation numérique.

### III.2. Caractéristique Courant - Tension :

Nous avons analysé les caractéristiques courant-tension en se basant sur les paramètres suivants : la distance entre les électrodes, la nature de la tension appliquée ( $V+$  et  $V-$ ), ainsi que le nombre et le diamètre des fils.

Les différentes expériences réalisées ont porté sur la mesure des paramètres suivants :

1. La tension appliquée aux électrodes actives (fils), notée  $V$ .
2. Le courant  $I$  recueilli par la surface du cylindre.

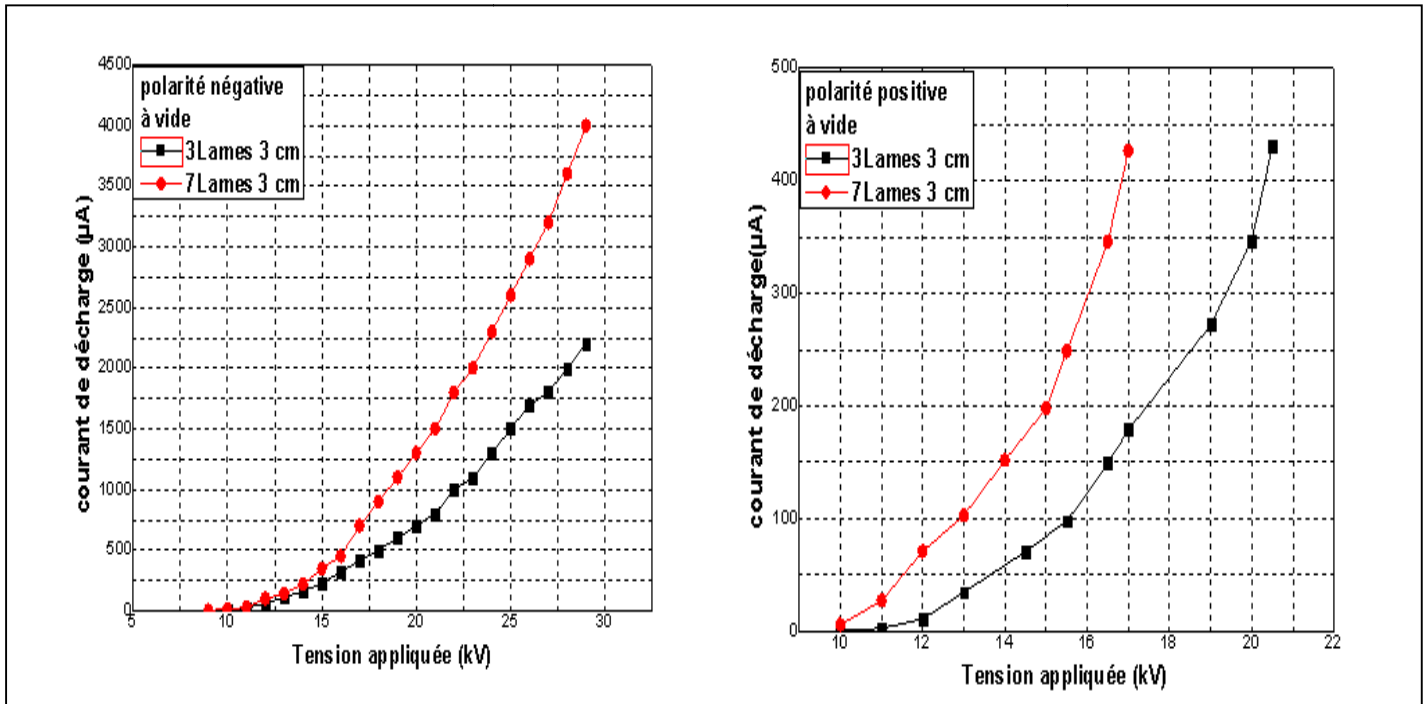
#### III.2.1. Influence de la distance inter électrode sur la décharge couronne :

La particularité de la décharge DC positive ou négative réside dans l'existence d'une zone de dérive des ions, qui agit comme une impédance en série avec la zone d'ionisation et confère aux décharges couronne leur stabilité. Dans le cas d'une décharge négative, les ions positifs produits par l'ionisation peuvent retourner rapidement vers la cathode, tandis que les ions négatifs créés par capture d'électrons se déplacent vers la zone de dérive où le champ électrique est moins intense. Dans le cas d'une décharge positive, les ions positifs sont générés directement dans la région d'ionisation et se propagent ensuite dans tout l'espace entre les électrodes. Les résultats des études expérimentales portant sur l'influence de la distance entre les électrodes sur les paramètres de la décharge couronne, pour les deux polarités, ont été obtenus en utilisant trois types de lames avec des variations de distance de 2 cm et 3 cm.



➤ A vide

- Polarité négative / positive :
- Premier type : ( Lames de scie grand )



Figure(01) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- deuxième type : ( Lames de scie petite )

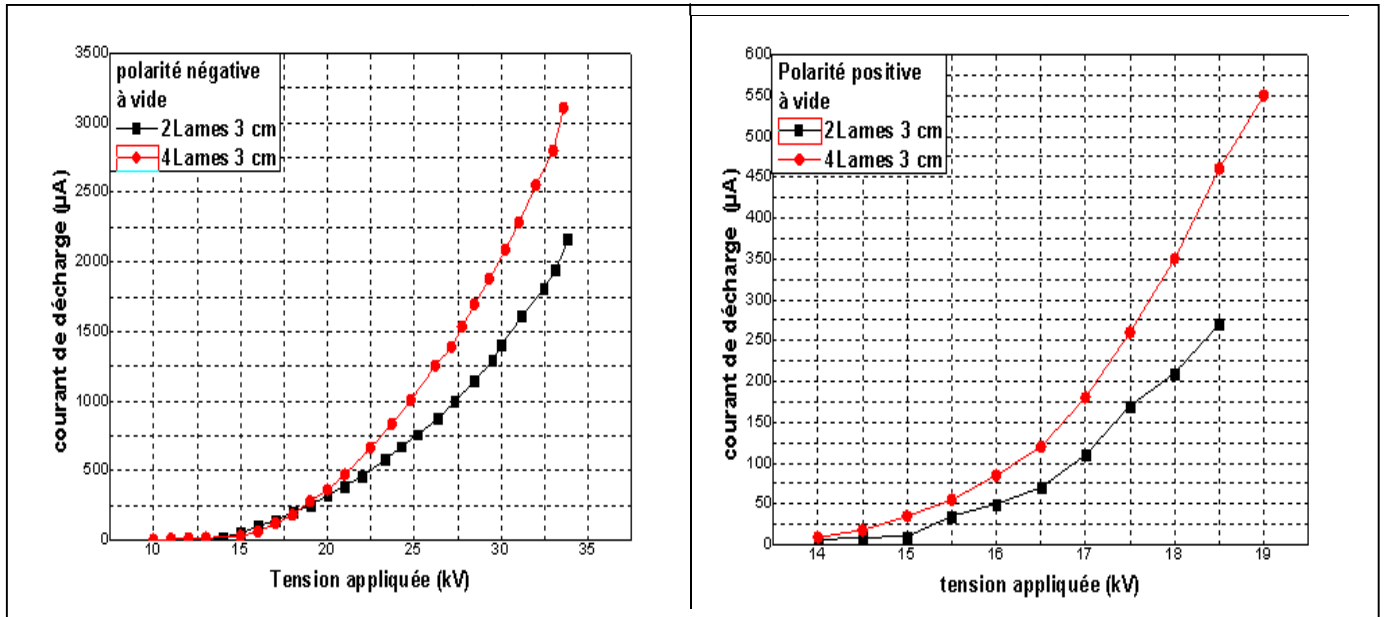


Figure (02) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- troisième type : ( Lames normal grand )

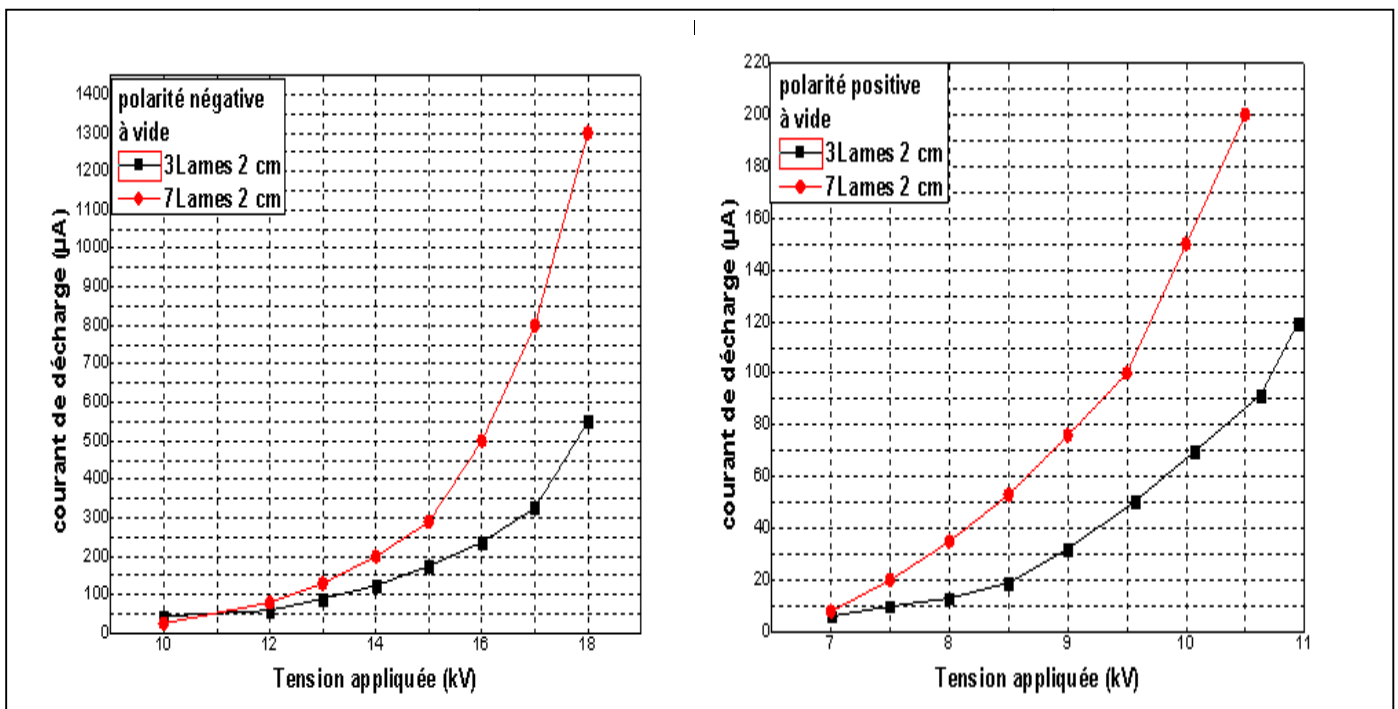
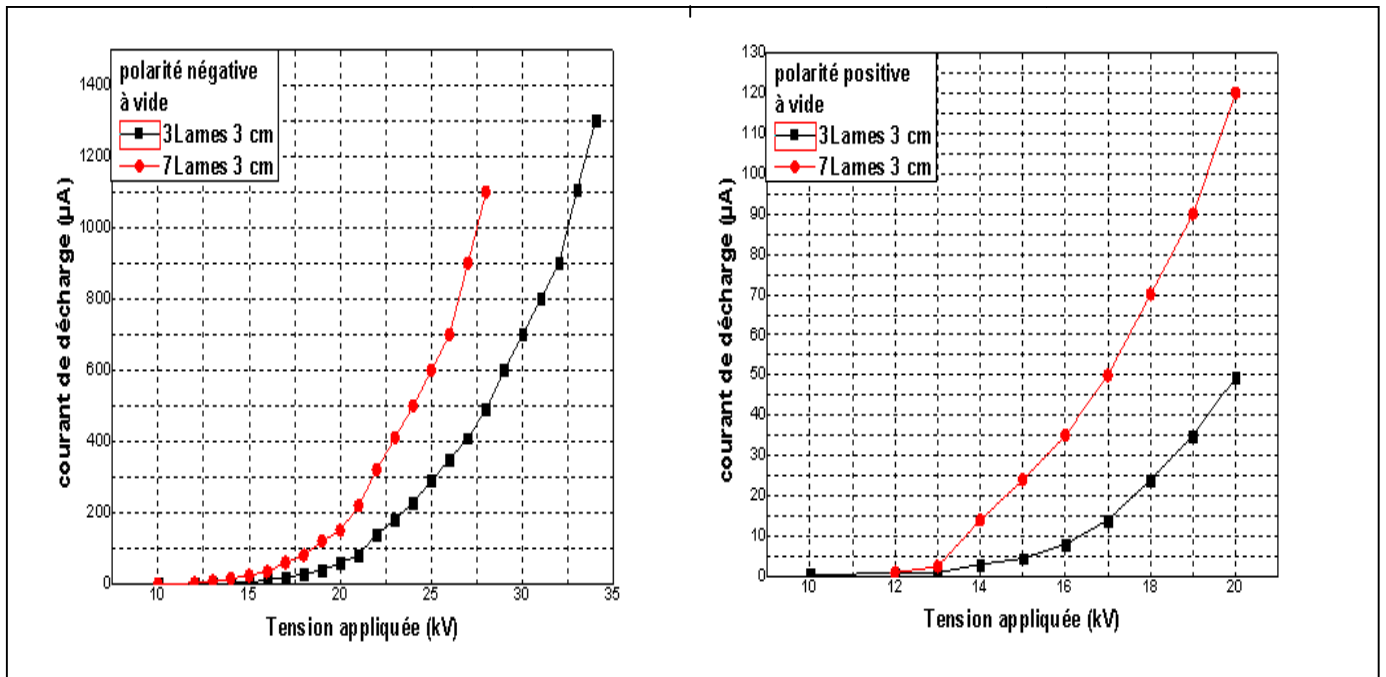


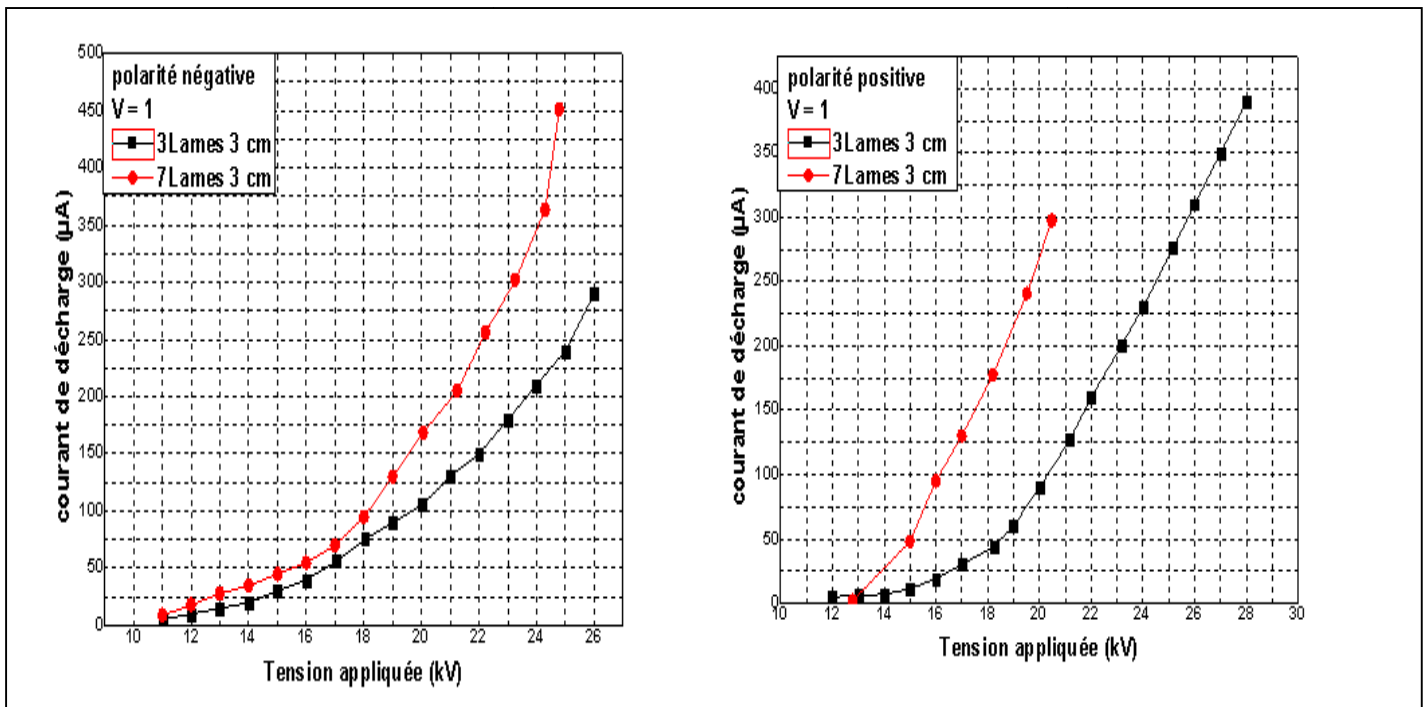
Figure (03) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- quatrième type : ( Lames normal petite )



**Figure(04) :** caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- Vitesse du vent
- ( $V = 1$ ) :
  - Polarité négative / positive :
  - Premier type : ( Lames de scie grand )



Figure(05) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- deuxième type : ( Lames de scie petite )

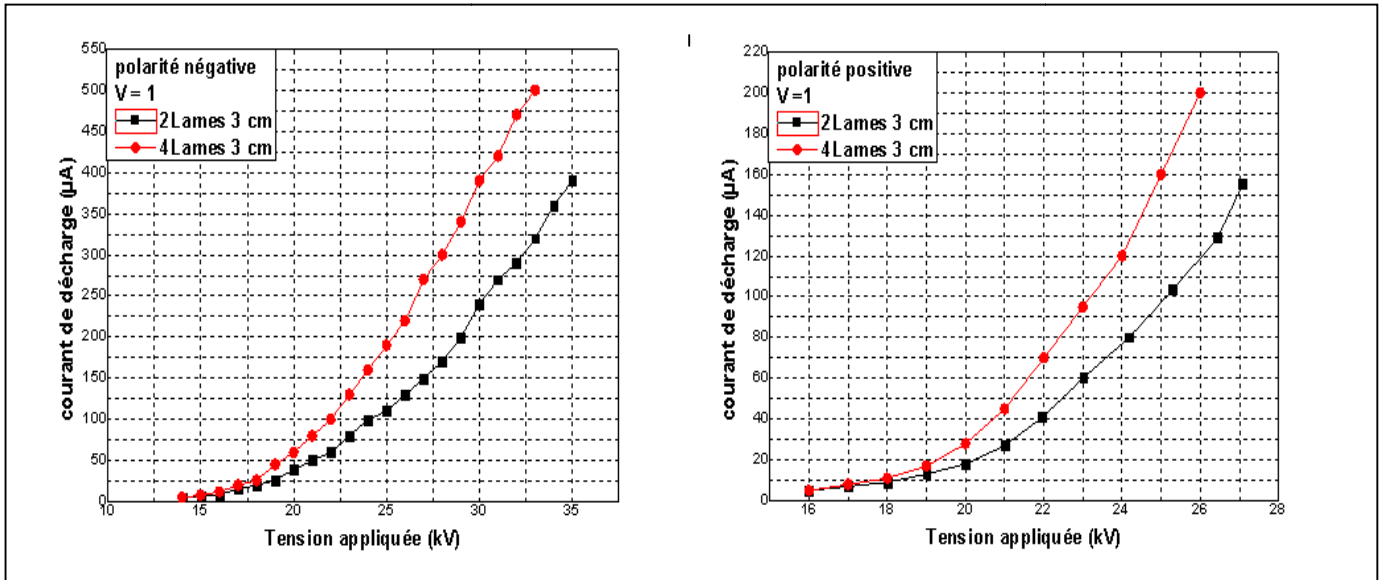


Figure (06) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- troisième type : ( Lames normal grand )

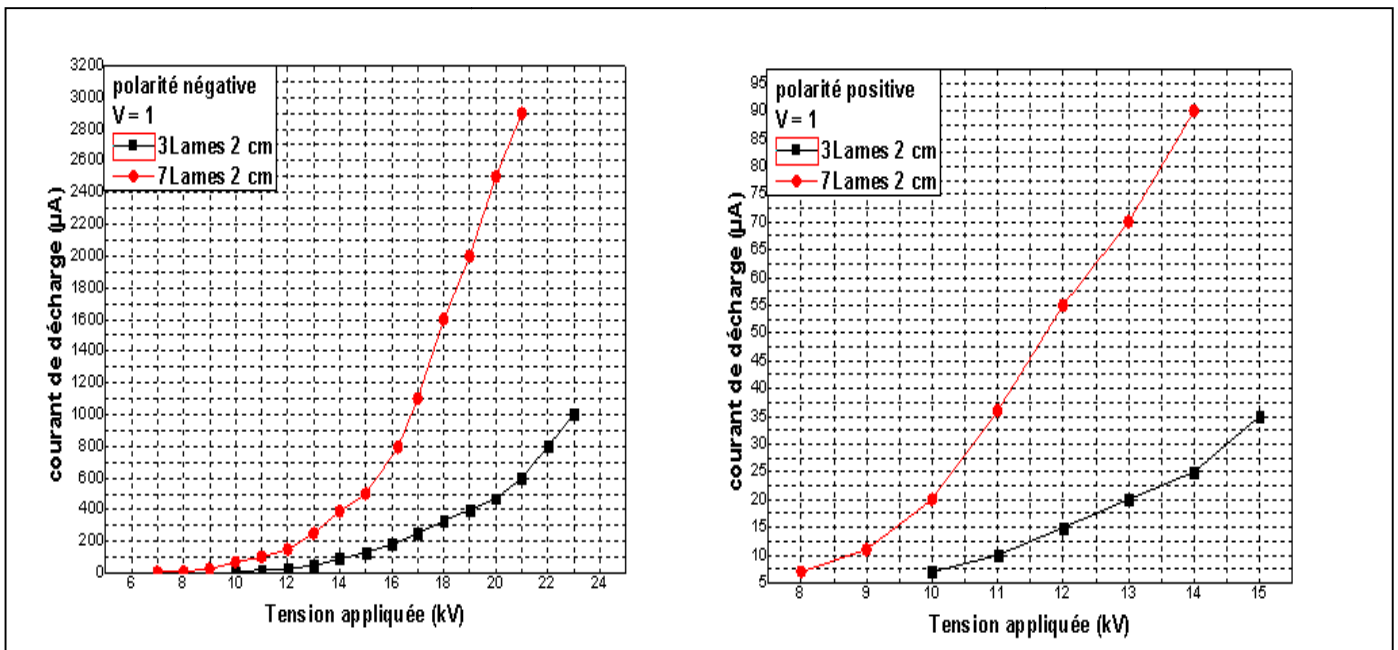


Figure (07) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- quatrième type : ( Lames normal petite )

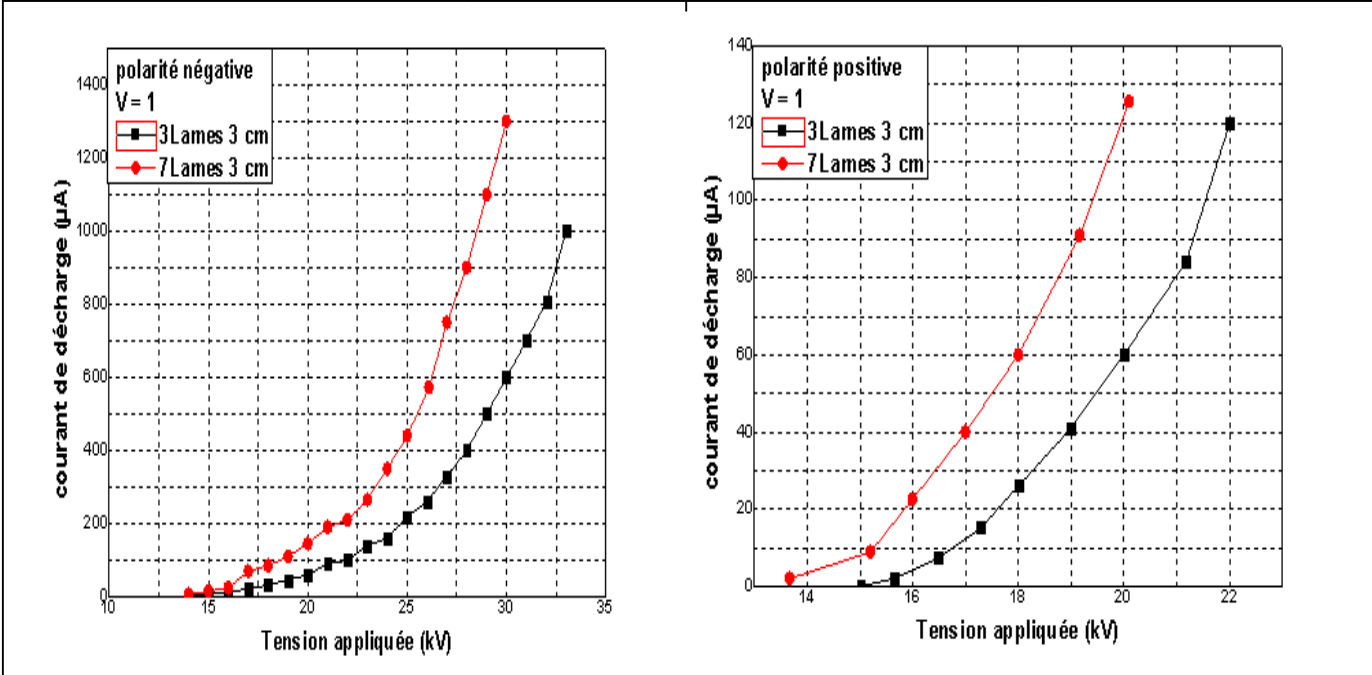


Figure (08) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

➤ ( $V = 1.5$ ) :

- Polarité négative / positive :
- Premier type : ( Lames de scie grand )

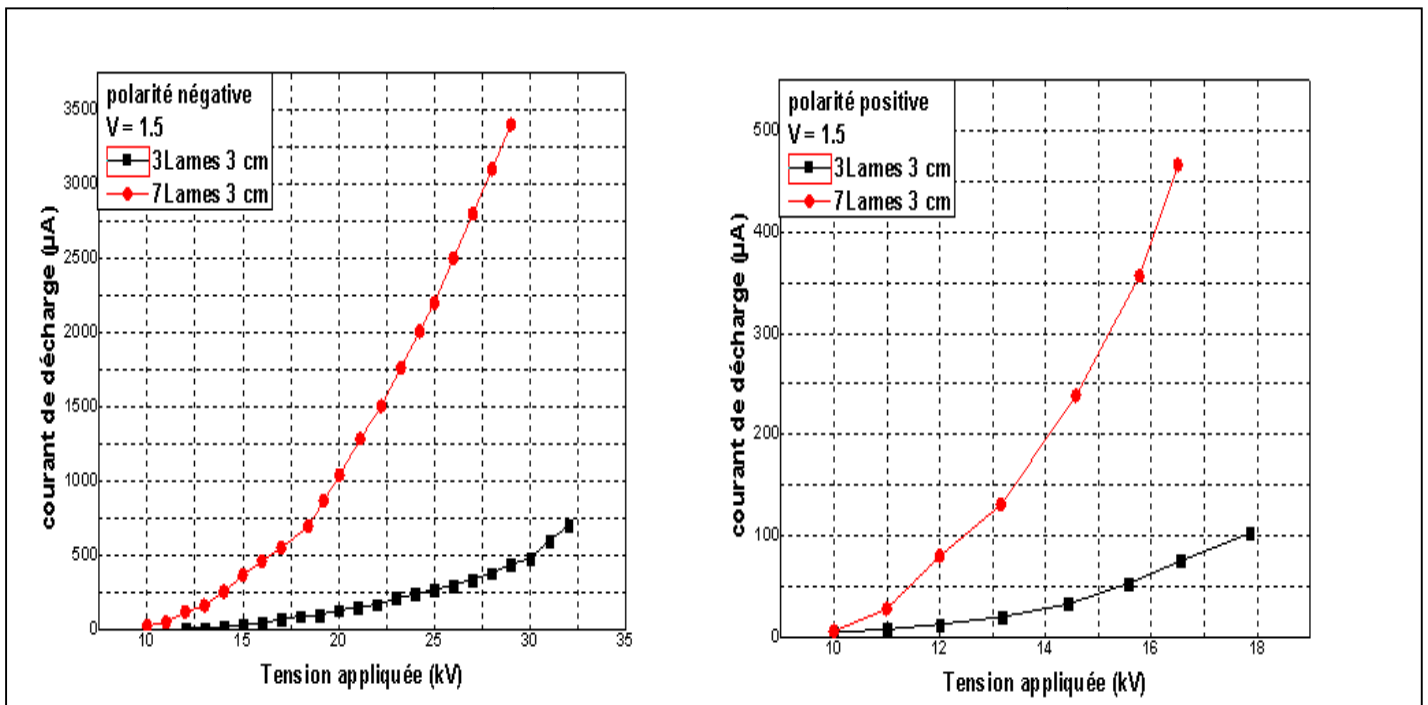


Figure (09) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- deuxième type : ( Lames de scie petite )

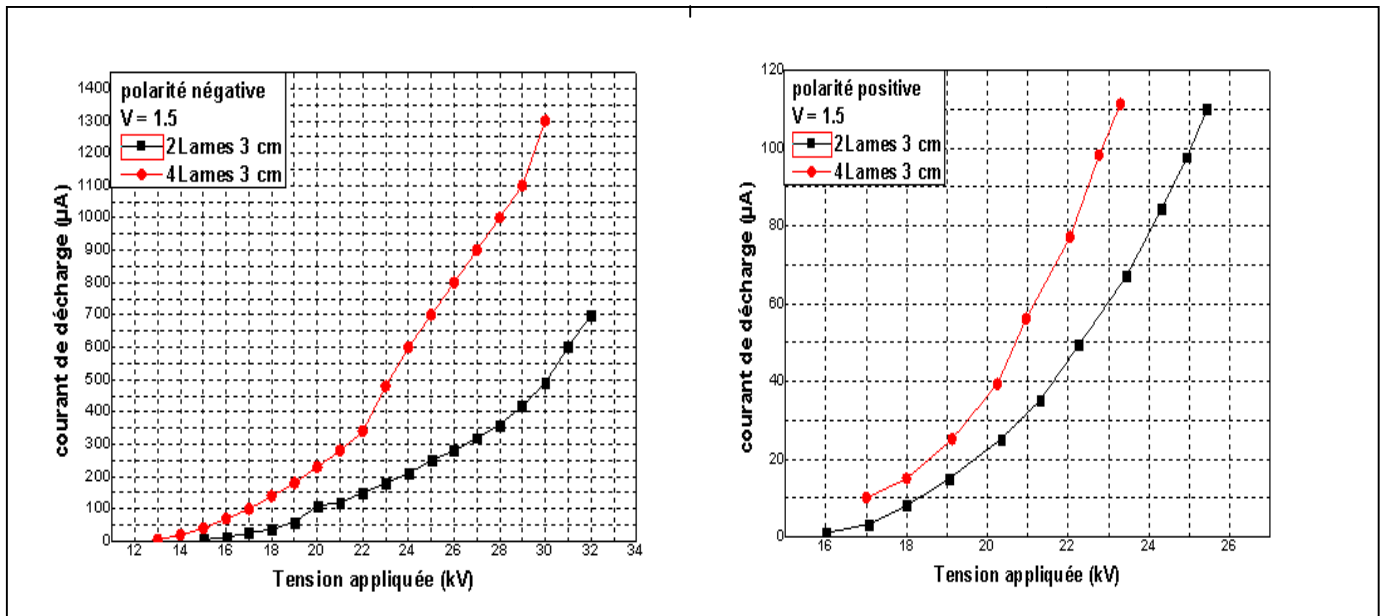


Figure (10) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- troisième type : ( Lames normal grand )

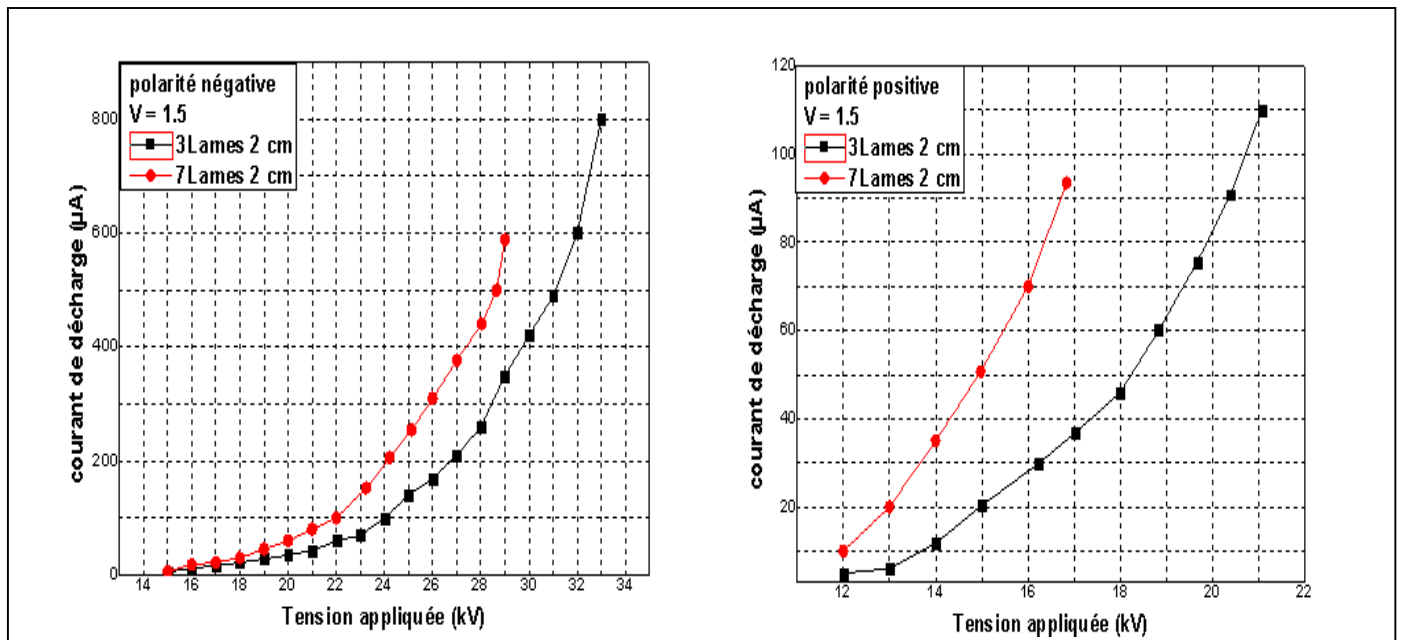


Figure (11) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive



- quatrième type : ( Lames normal petite )

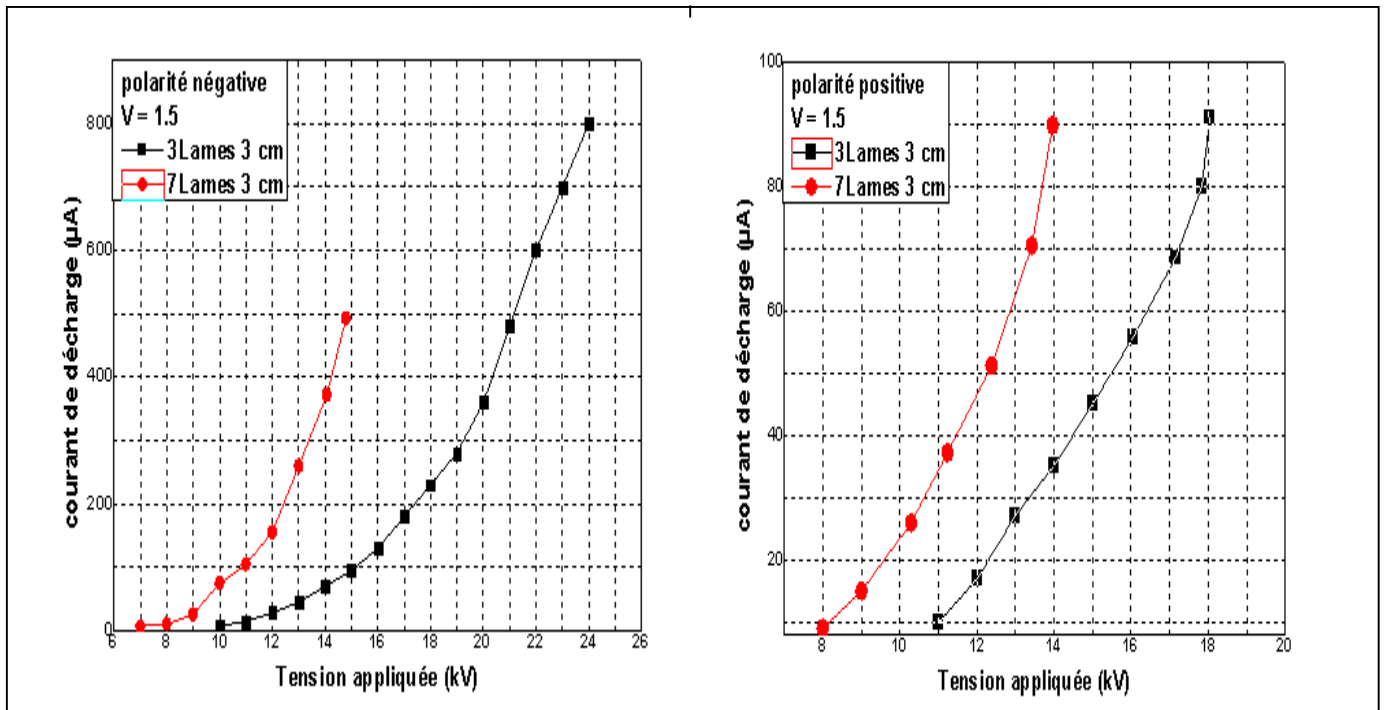


Figure (12) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

➤ ( $V = 2$ ) :

- Polarité négative / positive :
- Premier type : ( Lames de scie grand )

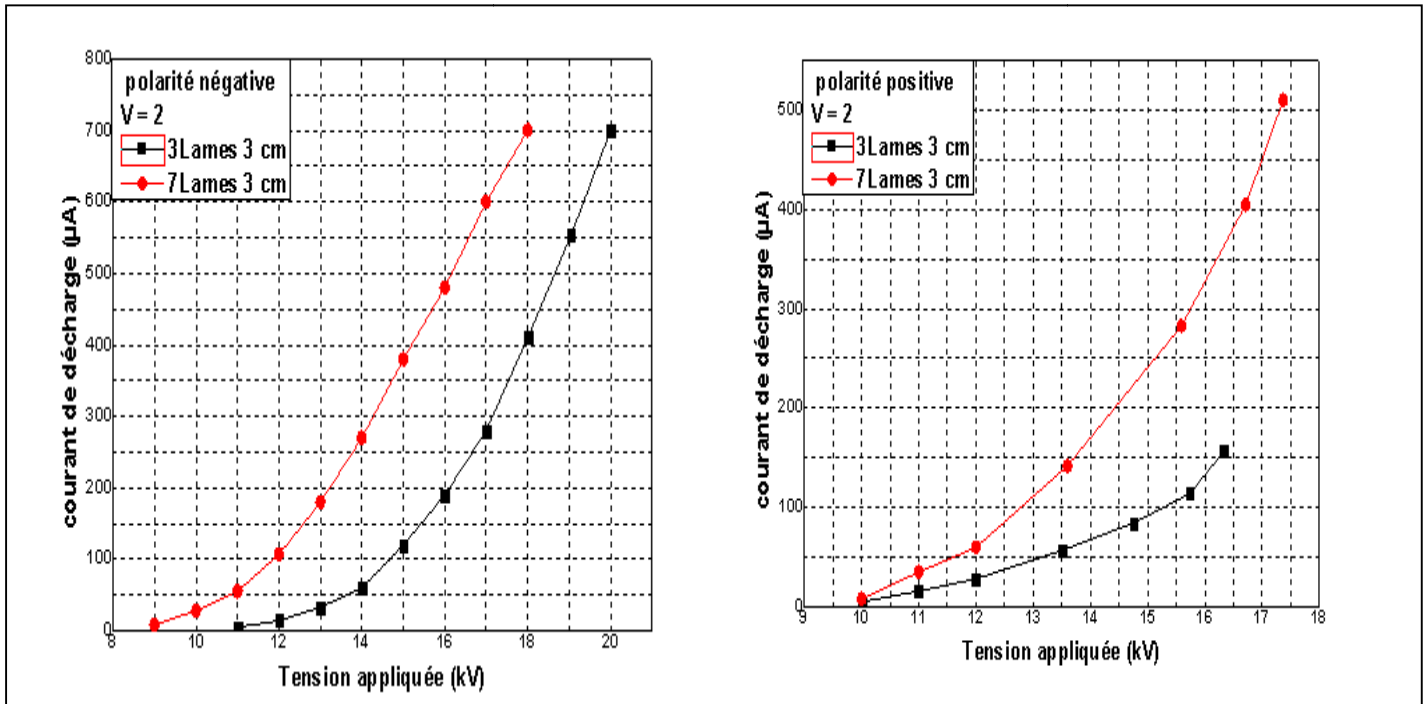


Figure (13) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- deuxième type : ( Lames de scie petite )

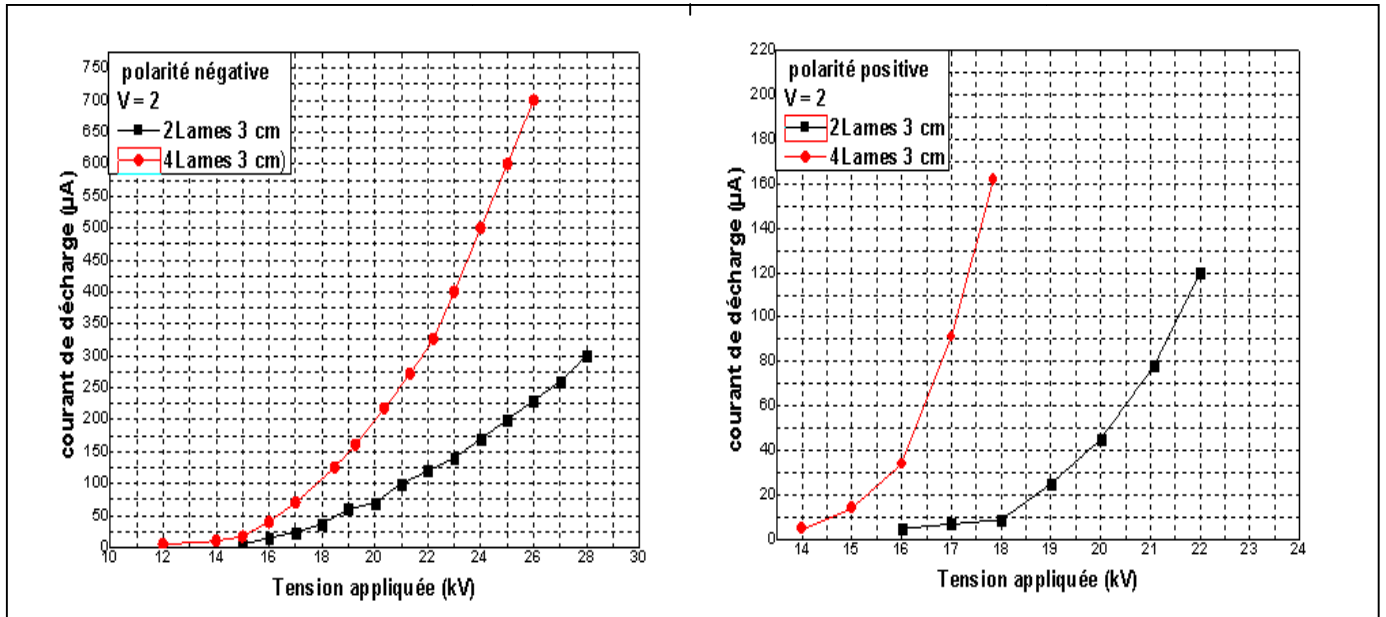


Figure (14) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- troisième type : ( Lames normal grand )

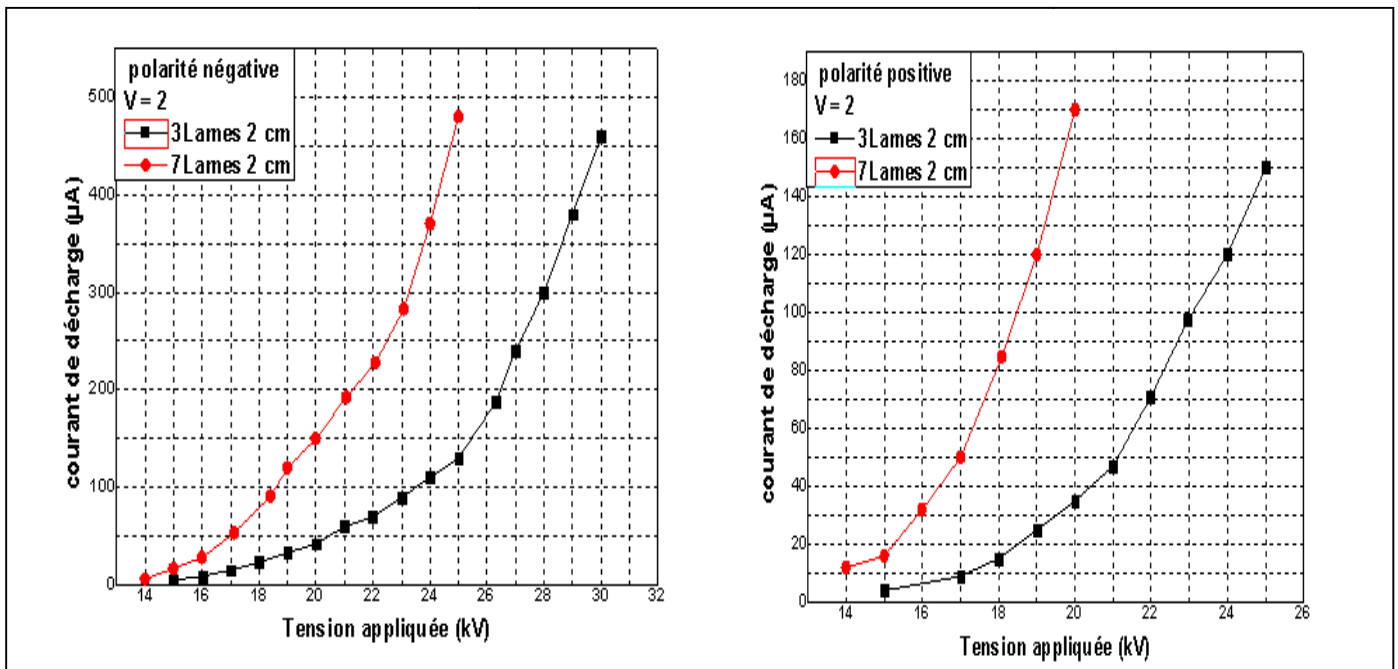


Figure (15) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

- quatrième type : ( Lames normal petite )

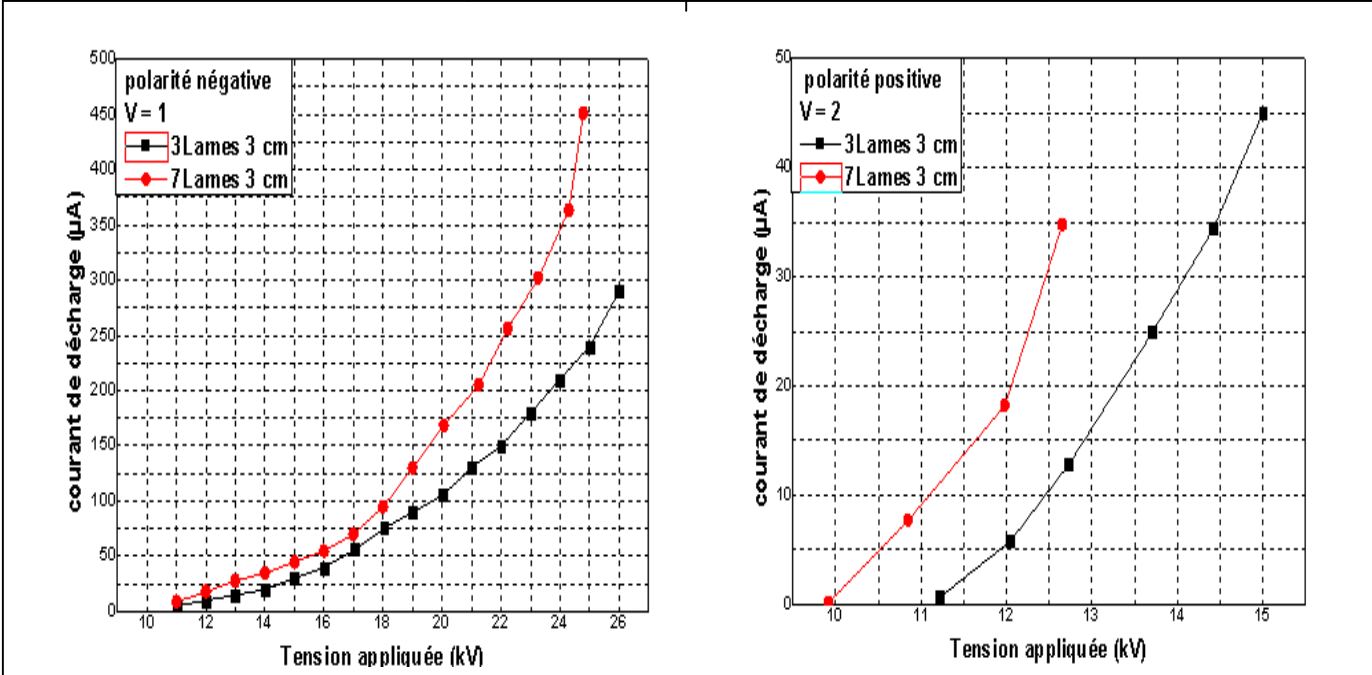


Figure (16) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive

➤ La Différence entre les types des lames :

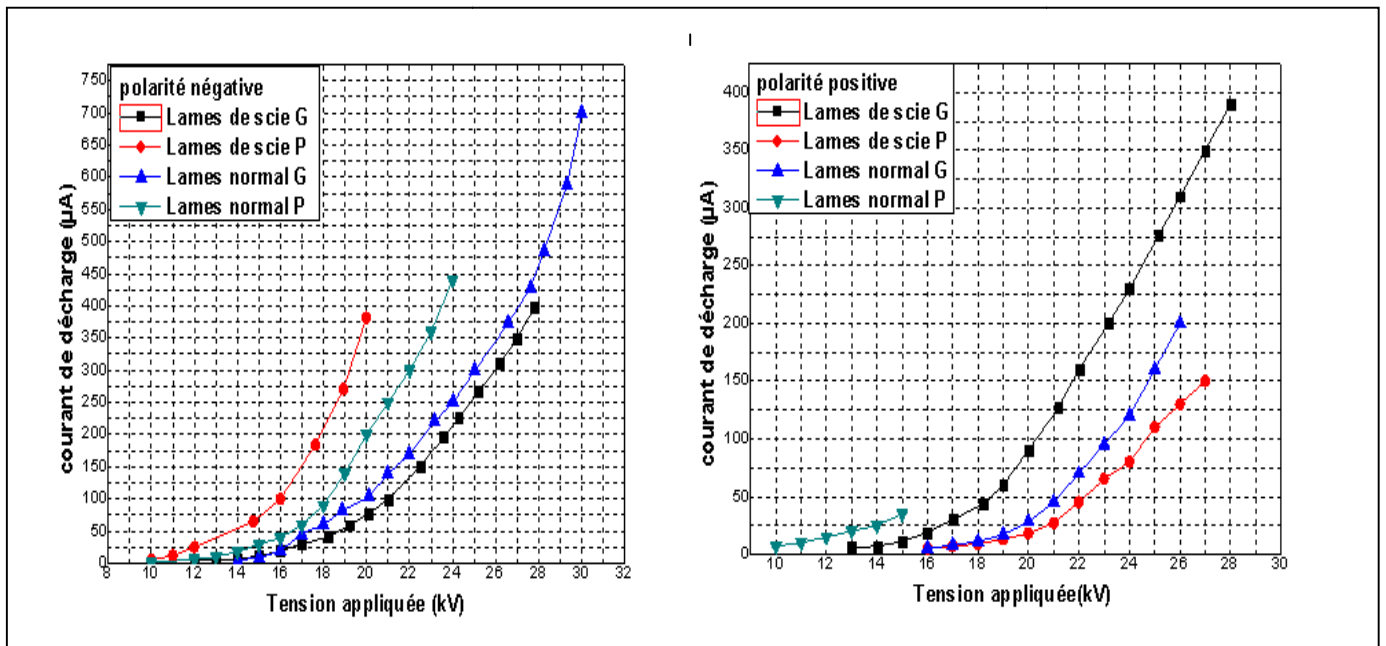


Figure (17) : caractéristique courant-tension de la distance inter-électrode sur la décharge couronne négative / positive avec différents électrode

### III.3. Filtration de fumées :

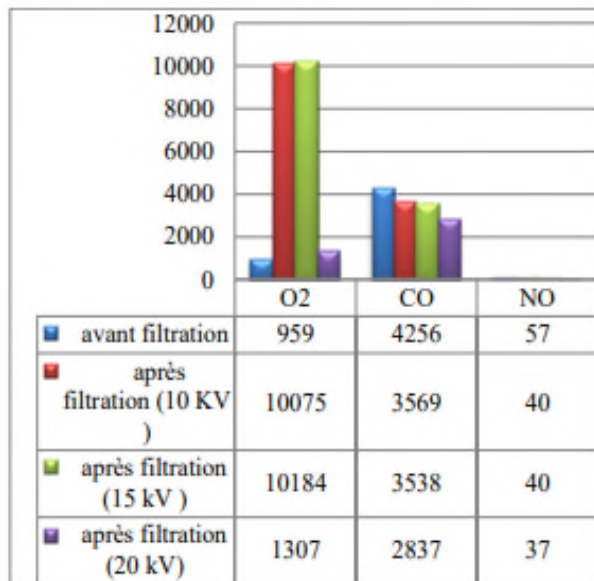
Dans ce test préliminaire, nous nous appuyons sur le principe visuel pour prouver que lorsque l'alimentation haute tension est coupée, la fumée traverse le filtre sans être filtrée. Lorsqu'elle est allumée, beaucoup de fumée est capturée par le filtre.

#### III.3.1. Papier (FAZ) : 19g

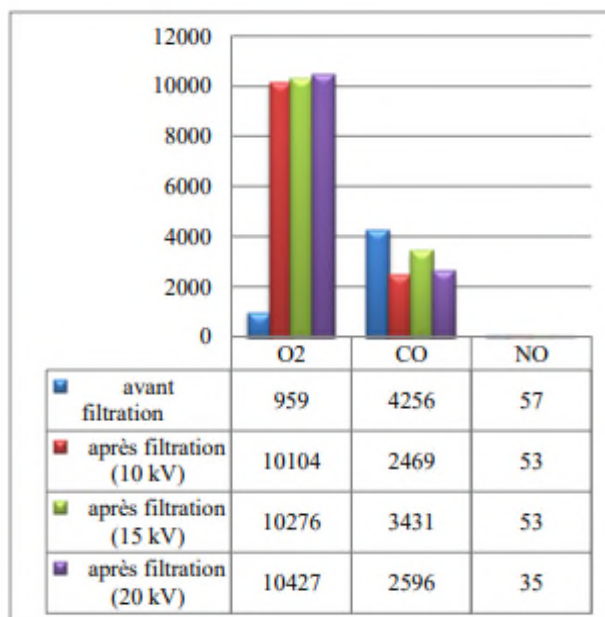
Tension appliquées Les paramètres de fumée	Polarité positive			Polarité négative		
	10kV	15kV	20kV	10kV	15kV	20kV
O <sub>2</sub>	10075 d 1259.4mV	10184 d 1273.0mV	10307 d 1288.4mV	10104 d 1280.1mV	10276 d 1359.5mV	10427 d 1305.9mV
CO	3569 d 446.1 mV	3538 d 442.3 mV	2837 d 354.6 mV	2469 d 443.1 mV	3431 d 428.9 mV	2596 d 349.5 mV
NO	40 d 5.0 mV	40 d 5.0 mV	37 d 4.6 mV	53 d 6.6 mV	53 d 4.4 mV	35 d 4.4 mV
Tg	659 d 66.0 °C	592 d 60.0 °C	540 d 55.0 °C	618 d 62 °C	528 d 54.0 °C	495 d 50.0 °C
V <sub>cc</sub>	5423 d 6.84 v	5418 d 6.83 v	5425 d 6.84 v	5419 d 6.84 v	5419 d 6.84 v	5414 d 6.83 v
rH	7009 d 876.1 mV	6433d 804.1 mV	6236 d 779.5 mV	8096 d 1012.0mV	6239 d 7174 mV	6136 d 750.5mV
H <sub>2</sub> c	14 d 1.8 mV	13 d 1.6 mV	10 d 1.3 mV	11 d 1.4 mV	9d 1.1 mV	9 d 1.1 mV
O	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95%	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %

Tableau III.1.: Les caractéristiques de fumée du papier journal après filtration.

- Tension appliquée à polarité positive :



- Tension appliquée à polarité négative :



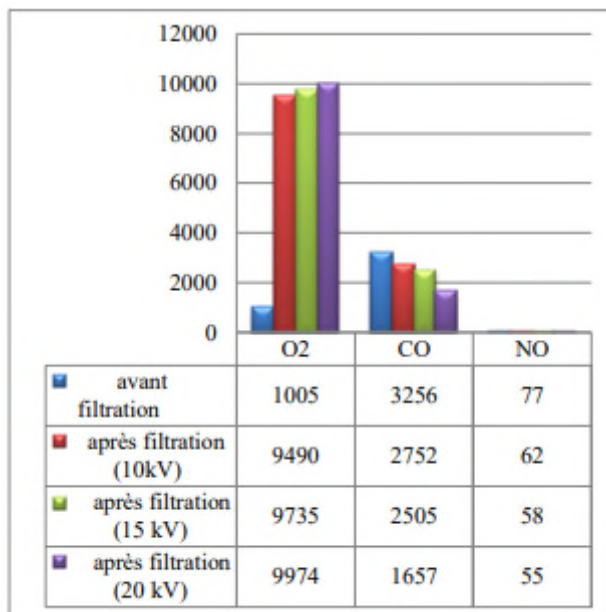
III.3.2. Encens : 15g

Tension appliquées Les Paramètres de fumées	Polarité positive			Polarité négative		
	10 kV	15kV	20kV	10kV	15kV	20kV
O <sub>2</sub>	9490 d 1186.2mV	9735 d 1216.9mV	9974 d 1246.7mV	10188 d 1273.5mV	10190 d 1273.7mV	10207 d 2150.9mV
CO	2752 d 344.0 mV	2505 d 313.0 mV	1657 d 207.1 mV	819 d 102.4 mV	801 d 100.1 mV	601 d 75 mV
NO	62 d 7.8 mV	58 d 7.3 mV	55 d 6.9 mV	35 d 4.4 mV	34 d 4.3 mV	76 d 9.5 mV
Tg	655 d 65.5 °C	547 d 56.0 °C	449 d 45.0 °C	760 d 76.0 °C	347 d 35.0 °C	335d 34.0 °C
Vcc	5369 d 6.77 v	5369 d 6.77 v	5368 d 6.77 v	5339 d 6.73 v	5339 d 6.73 v	5366 d 6.77 v
rH	7339 d 917.4 mV	7409 d 926.1 mV	6990 d 873.8 mV	6224 d 778.0 mV	6199 d 774.9mV	7237d 904.6 mV
H <sub>2c</sub>	15 d 1.9 mV	16d 2.0 mV	16 d 2.0 mV	11 d 1.4 mV	15 d 1.9 mV	12 d 1.5 mV
O	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95%	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %

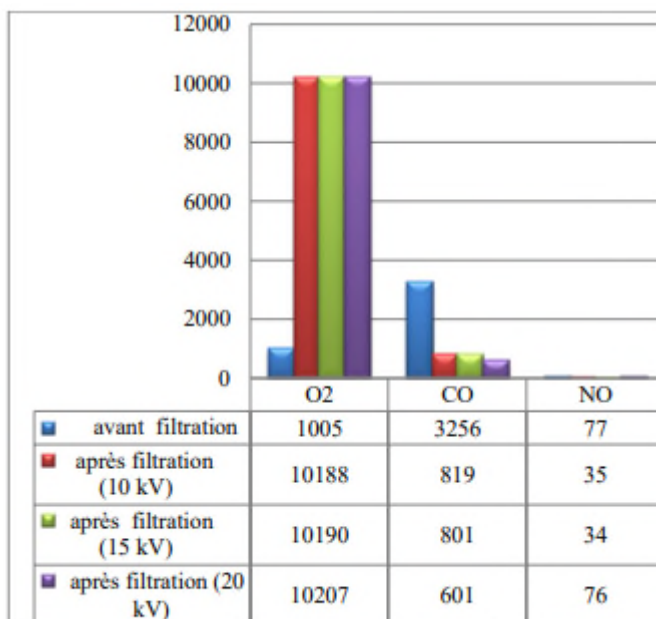
Tableau III.2 : Les caractéristiques de fumée du l’encens après filtration.



- Tension appliquée à polarité positive :



- Tension appliquée à polarité négative :

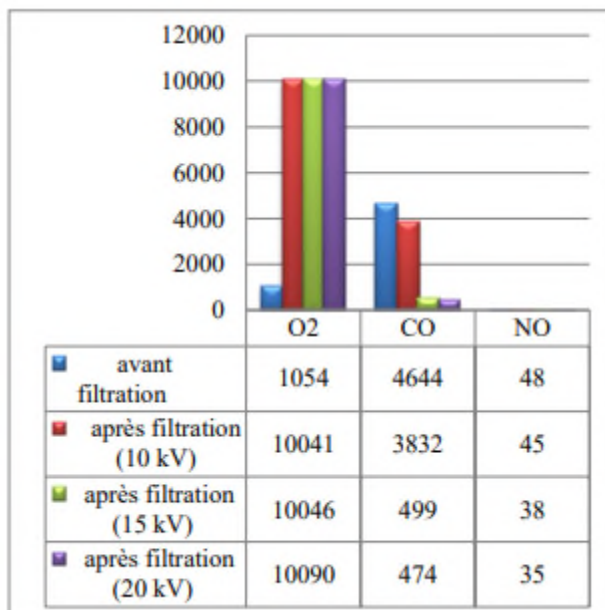


III.3.3. Plateau d'œuf : 18g

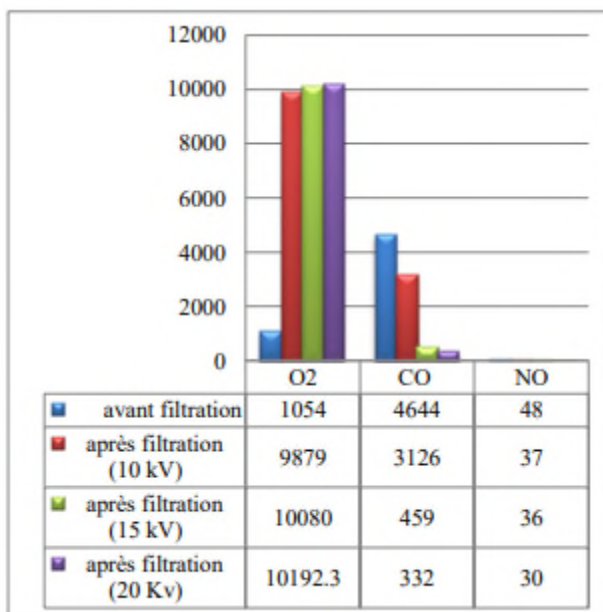
Tension appliquées  Les Paramètres de fumées	Polarité positive			Polarité négative		
	10 kV	15kV	20kV	10kV	15kV	20kV
O <sub>2</sub>	10041 d 1255.1mV	10046 d 1255.7mV	10090 d 1261.3mV	9879 d 1234.9mV	10080 d 1290.3mV	10192.3 d 1302.3mV
CO	3832 d 479.0 mV	499 d 62.4 mV	474 d 59.3 mV	3126 d 456.7 mV	459 d 51.9 mV	332 d 50.1 mV
NO	45 d 5.6 mV	38 d 4.8 mV	35 d 4.4 mV	37 d 4.6 mV	36 d 5.0 mV	30 d 4.0 mV
Tg	412 d 41.5 °C	401 d 40.5 °C	378 d 38.0 °C	493 d 50.0 °C	386 d 39.1 °C	303 d 30.1 °C
Vcc	5366 d 6.77 v	5340 d 6.74 v	5338 d 6.73 v	5355 d 6.75 v	5368 d 6.77 mV	5369 d 6.77 v
rH	8159 d 1019.9mV	6778 d 847.2 mV	6666 d 833.3 mV	8852 d 1106.5mV	8079 d 1009.9mV	6130 d 803.1 mV
H <sub>2c</sub>	9 d 1.1 mV	14 d 1.8 mV	12 d 1.5 mV	10 d 1.3 mV	11 d 1.4 mV	9 d 1.1 mV
O	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	17.4 mV 20.95 %	174 mV 20.95 %

**Tableau III.3 : Les caractéristiques de fumée du plateau d'œuf après filtration.**

- Tension appliquée à polarité positive :



- Tension appliquée à polarité négative:



**Figure III.19: Comparaison des paramètres de trois fumées avant et après filtration pour trois tensions différentes dans deux polarités.**

Nous avons remarqué qu'aux trois niveaux de tension, la quantité de CO et de NO diminuait tandis que la quantité d'O2 augmentait, mais elle était plus élevée à 20 kV. On peut conclure que pour une tension de 20 kV, notre filtre électrostatique a une efficacité de filtration plus élevée.

### III.4. Influence des fumées sur la décharge électrique :

Les figures (III.19) (III.20) illustrent les courbes caractéristiques courant-tension des trois types de fumée filtrées par deux types de décharge. Nous avons constaté que la tension est proportionnelle au courant, car l'ionisation des particules d'air se produit à haute densité lors de la charge du cylindre, de sorte que le phénomène de décharge corona s'accélère. Par conséquent, le courant augmente progressivement avec la présence de particules de fumée collectées dans le cylindre, ce qui a une grande influence sur la tension de claquage.

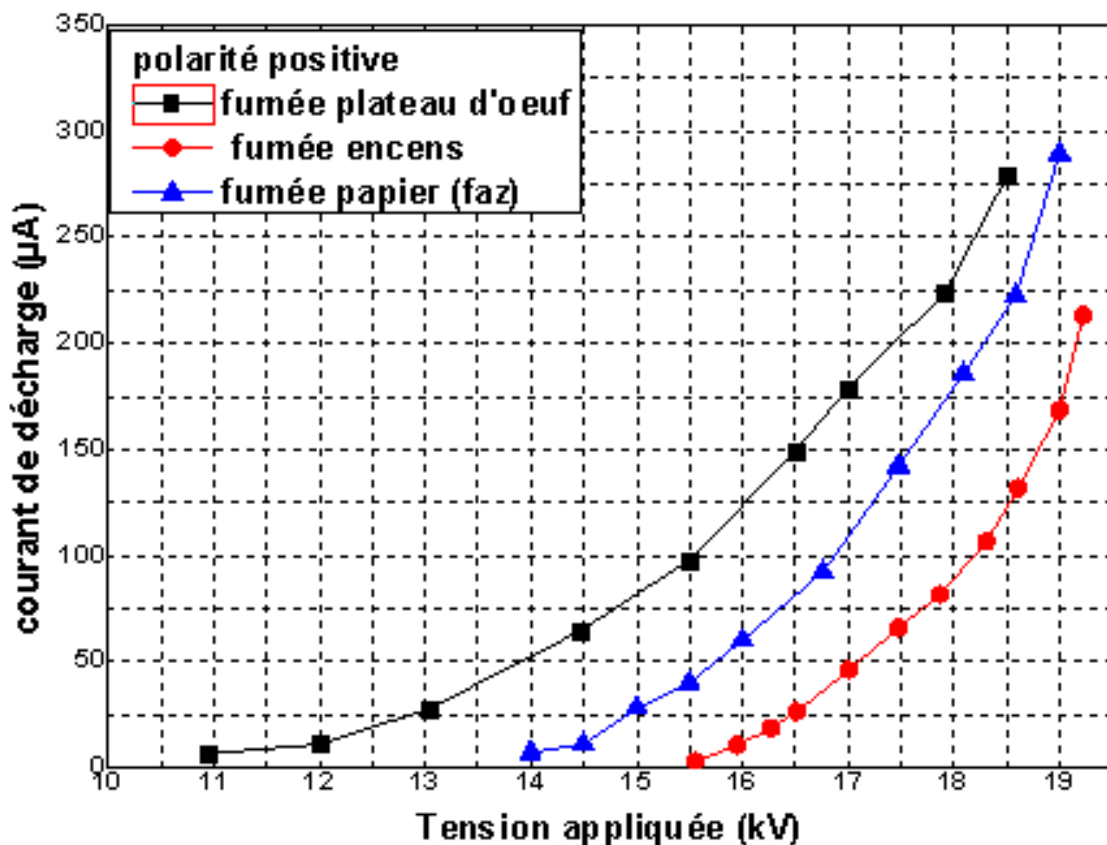


Figure (20) : Caractéristiques courant – tension en fonction des fumés en polarité positive.

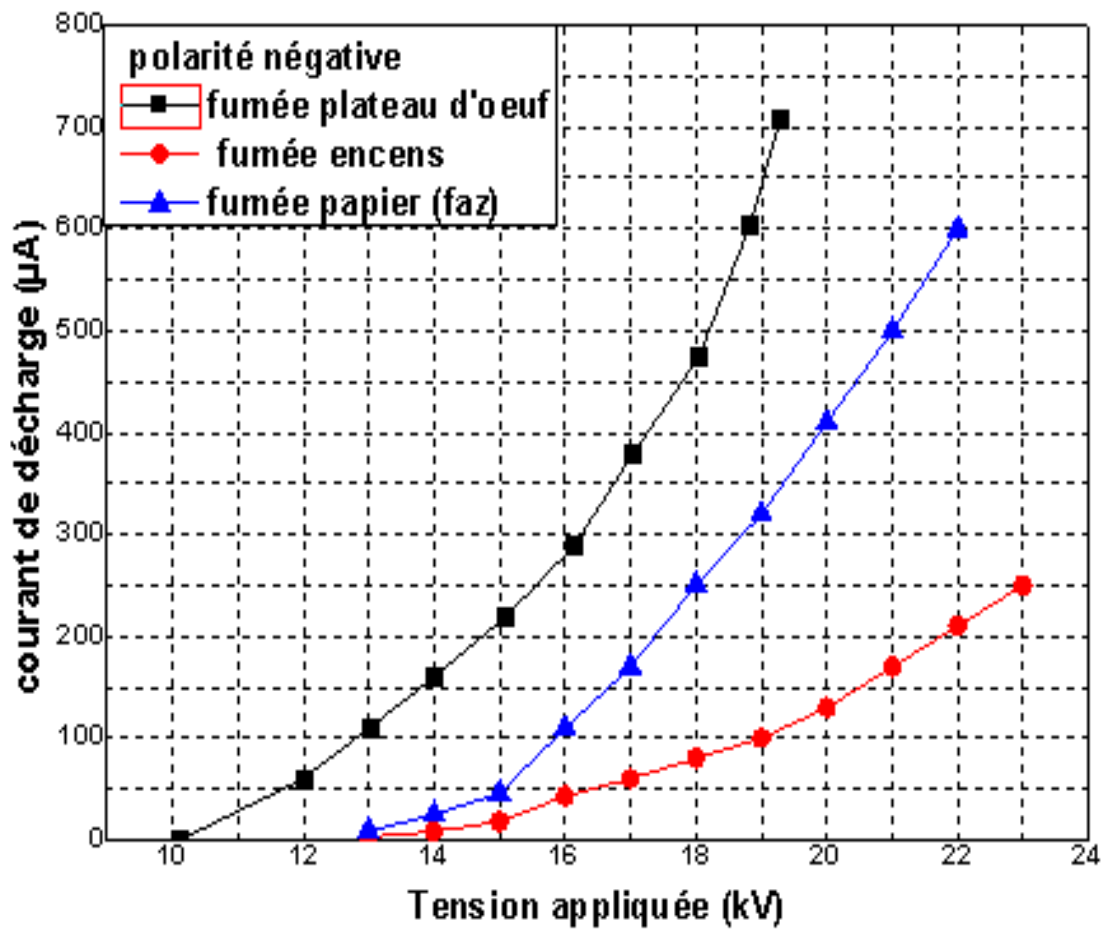


Figure (21) : Caractéristiques courant – tension en fonction des fumés en polarité négative.

III.5. Calcul d'efficacité :

Par la relation théorique de l'efficacité on a pu calculées le rendement de chaque fumée utilisés. On remarque que le rendement est de bonnes valeurs surtout pour la polarité négative ce qui confirme l'exactitude de la recherche scientifique et prouve l'importance de son utilisation dans la purification d'air.

		Polarité positive : 20 KV	Polarité négative : 20 KV
papier (FAZ)	O <sub>2</sub>	$\eta = 1 - \frac{959}{10307} \times 100$ = 90.7 %	$\eta = 1 - \frac{959}{10427} \times 100$ = 90.8 %
	CO	$\eta = 1 - \frac{2837}{4256} \times 100$ = 34 %	$\eta = 1 - \frac{2596}{4256} \times 100 = 39 \%$
l'encens	O <sub>2</sub>	$\eta = 1 - \frac{1005}{9974} \times 100$ = 90 %	$\eta = 1 - \frac{1005}{10207} \times 100$ = 90.2 %
	CO	$\eta = 1 - \frac{1657}{3256} \times 100$ = 49 %	$\eta = 1 - \frac{601}{3256} \times 100$ = 81.6 %
plateau d'œuf	O <sub>2</sub>	$\eta = 1 - \frac{1054}{10090} \times 100$ = 89.6 %	$\eta = 1 - \frac{1056}{10192} \times 100$ = 89.7 %
	CO	$\eta = 1 - \frac{474}{4644} \times 100$ = 89.8 %	$\eta = 1 - \frac{332}{4644} \times 100$ = 92.9 %

Tableau III.4.: Les calculs d'efficacité de trois types de fumés

**Conclusion Générale et  
perspectives**

## Conclusion Générale et perspectives

---

La séparation électrique est considérée comme la méthode la plus prometteuse pour capturer les particules les plus fines lors du traitement de l'air. Ces processus de purification doivent répondre à diverses contraintes (économiques, techniques, etc.). Les recherches menées dans notre thèse s'inscrivent dans le cadre de la recherche, de la réalisation et de la simulation expérimentales, dans le but d'étudier la filtration des particules polluantes en déterminant les dimensions appropriées pour choisir un modèle de précipitateur électrostatique dans une configuration de fil cylindre, et de vérifier l'efficacité de la filtration en modifiant les caractéristiques des fumées en fonction de leurs propriétés.

Nos expérimentations sur le système ESP fil-cylindre nous permettent de conclure ce qui suit :

- Les mesures des caractéristiques courant-tension des paramètres influençant la décharge couronne (distance entre les électrodes, diamètre du fil, etc.) nous ont permis de sélectionner les dimensions adéquates pour notre filtre électrostatique.
- En mesurant les caractéristiques des fumées, nous sommes en mesure d'évaluer le niveau de pollution de celles-ci.
- La configuration fil-cylindre du filtre électrostatique se révèle être un bon choix pour la purification de l'air.

De nombreuses perspectives sont envisagées pour poursuivre ce travail et compléter nos résultats.

Afin de compléter cette recherche, il serait intéressant :

- De construire et d'étudier différentes géométries de filtres électrostatiques.
- De développer un modèle numérique du phénomène de décharge couronne.
- D'effectuer des mesures sur les effets de la géométrie de l'électrode, du nombre d'électrodes (autres types de filtres électrostatiques) et de la vitesse du flux d'air sur les paramètres de la décharge couronne.

Enfin, nous espérons que d'autres recherches expérimentales et numériques seront menées afin d'améliorer l'efficacité des précipitateurs électrostatiques.



**Bibliographie**

# Bibliographie

---

## Résumé :

De nombreux dangers menacent la santé et l'environnement a cause de pollution atmosphérique alors des chercheurs inventé et développé des machine pour purifié l'air parmi ces dernier sont les électro filtres C'est un système typiquement flou, où un grand nombre de facteurs affectent ses performances d'une manière compliquée. L'objectif du présent travail consiste à étudier la faisabilité de cette méthode pour l'épuration des fumées , ceci via une étude expérimentale et théorique de bon fonctionnement de filtre électrostatique réel de type cylindre avec un rendement important pour cela nous avons élargi notre recherche a des expériences sur la caractéristique courante tension pour choisir les matériaux et les tailles plus favorable ceci via plusieurs effets (effet de polarité, espace inter électrodes ...), puis les caractéristiques de fumé avant et après la filtration a fin de mesurer l'efficacité . A la fin on a enrichi notre travail par une simulation pour comparer les résultats obtenue dans les deux études pour mieux comprendre les différents phénomènes liée à notre sujet.

## المخلص :

العديد من الأخطار تهدد الصحة والبيئة بسبب تلوث الغلاف الجوي لذلك ابتكر الباحثون وطوروا آلات لتنقية الهواء من على أدائه بطريقة معقدة. بينها المرشحات الكهربائية وهو نظام غامض عادة حيث يؤثر عدد كبير من العوامل الهدف من هذا العمل هو دراسة جدوى هذه الطريقة لتنقية غازات المداخن ، وذلك من خلال دراسة تجريبية ونظرية للتشغيل الجيد لمرشح إلكتروستاتيكي حقيقي من نوع اسطوانة بكفاءة عالية لذلك قمنا بتوسيع بحثنا عن طريق تجارب على خصائص التيار الكهربائي الختيار المواد والأحجام الأكثر مألوفة من خلال عدة تأثيرات (تأثير القطبية ، المسافة بين الأقطاب الكهربائية... ) ، ثم خصائص الدخان قبل وبعد الترشيح لقياس الكفاءة .في النهاية قمنا بإثراء عملنا بمحاكاة لمقارنة النتائج التي تم الحصول عليها في الدراستين لفهم الظواهر المختلفة المتعلقة بموضوعنا بشكل أفضل.

## Abstract:

Many dangers threaten health and the environment because of atmospheric pollution so researchers invented and developed machines to purify the air among these are the electro filters It is a typically vague system, where a large number of factors affect its performance in a complicated way. The objective of this work is to study the feasibility of this method for the purification of flue gases, this via an experimental and theoretical study of the proper functioning of a real electrostatic filter of the cylinder wire type with a high efficiency for this we have widened our research has experiments on the current characteristic voltage to choose the materials and the most favorable sizes this via several effects (effect of polarity, space between electrodes...), then the characteristics of smoke before and after the filtration in order to measure the efficiency. At the end we enriched our

## **Bibliographie**

---

work by a simulation to compare the results obtained in the two studies to better understand the different phenomena related to our subject.

[1] Référence :

Gauthier, P., & Tremblay, A. (2018). Filtration électrostatique : fonctionnement et applications. Techniques de l'ingénieur, traité Génie des procédés, 1-14.

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/filtration-separation-42312110/filtration-electrostatique-fonctionnement-et-applications-g5030/>

[2] Référence :

Kasper, T., & Becks, B. (2019). Electrostatic Precipitation. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. John Wiley & Sons.

[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a09\\_463.pub3](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a09_463.pub3)

[3] Référence :

Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6), 709-742.

<https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>

[4] Référence :

United States Environmental Protection Agency. (2021). Air Composition. <https://www.epa.gov/air-trends/air-composition>.

[5] Référence :

United States Environmental Protection Agency. (2021). Common Air Pollutants. <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

[6] Référence :

Organisation mondiale de la santé. (2021). Pollution de l'air et santé. <https://www.who.int/fr/news-room/q-a-detail/air-pollution-and-health>.

[7] Référence :

Association pour la prévention de la pollution atmosphérique. (2017). Pollution de l'air et cadre bâti. <https://www.appa.asso.fr/pollution-de-lair-et-cadre-bati/>.

[8] Référence :

Ministère de la Transition écologique. (2021). Filtration de l'air : comment ça marche ? <https://www.ecologie.gouv.fr/filtration-lair-comment-ca-marche>.

[9] <https://image.made-in-china.com/43f34j00eBAYliFabpoU/Cdpk-Wide-Spacing-Electrostatic-Precipitator.jpg>

[10] [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQsTK3BBi8O8d7vnQZMccC3Zjv5\\_Wd05h5Qgw&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQsTK3BBi8O8d7vnQZMccC3Zjv5_Wd05h5Qgw&usqp=CAU)

[11] Référence : Zhang, J., Wu, S., & Zhu, T. (2014). Characteristics of fine particulate matter emissions from coal-fired boilers and the impacts of electrostatic precipitator retrofits. *Journal of Environmental Sciences*, 26(1), 164-171. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(13\)60360-9](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(13)60360-9)

[12] [https://www.researchgate.net/profile/Sonia-Souakri/publication/281946650/figure/fig1/AS:337724386103298@1457531176327/Procédé-SHIVA-avec-un-electrofiltre-4\\_Q320.jpg](https://www.researchgate.net/profile/Sonia-Souakri/publication/281946650/figure/fig1/AS:337724386103298@1457531176327/Procédé-SHIVA-avec-un-electrofiltre-4_Q320.jpg)

[13] [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSQEDdY4lrFVlvyB69ICG1mr4eH0Ze4J9cl3SIL5etAMt3EY8dsPfouNUdAHxTXcmK\\_mw&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSQEDdY4lrFVlvyB69ICG1mr4eH0Ze4J9cl3SIL5etAMt3EY8dsPfouNUdAHxTXcmK_mw&usqp=CAU)

[14] Référence : Bhaskar, K., Garg, S., & Kumar, S. (2015). Review on Recent Developments in Electrostatic Precipitators. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(7), 11-16. <https://www.ijerd.com/paper/vol11-issue7/version-2/11172020116.pdf>

[15] [https://docplayer.fr/docs-images/40/6677336/images/page\\_15.jpg](https://docplayer.fr/docs-images/40/6677336/images/page_15.jpg)

[16] Référence : Huang, Y., Zhao, B., Zhu, T., & Zhang, Y. (2017). A review on the *Environmental Sciences*, 51, 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.ies.2016.05.063>

[17] Référence : Huang, Y., Zhao, B., Zhu, T., & Zhang, Y. (2017). A review on the electrostatic precipitation technology for particulate matter control. *Journal of Environmental Sciences*, 51, 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.ies.2016.05.063>

[18]

**[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Principe %C3%A9lectrofiltre pour petits chauffages au bois.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Principe_%C3%A9lectrofiltre_pour_petits_chauffages_au_bois.jpg)**

[19] Référence : Yang, H., & Cao, Y. (2014). Electrostatic filtration technology: A review. Journal of Electrostatics, 72(5), 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.05.009>

[20] Référence : Yang, H., & Cao, Y. (2014). Electrostatic filtration technology: A review. Journal of Electrostatics, 72(5), 399-407. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.05.009>

[21] Référence : Wu, W., Zhang, W., & Yan, J. (2014). Numerical simulation and optimization of the electric field distribution in a wire-plate electrostatic precipitator. Journal of Electrostatics, 72(4), 338-343. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.03.008>

[22] [https://www.gea.com/fr/binaries/Wet-electrostatic-precipitator-features\\_tcm29-22967.png](https://www.gea.com/fr/binaries/Wet-electrostatic-precipitator-features_tcm29-22967.png)

[23] Ravi, K. (2017). Industrial applications of electrostatic precipitators. Journal of Industrial Pollution Control, 33(2), 279-290. [https://www.researchgate.net/publication/317253184\\_Industrial\\_Applications\\_of\\_Electrostatic\\_Precipitators](https://www.researchgate.net/publication/317253184_Industrial_Applications_of_Electrostatic_Precipitators)

[24] Référence : Jozwiak, M. (2018). Electrostatic precipitators - a study on their effectiveness and advantages. Archives of Environmental Protection, 44(2), 61-70. <https://doi.org/10.24425/119506>

[25] Référence : Narayana, M., & Subrahmanyam, J. P. (2014). Electrostatic precipitators: A review of applications and shortcomings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.195>

[26] Référence : Narayana, M., & Subrahmanyam, J. P. (2014). Electrostatic precipitators: A review of applications and shortcomings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.195>

[1] Références :

Smith, J., Jones, R., & Brown, K. (2010). Development of a Novel Device for Measuring X. *Journal of Applied Physics*, 108(5), 054512.

ASTM International. (2018). Standard Test Method for Evaluating X. ASTM E1234-18. doi: 10.1520/E1234-18.

[2] Référence :

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FSchema-du-dispositif-experimental\\_fig1\\_266876469&psig=AOvVaw1tuB7ZDbfky5FFy9XvRITX&ust=1683209851809000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwiPmtW7q9n-AhVtptycCHWG\\_ASMQr4kDegUIARDLAQ](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FSchema-du-dispositif-experimental_fig1_266876469&psig=AOvVaw1tuB7ZDbfky5FFy9XvRITX&ust=1683209851809000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwiPmtW7q9n-AhVtptycCHWG_ASMQr4kDegUIARDLAQ)

[3] Référence :

Johnson, A., Smith, B., & Lee, C. (2015). A Novel Approach for X Detection. *Journal of Analytical Chemistry*, 90(4), 342-350.

ISO. (2018). ISO 1234: Standard Method for X Detection. International Organization for Standardization.

[4] Référence :

[https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ4yyOjoWrxUTRYokZtZHBKsFGQz-dJMRqtqanwPyuGRZiZTpx7CMO\\_K7LUAKy4k7\\_OHjs&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ4yyOjoWrxUTRYokZtZHBKsFGQz-dJMRqtqanwPyuGRZiZTpx7CMO_K7LUAKy4k7_OHjs&usqp=CAU)

[5] Référence :

U.S. Environmental Protection Agency. (2017). Smoke from Fires. Récupéré le 3 mai 2023, de <https://www.epa.gov/pm-pollution/smoke-fires>