

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد بن باديس مستغانم

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS

MOSTAGANEM

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences Et Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d 'ordre : /GE/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Intitulé du sujet

**Effets du plasma atmosphérique sur l'accélération de la germination des graines de sorgho et son influence sur la croissance végétale**

Présenté par :

- BELHADJI Hanane

Soutenu le 26 /06/2024 jury composé :

Président : Mr SOLTANE Benalou aek	MAA	Université Mostaganem
Examineur : Mm NEDDAR.h	MCA	Université Mostaganem
Encarteur : Mr. BARDADI BENDAHA Mourad	MAA	Université Mostaganem
Co-encadrant : Mr KHARBOUCHE Fouad	MCB	Université Mascara

Année Universitaire : 2023-2024

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier dieu, tout puissant pour la santé et la volonté qu'il m'a donnée pendant toutes ces années d'étude.*

*Je tiens à remercier mon encadrant « Mr BARDADI BENDAHA Mourad », et mon co-encadrant « Mr KHARBOUCHE Fouad » je la remercier de m'avoir encadré, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.*

*A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mes respects et mes gratitudes*

*Merci à vous tous.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur amour infini, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants tout au long de cette aventure.*

*À mes professeurs, pour leur expertise, leur patience et leur passion qui m'ont inspiré à atteindre de nouveaux sommets intellectuels.*

*À toutes les personnes qui ont croisé ma route et m'ont apporté leur soutien, leur aide et leurs encouragements, je vous dédie ce mémoire avec gratitude et reconnaissance.*

## ***Résumé***

La décharge couronne est actuellement considérée comme le phénomène physique de base pour plusieurs applications industrielles tels que ; traitement des effluent gazeux, la séparation de déchets, la production de l'ozone, le traitement des surfaces. Cette décharge introduise des mélanges de substances ionisées notamment l'ozone, l'azote ionisé, ces gaz peuvent être utilisé pour de nombreuse applications par exemple l'ozone qui sert à dépolluer les eaux polluées ainsi que l'azote qui un élément primordial dans le processus de croissance et de développement des structures végétales des plantes.

Cette contribution consiste en premier lieu à concevoir un prototype de traitement des graines dans une configuration fil-plaque (chambre de traitement) pour étudier les paramètres influençant sur la décharge couronne et la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes. Les résultats de cette première approche sont très encourageant pour la suite de notre recherche sur l'accélération de la germination.

**Mots-clés :** Germination, croissance des plantes, décharge couronne, temps de traitement, graines.

## **Abstract:**

The corona discharge is currently considered as the basic physical phenomenon for several industrial applications such as; gaseous effluent treatment, waste separation, ozone production, and surface treatment. This discharge introduces mixtures of ionized substances including ozone, and ionized nitrogen, these gases can be used for many applications, for example, ozone which is used to clean up polluted water as well as nitrogen which is an essential element in the process of growth and development of plant structures of plants.

This contribution consists first of all designing a seed treatment prototype in a wire-plate configuration (treatment chamber) to study the parameters influencing on the corona discharge and the distribution of the electric field in the inter-electrode space. The results of this first approach are very encouraging for our research continuation on the seeds germination acceleration.

**Keywords:** Germination, plant growth, corona discharge, treatment time, seeds.

## ملخص

التفريغ الهالي يعتبر حالياً الظاهرة الفيزيائية الأساسية لعدة تطبيقات صناعية مثل معالجة النفايات الغازية، فصل النفايات، إنتاج الأوزون، معالجة الأسطح. هذا التفريغ يُدخل مزيجاً من المواد المؤينة وخاصة الأوزون، والنيتروجين المؤين، ويمكن استخدام هذه الغازات في العديد من التطبيقات، على سبيل المثال الأوزون الذي يُستخدم لتنقية المياه الملوثة وكذلك النيتروجين الذي تتضمن هذه المساهمة أولاً تصميم نموذج أولي لمعالجة . يعتبر عنصراً أساسياً في عملية نمو وتطور الهياكل النباتية للنباتات البذور في تكوين سلك-لوح (غرفة المعالجة) لدراسة العوامل المؤثرة على التفريغ الهالي وتوزيع المجال الكهربائي في الفضاء

**الكلمات المفتاحية:** الإنبات، نمو . بين الأقطاب. نتائج هذه المقاربة الأولى مشجعة للغاية لمواصلة أبحاثنا حول تسريع الإنبات .النباتات، التفريغ الهالي، وقت المعالجة، البذور

## Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

### Chapitre I

#### Généralité sur la décharge couronne

I.1. Introduction.....	3
I.2. Aperçu historique.....	3
I.3. Définition.....	4
I.4. Caractéristique courant-tension et régimes de décharge couronne .....	5
I.5. Processus de la décharge de couronne .....	6
I.5.2. Mécanisme au niveau microscopique.....	7
I.6. Couronnes positives .....	9
I.6.2. Propriétés.....	9
I.6.3. Mécanisme .....	10
I.7. Corons négatifs .....	11
I.7.2. Propriétés.....	11
I.7.3. Mécanisme .....	11
I.8. Seuil d'apparition de la décharge couronne .....	13
I.9. Facteurs influençant la décharge couronne .....	13
I.9.2. Facteurs géométriques.....	14
I.9.2.1. Rayon de la courbure .....	14
I.9.2.2. Distance inter-électrodes .....	14
I.9.2.3. La nature des électrodes.....	15
I.9.4.1. La forme d'électrodes .....	15
I.9.5.1. Etat de surface .....	16
I.9.3. Les facteurs physico-chimiques .....	17
I.9.3.1. La densité de l'air .....	17
I.9.3.2. La température .....	17
I.9.3.3. L'humidité .....	17
I.9.3.4. La pression.....	17
I.9.4. Facteurs électriques .....	18
I.10. Problèmes liés aux décharges de corona.....	18
I.11. Applications des décharges de corona .....	18
I.11.2. Production d'ozone .....	19
I.11.3. Traitement des surfaces .....	19

I.11.4. Séparation électrostatique .....	20
I.11.5. Parafoudre .....	21
I.11.6. Filtre électrostatique .....	21
I.11.7. Neutralisation .....	22
I.12. Séchage des aliments par EHD (EHD drying) .....	22
I.13. Conclusion .....	23

## *Chapitre II*

### *Application du champ électrique dans la germination des semences*

II.1. Introduction.....	25
II.2. Définition.....	25
II.3. Traitements conventionnels de semences .....	27
II.3.1. Traitement mécanique.....	27
II.3.2. Traitement par l'eau.....	27
II.3.3. Traitement par la chaleur sèche.....	28
II.3.4. Traitement chimique .....	28
II.4. Traitements alternatifs de semences .....	28
II.4.1. Traitement par champ électrique.....	28
II.4.2. Traitement par Laser .....	31
II.4.3. Traitement par champ magnétique .....	38
II.4.4. Traitement par eau magnétisée.....	43
II.4.5. Traitement par champ électromagnétique .....	45
II.4.6. Traitement par plasma.....	46
II.4.7. Traitement par décharge couronne.....	47
II.4.8. Traitement à basse tension .....	48
II.5. Conclusion .....	49

## *Chapitre III*

### *Résultats et interprétation*

III .1. Introduction .....	51
III .2. Plan de travail.....	51
III .3. Méthodologie et organisation des expériences .....	52
III .3.1. Réalisation d'une alimentation haute tension DC .....	52
III .3.2. Réalisation de la chambre de traitement.....	55

III .3.3. Préparation et choix des échantillons de semences à traiter .....	56
III 3.4. Préparation des semis et des plaques de semis .....	57
III .3.5. Les graines utilisées.....	68
III.4. Etudes expérimentale.....	61
III.5. Caractéristiques courant-tension .....	62
III.6. Morphologie de la décharge couronne dans la configuration.....	62
III.7. Résultats et interprétation de l'accélération de la germination.....	63
III.8. Conclusion.....	70
Conclusion Générale .....	71
Références chapitre 1.....	73
Références chapitre 2.....	74
Références chapitre 3.....	75



## Liste des figures

Figure I-1 : Configurations d'électrodes pour la génération de décharges couronnes Source spécifiée non valide.....	5
Figure I-2Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan) .....	5
I.5.1. Mécanisme au niveau macroscopique.....	7
Figure I-3Amorçage de le décharge Source spécifiée non valide .....	8
Figure I-4Multiplication électronique (phénomène d'avalanche électronique) Source spécifiée non valide .....	8
Figure I-5Maintien de la décharge Source spécifiée non valide.....	9
Figure I-6: Descriptif de la décharge couronne positive Source spécifiée non valide .....	11
Figure I-7 Descriptif de la décharge couronne négative Source spécifiée non valide.....	12
Figure I-8Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne Source spécifiée non valide .....	14
Figure I-9Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes Source spécifiée non valide. ....	15
Figure I-10 distribution du champ dans un système pointe-plan Source spécifiée non valide.....	16
Figure I-11distribution du champ dans un système plan-plan Source spécifiée non valide.....	16
Figure I-12Schémad'évolutiondeladéchargeobservéeenfonctiondelapressionSource spécifiée non valide .....	18
Figure I-13 Principe de production d'ozone par décharge couronne Source spécifiée non valide ....	19
Figure I-14 Séparation électrostatique par la décharge couronne Source spécifiée non valide .....	20
Figure I-15parafoudreSource spécifiée non valide.....	21
Figure I-16 utilisation de la décharge couronne dans le filtre Source spécifiée non valide .....	21
Figure I-17Illustration schématique du processus de génération de flux d'air EHD Source spécifiée non valide .....	23
Figure II.1. Courbe théorique d'imbibition d'une semence .....	25
Figure II.2 : Facteurs influençant la germination .....	26
Figure II.3: Système de traitement par plasma.....	46
Figure II.4: Système de traitement par Corona .....	47

Figure. III.1. Schéma d'un doubleur de schenkel (polarité négative).....	52
Figure. III.2. Schéma d'un doubleur de schenkel (polarité positive) .....	52
Figure. III.3. Photographie du circuit réalisé.....	54
Figure III.4. Schéma descriptif du montage de mesure de la haute tension .....	54
Figure. III.5. Photographie du diviseur utilisé.....	55
Figure. III.6. Schéma simplifié de la chambre à réaliser .....	56
Figure. III.7. Photo de la chambre de traitement en mod opérationnel .....	56
Figure. III.8. Plaque de germination.....	57
Figure III.9. Technique de préparation des semis.....	58
Figure III.10. Photographie de la graine de dura.....	59
<i>Figure III.11. Les étapes de germination (htt3) .....</i>	<i>59</i>
Figure III.12. Grain de coriandre.....	59
Figure. III.13. Grain de haricot.....	60
Figure III.14. Graine de sorgho .....	60
Figure. III.15. Vue d'ensemble du banc expérimental .....	62
Figure.III.16. Morphologie de la décharge couronne pour une tension de 30 kV et une distance inter-électrode D=4cm.....	62
Figure. III.17. Suivie de la germination pour les trois échantillons (20H).....	64
Figure. III.18. Suivie de la germination pour les trois échantillons (33H).....	65
Figure. III.19. Suivie de la germination pour les trois échantillons (46 H).....	66
Figure. III.20. Suivie de la germination pour les trois échantillons (59 H).....	67
Figure.III.21. Croissance des graines pous différents cas étudiés 10,15,20 munîtes .....	69

### ***Liste des tableaux :***

Tableau.III.1. La germination dans les conditions normale des différentes graines.....	61
--	----

## **Introduction Générale**

L'utilisation excessive des produits chimiques en agriculture est devenue néfaste non seulement à l'environnement mais à la santé humaine, il existe un intérêt croissant pour les méthodes d'amélioration de la qualité des semences et de minimiser le temps de germination ainsi que l'état de santé des semences qui seraient sans danger pour l'environnement.

Il s'agit particulièrement des méthodes basées sur l'effet de divers facteurs physiques, tels que la lumière laser, le champ magnétique, le traitement des semences avec de l'eau magnétisée, le champ électrique.

La production de semis de haute qualité est la tâche principale de l'industrie semencière. Pour produire un tel matériel de semis, de nombreuses conditions doivent être remplies, par exemple conditions météorologiques favorables, culture correcte et protection des plantes mères. Une bonne technologie de culture dans les plantations de semences, y compris une nutrition rationnelle des plantes, a un effet significatif sur la biologie de la floraison, la nouaison, la composition chimique et les propriétés physiologiques des fruits.

Le but principal de ce mémoire est de contribuer à l'accélération de la germination des graines par la technique d'application de la décharge couronne.

Dans un premier temps, une revue sur revue sur la décharge couronne son historique, principe, ces deux polarités la caractéristiques courant-tension et l'application de cette dernière dans les divers domaines industriels notamment l'agroalimentaire.

La deuxième partie présente une étude bibliographique sur les méthodes basées sur l'effet de divers facteurs physiques pour améliorer la germination des semences.

Enfin, la troisième partie est consacrée la description du matériel et méthodes déployés pour la réalisation de ce projet de fin d'étude ainsi que la présentation des résultats et leurs interprétations. Cette contribution est considérée comme une première tentative de de polarisation d'un tel procédé qui de l'effet de la décharge couronne sur l'amélioration de la germination et la croissance des plantes.

# *Chapitre I*

*Généralité sur la décharge  
couronne*

---

## *Chapitre 1 : Généralité sur la décharge couronne*

---

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

Avec le développement des réseaux électriques et la répartition inégale de l'énergie dans le monde, des lignes de transport de haute tension sont construites pour transporter l'énergie vers le consommateur, et sous l'effet de surtensions dues à la foudre ou aux opérations de manœuvre, les défauts dans les lignes de transmission sont souvent accompagnés d'une décharge couronne. Cette dernière se produit autour de la surface des conducteurs accompagnée avec des perturbations d'énergie électrique le long des lignes de transmission aériennes, production des gaz (Ozone), vibration des conducteurs, bruit audibles et interférences radiotélévision. Cependant le phénomène de l'effet couronne possède un effet bénéfique sur la réduction des surtensions transitoires qui se propageant sur les lignes de transmission.

Dans ce chapitre on étale un aperçu historique puis une définition de la décharge couronne. Ensuite on évoque un état de l'art sur ce phénomène physique dans ses deux formes ainsi que la caractéristique courant-tension puis l'aspect physique de développement de la décharge couronne ainsi que ses utilisations dans l'industrie.

### **I.2. Aperçu historique**

L'effet de couronne a intrigué les physiciens dès qu'on l'a constaté. Son nom provient du fait qu'il évoque l'aspect du halo lumineux périphérique au soleil observé lors des éclipses. Il a fait l'objet de premières publications en 1915 par F.W. Peek qui a alors établi une première loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de cet effet [1].

La recherche s'est aussi intéressée aux vibrations de câbles induites par l'effet de couronne, à partir des années 1930, en laboratoire haute-tension et sur la base d'observations et mesures faites in situ sur le réseau électrique industriel, puis on s'est intéressé au début des années 1970 à l'amplitude de ces vibrations, avant de chercher à mieux les expliquer, ce qui fut fait dans les années 1980, notamment grâce à un code de calcul produit par EDF pour analyser la formation des pertes, permettant «de suivre physiquement le mécanisme des pertes: entre autres performances, ce code permet de visualiser le mouvement des charges d'espace » et avec des conclusions largement acceptées, par exemple produites en 1986 par M.Farzaneh à l'Université Paul Sabatier de Toulouse,

de les simuler et, plutôt à partir des années 2000, de les modéliser [2].

Les physiciens ont d'abord montré que cet effet dépendait du champ électrique superficiel du conducteur, mais aussi de son diamètre, de son état de surface puis de la densité (et humidité) de l'air environnant.

Concernant les lignes électriques, le phénomène a surtout été étudié pour le courant alternatif. Certains auteurs plaident depuis les années 1990 pour des études sur les lignes haute ou très haute tension ou ultra-hautes tensions, en tension continue qui apparaissent dans certains pays (pour les transports longue-distance d'électricité) [3].

### **I.3. Définition :**

L'effet couronne ou effet de décharge corona est un phénomène dans lequel un courant électrique  $I$  circule entre un conducteur de potentiel électrique élevé et d'un fluide neutre environnant, généralement air.

L'effet se manifeste lorsque la valeur de potentiel dépasse une valeur prédéterminée suffisante pour provoquer l'ionisation le fluide isolant, mais insuffisante, car elle déclenche un arc électrique. Une fois ionisé, le fluide devient plasma et il conduit l'électricité. Le circuit électrique  $I$  se ferme lorsque la charge électrique transportée par ions vient lentement au point du potentiel de référence du générateur, habituellement terre [4].

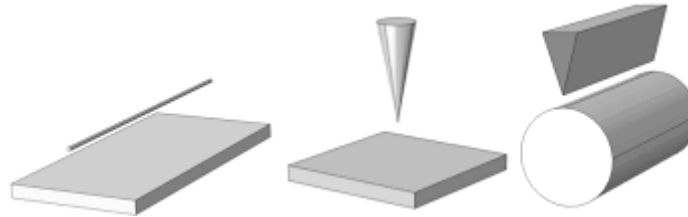
Lorsque l'on utilise des conducteurs de plus gros diamètre, comme ceux qui équipent les lignes aériennes, on constate que la gaine lumineuse évolue en décharges discrètes que les spécialistes ont coutume d'appeler « aigrettes » ou « effluves » [1].

Si le grand objet potentiel a une partie pointue, la densité de charge a tendance à être plus élevée dans cette zone, le champ électrique correspondant est supérieur et l'air ambiant se déplace vers un potentiel plus élevé par rapport à d'autres régions, à un phénomène connu sous le nom pouvoir dispersant des conseils, ou « effet de pointe ». Pour cette raison, l'effet couronne peut se manifester limitée à proximité des conseils mais pas sur d'autres parties du conducteur. De là, l'ionisation peut prolonger ou non, en fonction de l'acuité de la pointe. Si l'ionisation continue d'augmenter au lieu déstabiliser, vous pouvez être ouvert par un plasma vers le potentiel du point neutre jusqu'à ce que le déclenchement d'une étincelle ou un arc.

La production corona implique généralement l'utilisation de deux électrodes, un fait d'augmenter l'ionisation (la pointe d'une aiguille ou un fil mince) et une faible courbure (une plaque, ou la terre elle-même).

L'effet couronne associé, vous pouvez avoir une émission de lumière, la production d'ozone et caractéristique de bruit [5]

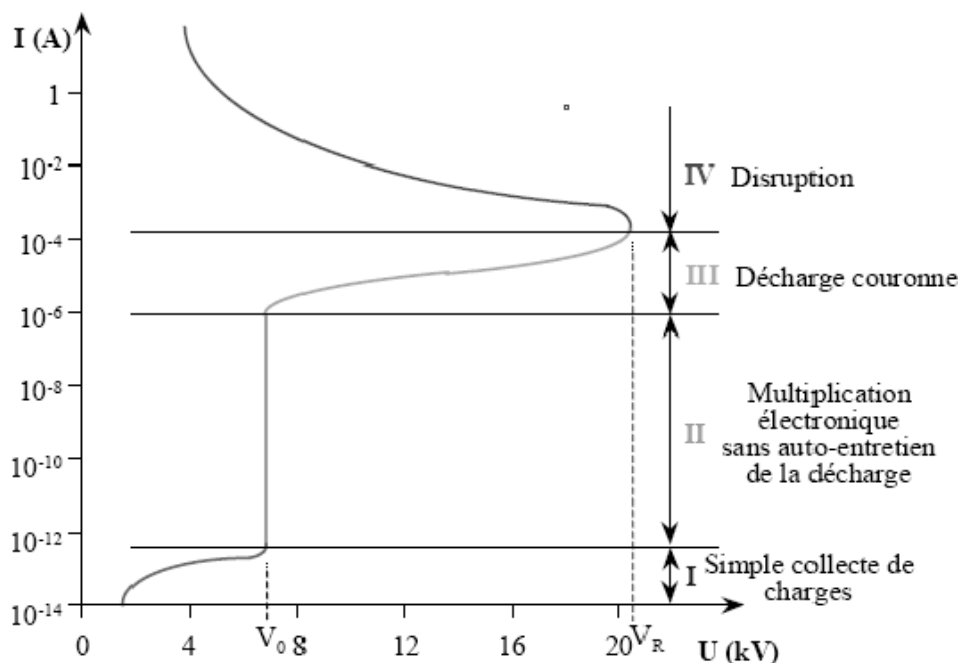
Il existe différentes configurations d'électrodes permettant de créer des décharges couronnes. La figure I.1 montre les configurations les plus communément utilisées qui sont de types : fil/plan, pointe/plan, couteau/plan, et fil/cylindre [6].



**Figure I -1 : Configurations d'électrodes pour la génération de décharges couronnes [6].**

**I.4.Caractéristique courant-tension et régimes de décharge couronne**

La figure décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée la courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne.



**Figure I -2 Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à Pression atmosphérique (configuration pointe-plan) [7].**

**Le premier régime :** consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu.

Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmique ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrodes [7].

Le courant est très faible et il est dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou rayonnement cosmique. Dans ce cas le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique [8].

**Le second régime :** qui se produit à partir d'une tension seuil  $\{V_0\}$ , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretenu de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée [7].

**Le troisième régime :** l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieure. La décharge est autoentretenu. C'est le régime de la décharge couronne, ou apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui est responsables de la composante impulsionnelle du courant [7].

**Le quatrième régime :** au-delà d'une tension appliquée  $\{V_r\}$ , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz le champ réduit  $E$  est alors  $N$

Suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique [7].

Les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. C'est le régime des décharges disruptives tel que les arcs électriques [8].

### **Processus de la décharge de couronne :**

Il existe toujours dans l'air un certain nombre d'électrons libres, créés par rayonnements cosmiques ou dus à l'ionisation naturelle par les substances radioactives dans la terre. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique élevé, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent. Il se crée alors de nouveaux électrons libres, lesquels soumis au même champ vont également ioniser des molécules et ainsi de suite, le processus prend une allure d'avalanche dite de Townsend. Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ ait une valeur suffisante [6].



**I.5.1. Mécanisme au niveau macroscopique**

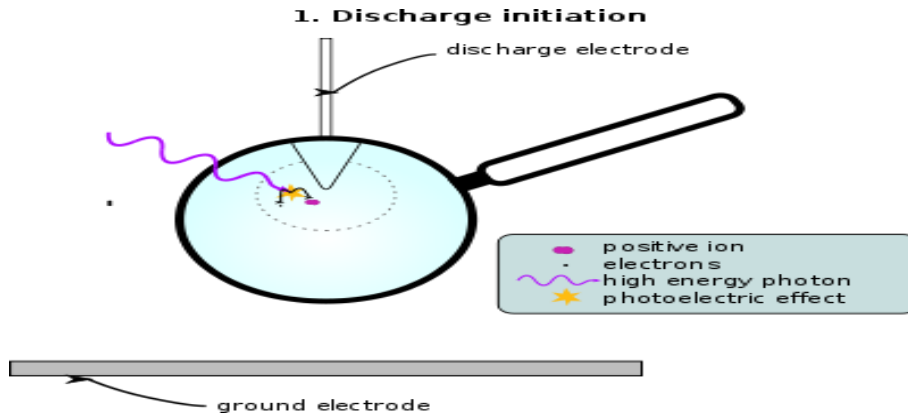
Une décharge couronne se produit lorsqu'un courant, continu ou alternatif, se crée entre deux électrodes portées à un haut potentiel et séparées par un fluide neutre, en général l'air, par ionisation de ce fluide. Un plasma est alors créé et les charges électriques se propagent en passant des ions aux molécules de gaz neutres.

Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment grand, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. Le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge de Corona : le phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice, la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse. Les décharges de corona se produisent donc en général entre une électrode de rayon de courbure faible (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'un plasma, et une autre de rayon de courbure important (une plaque métallique ou la terre).

Si la géométrie du conducteur et la valeur du champ sont telles que la région ionisée s'étend au lieu de se stabiliser, le courant peut finir par trouver un chemin jusqu'à l'électrode inverse, il se forme alors des étincelles ou un arc électrique.

**I.5.2. Mécanisme au niveau microscopique :**

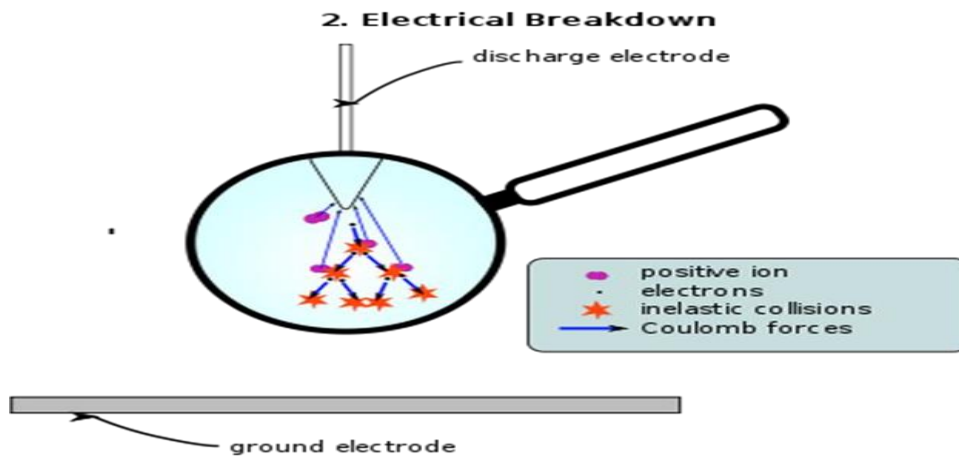
Un atome ou une molécule neutre du fluide environnant l'électrode est ionisée par un événement extérieur (par exemple par interaction avec un photon), un ion positif et un électron sont libérés (Figure I.3).



**Figure I -3Amorçage de la décharge [9].**

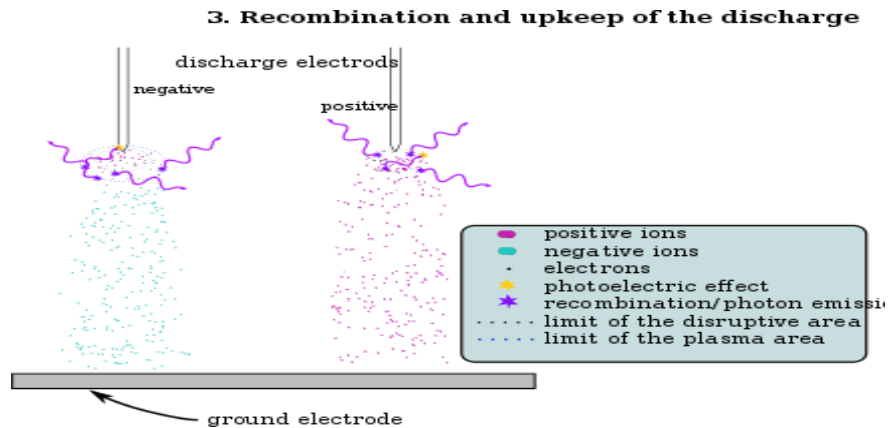
Ces deux particules les étant de charges in verses, le champ électrique crée sur chacune d'elles une force électrique égale en norme mais de sens opposé et les sépare, empêchant leur recombinaison et leur apportant une énergie cinétique importante. Ceci initie le phénomène de claquage.

L'électron étant de masse beaucoup plus faible que l'ion, il est fortement accéléré, et entre en collision inélastique avec des atomes neutres, ce qui tend à créer de nouvelles paires électrons/ions positifs, qui suivront le même processus. On parle d'effet d'avalanche(figureI.4).



**Figure I -4Multiplication électronique (phénomène d'avalanche électronique) [9].**

Des ions ainsi créés sont attirés par la seconde électrode et permettent ainsi l'établissement d'un courant (figure I.5).



**Figure I -5 Maintien de la décharge [9].**

Pour expliquer le mécanisme du développement de la décharge couronne, les recherches ont abouti à considérer deux théories complémentaires.

- La première est la théorie de Townsend qui tient compte de tout l'intervalle inter-électrodes.

- La seconde, dite théorie Streamer élaborée pour palier certains inconvénients apparaissant sur le plan théorique [10].

## **I.6. Couronnes positives**

### **I.6.1. Propriétés**

Une couronne positive se manifeste par un plasma uniforme sur toute la longueur d'un conducteur. On peut souvent le voir brillant bleu / blanc, bien que la plupart des émissions soient dans l'ultraviolet. L'uniformité du plasma est causée par la source homogène d'électrons secondaires d'avalanche décrite dans la section mécanisme ci-dessous. Avec la même géométrie et les mêmes tensions, il apparaît un peu plus petit que la couronne négative correspondante, en raison de l'absence d'une région de plasma non ionisante entre les régions intérieure et extérieure.

Une couronne positive a une densité d'électrons libres beaucoup plus faible par rapport à une couronne négative ; peut-être un millièème de la densité électronique et un centième du nombre total d'électrons. Cependant, les électrons dans une couronne positive sont concentrés près de la surface du conducteur incurvé, dans une région du gradient de potentiel élevé (et donc les électrons ont une énergie élevée), alors que dans une couronne négative, de nombreux électrons sont à l'extérieur, zones de champ inférieur. Par conséquent, si des électrons doivent être utilisés dans une application qui nécessite une énergie d'activation élevée, les coronas positifs peuvent supporter une constante

de réaction plus grande que les coronas négatifs correspondants; bien que le nombre total d'électrons puisse être inférieur, le nombre d'électrons à très haute énergie peut être plus élevé.

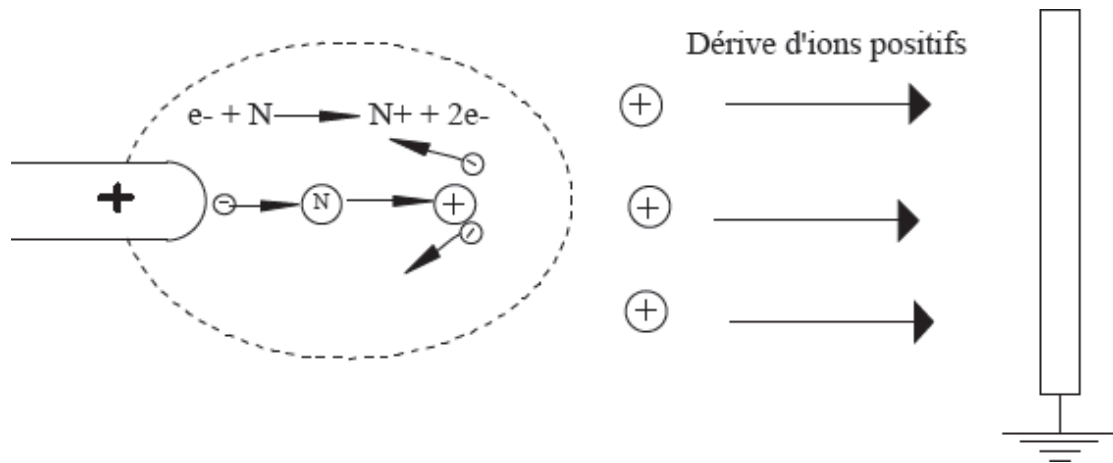
Les coronas sont des producteurs efficaces d'ozone dans l'air. Une couronne positive génère beaucoup moins d'ozone que la couronne négative correspondante, car les réactions qui produisent de l'ozone sont relativement peu énergétiques. Par conséquent, le plus grand nombre d'électrons d'une couronne négative conduit à une production accrue.

Au-delà du plasma, dans la région unipolaire, le flux se fait d'ions positifs de faible énergie vers l'électrode plate.

### **I.6.2. Mécanisme**

Comme avec une couronne négative, une couronne positive est initiée par un événement d'ionisation exogène dans une région à gradient de potentiel élevé. Les électrons résultant de l'ionisation sont attirés vers l'électrode courbe, et les ions positifs en sont repoussés. En subissant des collisions inélastiques de plus en plus près de l'électrode incurvée, d'autres molécules sont ionisées dans une avalanche d'électrons.

Dans une couronne positive, des électrons secondaires, pour d'autres avalanches, sont générés principalement dans le fluide lui-même, dans la région à l'extérieur du plasma ou de la région d'avalanche. Ils sont créés par ionisation causée par les photons émis par ce plasma dans les divers processus de désexcitation se produisant dans le plasma après les collisions d'électrons, l'énergie thermique libérée dans ces collisions créant des photons qui sont rayonnés dans le gaz. Les électrons résultant de l'ionisation d'une molécule de gaz neutre sont ensuite attirés électriquement vers l'électrode incurvée, attirés dans le plasma, et ainsi commence le processus de création d'avalanches supplémentaires à l'intérieur du plasma.



**Figure I -6 : Des criptife la décharge couronne positive [11].**

## **I.7. Corons négatifs**

### **I.7.1. Propriétés**

Une couronne négative se manifeste par une couronne non uniforme, variant selon les caractéristiques de surface et les irrégularités du conducteur incurvé. Il apparaît souvent sous forme de touffes de la couronne aux arêtes vives, le nombre de touffes variant avec la force du champ. La forme des coronas négatifs est le résultat de sa source d'électrons secondaires d'avalanche. Il semble un peu plus grand que la couronne positive correspondante, car les électrons peuvent dériver hors de la région ionisante, et ainsi le plasma continue à une certaine distance au-delà. Le nombre total d'électrons et la densité électronique sont beaucoup plus importants que dans la couronne positive correspondante. Cependant, ils sont principalement d'énergie inférieure, du fait qu'ils se trouvent dans une région à gradient de potentiel plus faible. Par conséquent, alors que pour de nombreuses réactions, l'augmentation de la densité électronique augmentera la vitesse de réaction, l'énergie plus faible des électrons signifiera que les réactions qui nécessitent une énergie électronique plus élevée peuvent avoir lieu à une vitesse plus faible.

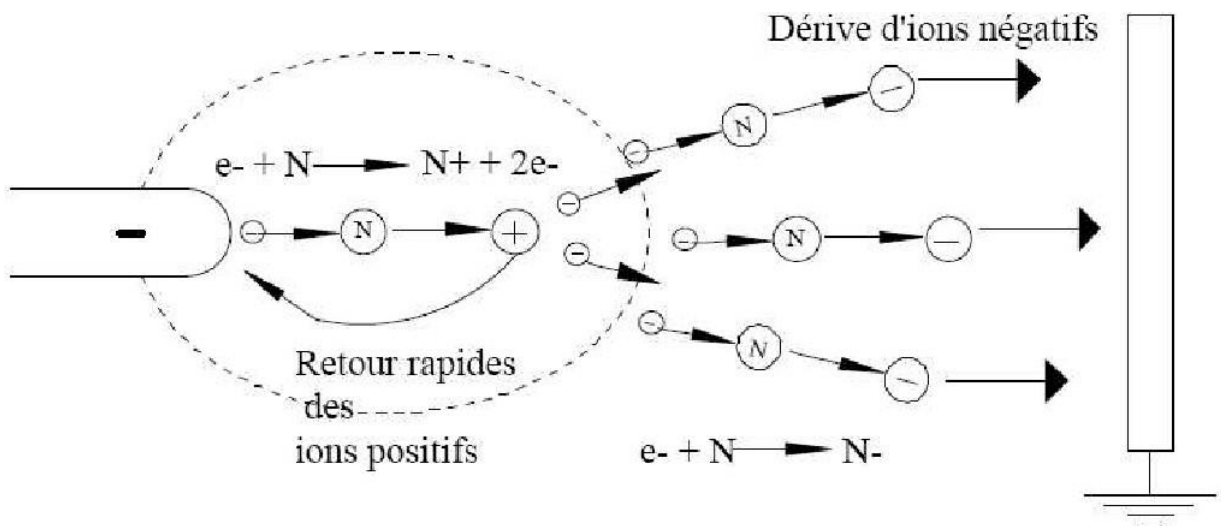
### **I.7.2. Mécanisme :**

Les coronas négatives sont plus complexes que les coronas positives en construction. Comme pour les coronas positifs, l'établissement d'une couronne commence par un événement d'ionisation exogène générant un électron primaire, suivi d'une avalanche d'électrons.

Les électrons ionisés du gaz neutre ne sont pas utiles pour soutenir le processus de couronne négative en générant des électrons secondaires pour d'autres avalanches, car le mouvement général

des électrons dans une couronne négative est vers l'extérieur de l'électrode incurvée. Pour la couronne négative, au contraire, le processus dominant générant des électrons secondaires est l'effet photoélectrique, à partir de la surface de l'électrode elle-même. La fonction de travail des électrons (l'énergie nécessaire pour libérer les électrons de la surface) est considérablement inférieure à l'énergie d'ionisation de l'air aux températures et pressions standard, ce qui en fait une source plus libérale d'électrons secondaires dans ces conditions. Encore une fois, la source d'énergie pour la libération d'électrons est un photon de haute énergie provenant d'un atome dans le corps du plasma se détendant après l'excitation d'une collision antérieure. L'utilisation de gaz neutre ionisé comme source d'ionisation est en outre diminuée dans une couronne négative par la forte concentration d'ions positifs se regroupant autour de l'électrode incurvée.

Dans d'autres conditions, la collision de l'espèce positive avec l'électrode courbe peut également provoquer une libération d'électrons.



**Figure I -7 Des criptif de la décharge couronne négative [11]**

La différence, alors, entre les couronnes positives et négatives, en ce qui concerne la génération d'avalanches d'électrons secondaires, est que dans une couronne positive, elles sont générées par le gaz entourant la région du plasma, les nouveaux électrons secondaires se déplaçant vers l'intérieur, alors que dans une couronne négative corona, ils sont générés par l'électrode incurvée elle-même, les nouveaux électrons secondaires se déplaçant vers l'extérieur.

Une autre caractéristique de la structure des couronnes négatives est que lorsque les électrons dérivent vers l'extérieur, ils rencontrent des molécules neutres et, avec des molécules électronégatives (telles que l'oxygénée t lava peur d'eau), se combinent pour produire des ions

Négatifs. Ces ions négatifs sont ensuite attirés vers l'électrode positive non courbée, complétant le « Circuit » [11].

### **I.8. Seuil d'apparition de la décharge couronne**

L'étude du seuil d'apparition de la décharge couronne a fait l'objet de nombreuses études. Les travaux expérimentaux sur l'évaluation du seuil consistent généralement à mesurer la tension seuil  $V_S$  à laquelle correspond un champ seuil  $E_S$  à la surface de l'électrode active [10].

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique de l'effet de couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat. Selon F.W. Peek, pour une configuration cylindrique, l'apparition de l'effet de couronne est fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur, et de la densité de l'air selon la relation suivante [12] :

$$E_C = E_S \delta \left( 1 + \frac{K}{\sqrt{\delta} \cdot r} \right) \quad (I.1)$$

Où :  $E_C$  est le champ critique, en **KV/cm** ;

$E_S$  est le champ superficiel,  **$E_S = 30 \text{ kV/cm}$**

$K$  est le coefficient,  **$K = 0.308 P/T$**  –

$R$  est le rayon du conducteur, en **cm** ;

$\delta$  est la densité relative de l'air  **$\delta = 3.92P / (273 + t)$** ,

Dans les conditions normales ( $P = 76 \text{ cm Hg}$  et  $t = 25^\circ\text{C} \Rightarrow \delta = 1$ )

Test température ambiante,  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $T$  est

la température  **$= 273^\circ\text{C} + t$**  en  $^\circ\text{C}$   $P$  est la

pression de l'air, en **cm Hg**.

### **I.9. Facteurs influençant la décharge couronne**

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [13].

On distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physico-chimiques.
- Facteurs électriques

**I.9.1.Facteurs géométriques**

**I.9.1.1.Rayon de la courbure**

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

**I.9.1.2. Distance inter-électrodes**

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la (figure I.8).

Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes [14].

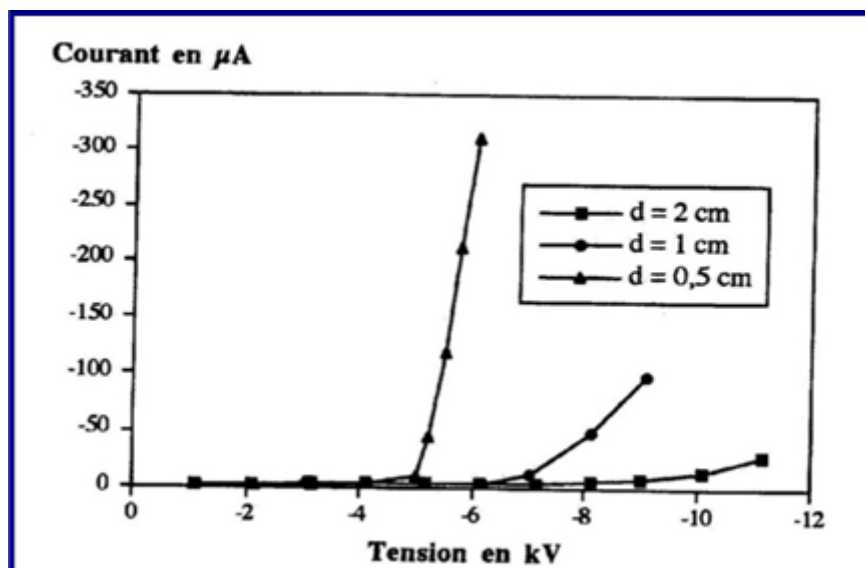


Figure I -8Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne[14].



### I.9.1.3. La nature des électrodes :

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la (figure I-9).

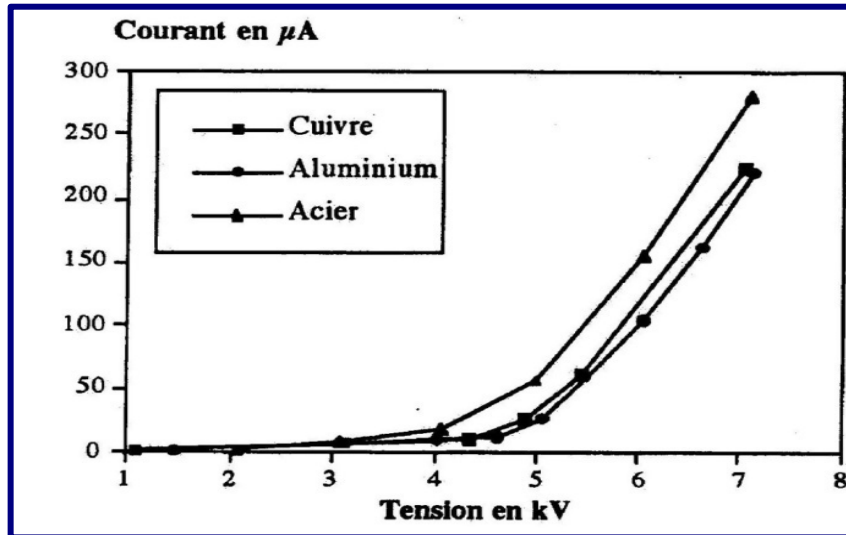


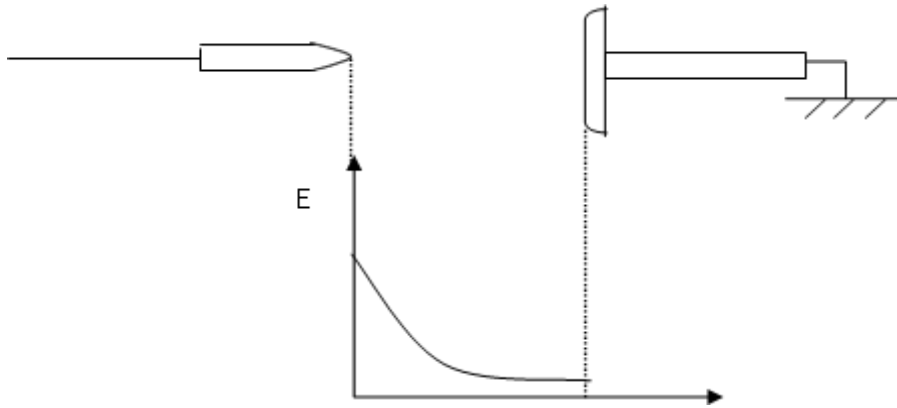
Figure I -9 Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes [14].

### I.9.4.1. La forme d'électrodes

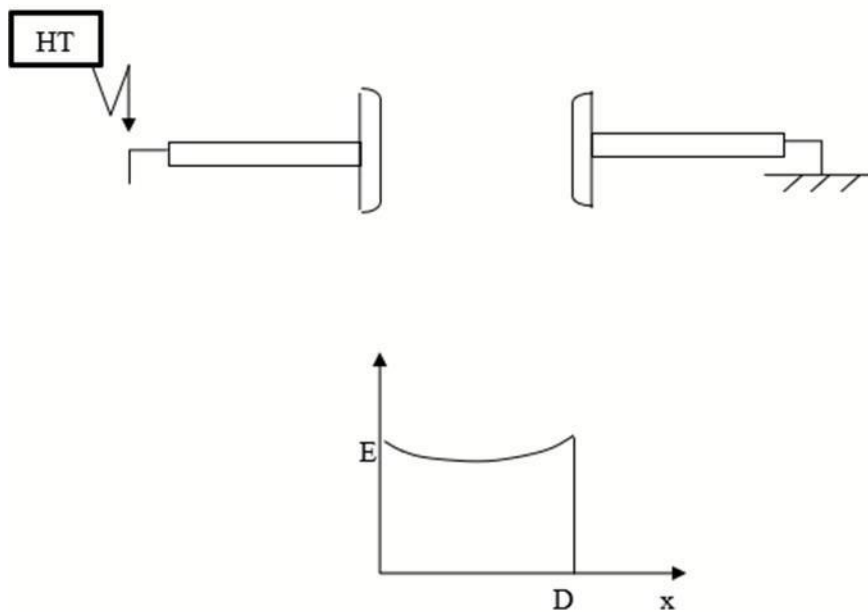
Dans les systèmes d'électrodes utilisées, la distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode, avant amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes.

En champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan (figure I.10), la décharge couronne présente une zone de stabilité. Ce type de décharge est caractérisé par une tension seuil  $U$  de son apparition une tension  $U_d$  de sa transition vers l'arc électrique.

Par contre, en champ homogène (figure I.8), dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit, la décharge couronne est inexistante et les tensions  $U$  et  $U_d$  sont confondues.



**Figure I -10** Distribution du champ dans un système pointe-plan [15].



**Figure I -11** Distribution du champ dans un système plan-plan [15].

**I.9.5.1. Etat de surface**

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que, plus il se dégrade plus les pertes augmentent et plus le champ perturbateur est élevé. Parmi les facteurs de dégradation, la pollution végétale ou industrielle, voir suintement en surface de graisse de toronage, jouent un rôle important, mais malheureusement difficilement maîtrisable. Plus encore, la pluie, en raison des aspérités que constituent les gouttes d'eau suspendues aux conducteurs, multiplie le nombre d'aigrettes génératrices de l'effet couronne [15].

**I.9.2. Les facteurs physico-chimiques****I.9.2.1. La densité de l'air**

Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

La tension  $U$  des t proportionnel le à la densité de l'air :

Avec: 
$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (I.2)$$

$U_{dn}$ : Tension de claquage dans les conditions normales.

$\frac{K_h}{\delta}$ : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

**I.9.2.2. La température**

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [15].

**I.9.2.3. L'humidité**

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante, surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo ionisation [15]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [14]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

**I.9.2.4. La pression**

A partir de la tension atmosphérique, l'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure I.12 montre l'effet de la pression sur la décharge.

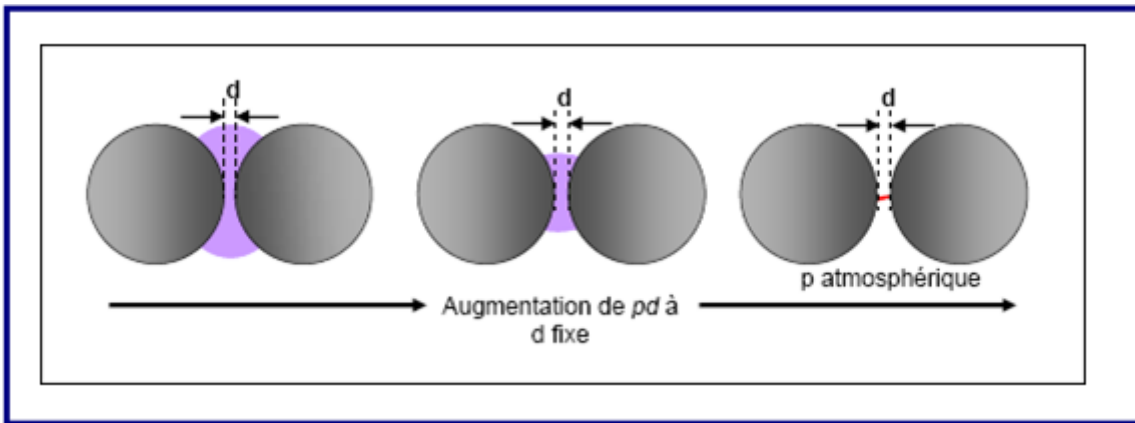


Figure I -12 Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [16].

### I.9.3. Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [15].

### I.10. Problèmes liés aux décharges de corona :

- Produire des bruits acoustiques directement rayonnés par les conducteurs.
- Perturber certaines fréquences radioélectriques (radio et télévisuelles).
- Produire des vibrations des câbles.
- Une perte de puissance et une usure accélérée de certains composants de la ligne (conducteurs, pinces d'ancrages, supports, chaînes d'isolateurs).
- Une pollution de l'air (l'ozone troposphérique est un polluant mais aussi un précurseur de plusieurs autres polluants de l'air).

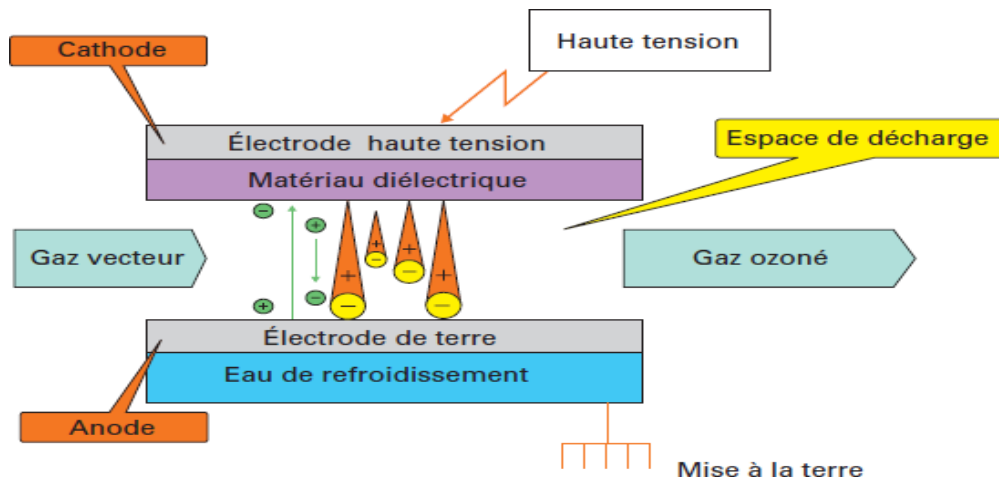
### I.11. Applications des décharges de corona

Les décharges couronne sont utilisées dans de nombreux domaines où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvants).

**I.11.1. Production d'ozone**

L'ozone est un gaz instable. Il est donc produit sur le site d'utilisation.

La seule technique permettant la production d'ozone en quantité industrielle ( $>2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ) est la décharge électrique de type décharge couronne (corona) dans un gaz sec contenant de l'oxygène. Cette technique a pour principe d'appliquer une différence de potentiel alternative comprise entre 3 et 20 kV entre deux électrodes entre lesquelles circule le gaz



**Figure I -13 Principe de production d'ozone par décharge couronne [17].**

Dès l'application d'une tension, les électrons émis à la cathode provoquent l'ionisation et l'excitation des espèces présentes dans le gaz. Le courant électronique augmente alors par effet combiné des ionisations successives et des décharges secondaires initiées par les photons émis par les espèces dans un état métastable ou excité. L'avalanche de charge électrique négative qui en résulte se propage très rapidement vers l'anode.

Le milieu produit contient, outre des électrons, des espèces neutres et ionisées à l'état excité. Il est appelé plasma froid en référence à sa concentration en électrons et à la température de ces derniers beaucoup plus faible que celle des molécules. À ce stade de la décharge, l'énergie acquise par les électrons est alors suffisante pour dissocier l'oxygène en radicaux et initier la formation d'ozone par recombinaison avec les molécules d'oxygène [17].

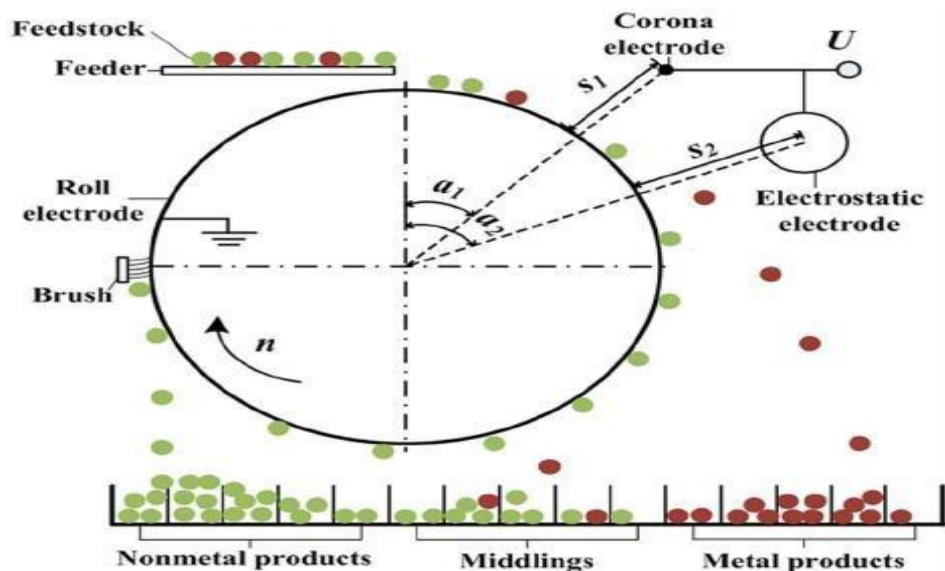
**I.11.2. Traitement des surfaces :**

Le traitement des surfaces est le deuxième domaine d'utilisation des plasmas froids produits par décharge couronne. Le premier secteur à les avoir adoptés couramment est la microélectronique pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés. En raison de leurs caractéristiques et de leurs qualités intrinsèques, ils se diffusent dans d'autres secteurs comme la métallurgie et la

mécanique (durcissement superficiel et protection anti corrosion des pièces et outillages), la plasturgie (préparation de la surface à une enduction ultérieure, nettoyage et dégraissage, Élaboration de fonctions sélectives sur membranes, modification du coefficient de frottement, création d'un effet barrière, notamment pour les emballages alimentaires), le textile(anti-mouillabilité, anti glisse),ou encore l'optique et l'optoélectronique (dépôts organométalliques multicouches) [18].

### **I.11.3. Séparation électrostatique :**

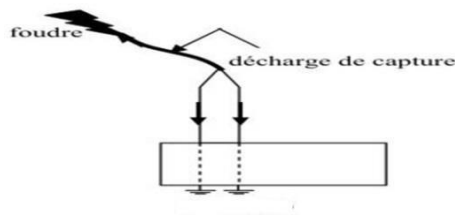
Les déchets de cartes de circuits imprimés (PCB) ont une teneur en métal de près de 28%, y compris une abondance de métaux non ferreux tels que le cuivre, le plomb et l'étain. La pureté des métaux précieux dans les PCB est plus de 10fois supérieure à celle des minéraux riches en contenu. Par conséquent, le recyclage des PCB est un sujet important, non seulement du point de vue du traitement des déchets, mais également en ce qui concerne la valorisation des matériaux de valeur. Un nouveau procédé a été étudié qui impliquait un concassage mécanique, un tamisage, un séchage et une séparation électrostatique par décharge corona. Les résultats montrent qu'un processus de concassage en deux étapes pourrait éliminer complètement les métaux des plaques de base ; l'effet d'agrégation opposé à la production sur les poudres fines ; des tailles de particules comprises entre 0,6 et 1,2 mm sont les plus réalisables pour la séparation dans une application industrielle ; La séparation électrostatique Corona est un moyen efficace et environnemental pour récupérer les métaux des PCB [19].



**Figure I -14 Séparation électrostatique par la décharge couronne [19].**

**I.11.4. Parafoudre :**

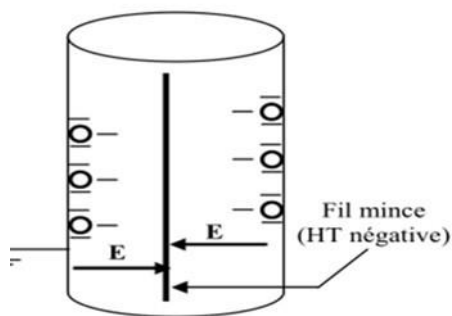
L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre (figure I.15).



**Figure I -15 parafoudre [17].**

**I.11.5. Filtre électrostatique :**

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (figure I-16).



**Figure0-16 utilisation de la décharge couronne dans le filtre [17].**

### **I.11.6. Neutralisation**

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

Les décharges de corona ont de nombreuses autres applications commerciales et industrielles tel que :

\*Photocopieur.

\* Laser à azote.

\* Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud)

\*Coloration des véhicules.

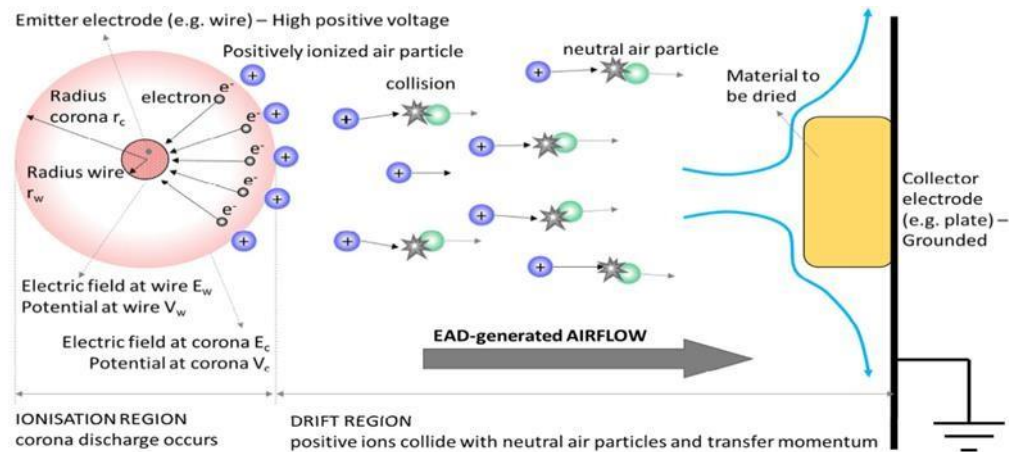
### **I.12. Séchage des aliments par EHD ( EHD drying)**

Des efforts importants ont été consentis pour la recherche et le développement de technologies alternatives de séchage des aliments et même d'autre produit utilisé pour d'autre technologies tel que l'industrie pharmaceutique, alors qu'aucune de ces technologies ne peut satisfaire aux exigences d'un produit comme la qualité nutritionnelle et la faible consommation d'énergie électrique.

L'EHD est une technologie non thermique, qui implique un effet hydrodynamique sur la surface des biomatériaux solides pour évaporer l'eau de surface. Un vent ioniques efficace peut être obtenu en appliquant une haute tension continue entre deux électrodes une active et l'autre de masse, la figure.4 illustre le principe du séchage par EHD.

Cette technologie (EHD) a montré des avantages pour le séchage de matières biologiques telles que la pomme de terre, la pomme, la tomate, les tranches de champignons, les épinards, le colza, le blé, etc.





**Figure I -17II lustration schématique du processus de génération de flux d'air EHD[20].**

### I.13. Conclusion

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les différents aspects de l'effet couronne ainsi que le mécanisme de création de la décharge couronne dans le cas d'une décharge positive et négative et leur application.

Dans le chapitre qui suit, nous découvrirons les différentes techniques utilisées pour l'amélioration de la germination des graines. Parmi ces techniques on trouve l'application de la décharge couronne pour l'accélération des graines et croissance des plantes.

# *Chapitre II*

*Application du champ électrique dans la  
germination des semences*

## Chapitre 2 : Application du champ électrique dans la germination des semences

### II.1. Introduction

En raison de la tendance commune à limiter l'utilisation excessive de produits chimiques en agriculture, il existe un intérêt croissant pour les méthodes d'amélioration de la qualité des semences qui seraient sans danger pour l'environnement. Dans ce chapitre, nous décrivons les méthodes basées sur l'effet de divers facteurs physiques, tels que la lumière laser, le champ magnétique, le traitement des semences avec de l'eau magnétisée, le champ électrique.

### II.2. Définition

La germination correspond à l'étape par laquelle une semence en vie ralentie "se réveille" et donne naissance à une plantule. Ce passage met en jeu des mécanismes physiologiques complexes qui sont assez bien identifiés aujourd'hui. Il est ainsi démontré que la germination comprend trois phases successives (Figure 2.1) : la phase d'imbibition, la phase de germination stricto sensu et la phase de croissance. On retrouve ces trois mêmes étapes pour l'activité respiratoire.

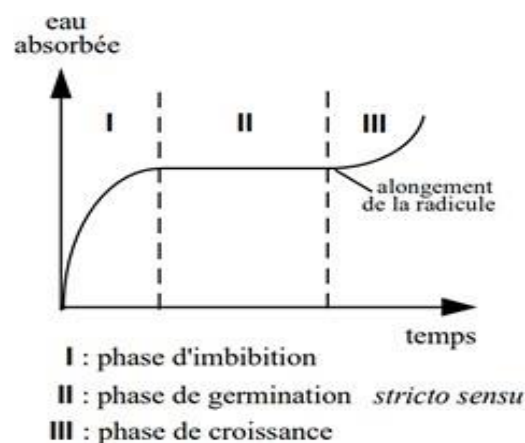


Figure II.1. Courbe théorique d'imbibition d'une semence

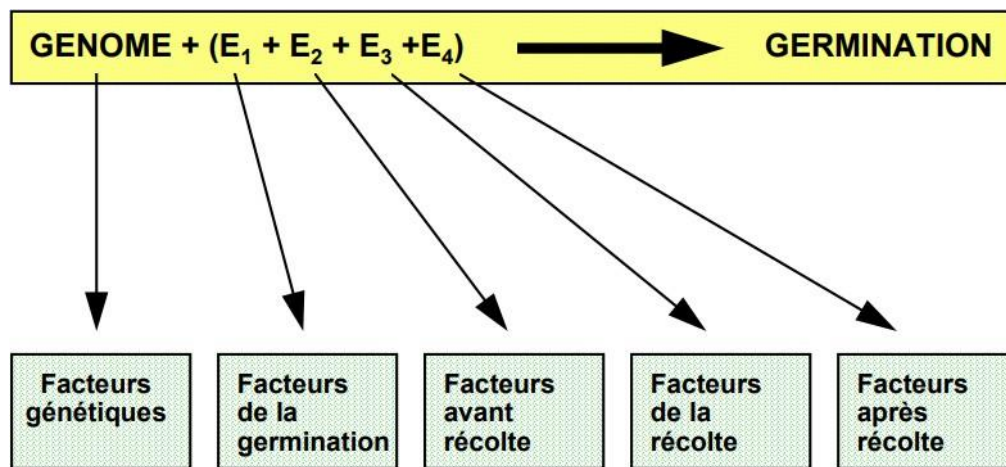
Jusqu'à la fin de la phase de germination stricto sensu, la semence peut être déshydratée sans

être tuée, mais lorsque la radicule a commencé sa croissance, la déshydratation est fatale. En outre, la germination stricto sensu et la croissance sont deux phénomènes qui ne sont pas sensibles de la même façon aux mêmes facteurs. C'est cette profonde transformation physiologique irréversible qui caractérise le mieux la germination pour de nombreux chercheurs [1].

Des différents mécanismes physiologiques qui entrent en jeu dans le processus de germination, c'est la phase de germination stricto sensu qui est la plus importante car elle conditionne la croissance ultérieure. Lors des tests de germination, il est néanmoins difficile de savoir à quel moment cette phase est terminée. C'est pourquoi la percée des enveloppes par la radicule ou l'allongement de celle-ci sont couramment utilisés pour déterminer que la semence a germé.

L'ensemble des facteurs qui interviennent au moment de la germination mais aussi tout au long de la vie d'une semence, depuis sa création sur la plante mère jusqu'à sa reprise d'activité, exerce une influence sur le comportement de cette semence lorsqu'elle est mise à germer [1].

Ainsi, la qualité germinative d'une semence est fonction de son génome mais aussi de multiples facteurs qu'on regroupe en quatre catégories : les facteurs avant la récolte, les facteurs de la récolte, les facteurs après la récolte et les facteurs de la germination (Figure 2.1) :



**FigureII.2: Facteurs influençant la germination**

L'espèce, la variété, la taille ou le poids des semences sont quelques-uns des facteurs génétiques qui peuvent avoir une influence sur la qualité germinative des semences. Les facteurs avant récolte correspondent, entre autres :

- Au climat (température, pluie et lumière) ;
- Aux techniques culturales ( fumure , produits phytosanitaires , raccourcis ses de paille);
- A la position des semences sur la plante mère ;
- À l'âge de la plante mère.

Concernant les facteurs de la récolte, c'est certainement le stade de maturité des semences au moment de leur récolte qui intervient principalement dans la germination ; la date de récolte est donc importante. S'agissant des facteurs après récolte, tous les traitements auxquels les semences sont soumises après leur récolte peuvent avoir une incidence sur leurs propriétés germinatives. Par exemple, le séchage, le nettoyage et le triage peuvent intervenir.

Pour de nombreuses espèces (céréales, tournesol), il est clairement établi que la durée et les conditions de conservation des semences jouent un grand rôle. L'âge des semences peut aussi modifier les conditions nécessaires à leur germination, notamment les conditions thermiques [1].

Les facteurs de la germination, c'est à dire ceux qui interviennent au moment de la germination, sont nombreux. Les plus couramment étudiés sont la température, l'oxygène et la lumière. En fait, c'est l'influence combinée de ces différents facteurs qui rend possible ou non la germination.

Ainsi, la présence d'eau est obligatoire, mais pas suffisante car il faut aussi que la température soit convenable et que l'embryon soit correctement oxygéné. Les inhibiteurs de germination, le substrat (profondeur du semis et granulométrie) et les conditions des tests au laboratoire (pH du milieu, densité de semences) sont aussi des facteurs qui peuvent influencer la qualité germinative des semences [1].

### **II.3. Traitements conventionnels de semences :**

#### **II.3.1. Traitement mécanique :**

On peut scarifier efficacement de petites quantités de semences en éraflant les graines une par une avec du papier de verre, en les entaillant avec un couteau, ou en frottant au papier de verre l'extrémité opposée à la radicule jusqu'à ce que le cotylédon soit visible. Toutefois, étant donné qu'il faut traiter les graines une par une, ces méthodes ne sont guère applicables en grand.

Pour de grandes quantités de semences, on peut obtenir une scarification en pilonnant les graines avec du sable, ou en les frottant sur une plaque abrasive. Ces deux techniques sont simples et peu coûteuses, et se sont avérées efficaces [2].

#### **II.3.2. Traitement par l'eau :**

La dormance des graines (par exemple de *Prosopis*) peut être rompue en les couvrant d'eau bouillante, et en les laissant ensuite tremper pendant 24 heures dans l'eau qui se refroidit. Cette technique, susceptible d'accroître l'imbibition et améliorer les taux de germination, n'est toutefois

pas valable pour toutes les espèces du genre *Prosopis*.

Un trempage des graines de *Prosopis* par exemple dans l'eau du robinet à température normale est généralement inefficace pour rompre la dormance [2].

### **II.3.3. Traitement par la chaleur sèche**

L'application de chaleur sèche entre 60°C et 80°C pendant 24 heures s'est avérée efficace pour accroître l'imbibition et la germination de graines de *Prosopis*. Par contre, une exposition à des températures de 90°C et plus pendant 3 heures ou plus peut les endommager sérieusement.

Dans une expérience de laboratoire effectuée en Inde, l'exposition de graines de *Prosopis juliflora* à une température constante de 35°C pendant 24 heures a accru les taux de germination, tandis qu'une exposition à des températures basses, de 3°C à 10°C par exemple, n'avait que peu d'effet [2].

### **II.3.4. Traitement chimique**

Des petits échantillons de graines de *Prosopis* ont été scarifiés avec succès par immersion dans l'alcool éthylique absolu pendant 12 heures.

Pour des lots de semences importants, un traitement à l'acide sulfurique concentré (98 pour cent) est souvent recommandé, si le temps de trempage dans l'acide a été déterminé au préalable ; le plus couramment, il varie entre 15 et 30 minutes. L'accroissement de la germination dû au traitement à l'acide sulfurique est généralement attribué à un ramollissement du tégument de la graine par oxydation, augmentant sa perméabilité à l'air et à l'eau. Les graines doivent être méticuleusement rincées à plusieurs reprises dans une grande quantité d'eau après le trempage dans l'acide [2].

## **II.4. Traitements alternatifs de semences :**

Selon les travaux réalisés sur les graines de *Prosopis*, l'exposition à un champ électromagnétique de fréquence variant entre 10 MHz (mégahertz) et 39 MHz accroît le taux de germination. Toutefois, d'autres études seront nécessaires pour démontrer la possibilité pratique d'un traitement des semences par hautes fréquences pour rompre la dormance (htt2).

### **II.4.1. Traitement par champ électrique :**

Les études sur l'effet du champ électrique sur les graines impliquaient l'utilisation de champs électriques constants, de champs électriques alternatifs, de champs électriques pulsés et de diverses formes de décharge, telles que la décharge corona ou le plasma froid.

Le traitement des semences avec ces facteurs a eu un effet positif sur la germination, la croissance des semis et le rendement des plantes issues des graines.

Des études ont démontré que de brèves expositions à des champs électriques radio fréquences à des fréquences d'environ 40 MHz et à des intensités de champ comprises entre 1 et 2 kV/cm augmentaient considérablement la germination du gombo, des pois et des haricots en réduisant le pourcentage de graines dures.

Le traitement électrique a accéléré la germination et l'émergence des graines d'épinards. Des chercheurs ont traité des graines de tomates avec un champ électrique alternatif dans la plage de 4 à 12 kV/cm, temps d'exposition de 15 à 60s et fréquence de 60 Hz.

La stimulation des graines avec un champ électrique dans cette plage a accéléré la germination de 1,1 à 2,8 fois en 5 jours d'incubation. Ces auteurs ont trouvé un effet négatif du champ avec une intensité supérieure à 12 kV/cm et un temps d'exposition supérieur à 60s, ce qui a inhibé la germination des graines de l'espèce.

L'application d'un champ électrique alternatif avec une fréquence de 50 Hz, une intensité de 8 kV/cm et pendant 30s a eu un effet sur la germination des graines de radis 'Mila', provoquant une amélioration des paramètres de germination des vieilles graines (7 ans).

Une augmentation de l'énergie et de la capacité de germination a été observée, un raccourcissement du temps nécessaire à la germination de 25% et 50% du nombre total de graines en germination, ainsi que du temps moyen de germination d'une seule graine.

La stimulation a également eu un effet positif sur l'augmentation de la masse sèche de semis. Dans une étude menée en 2002, les graines de tomate 'Halicz' avec une faible capacité de germination (46%) ont été stimulées avec des champs d'intensités 5 kV/cm et 10 kV/cm, fréquence de 50 Hz, pour un temps de 100s [3].

La capacité de germination des graines traitée sa augmenté à environ 80%. Des chercheurs ont étudié l'effet de la stimulation des graines de radis 'Carmen' et de radis Skall 'Agata' et 'Murzynka' avec un champ électrique alternatif avec une intensité de 5 et 10 kV/cm, fréquence de 50 Hz, pendant 4s et 60s, sur le rendement racinaire. Le traitement des graines a provoqué une augmentation du rendement en radis de 105% et une augmentation du rendement en racines de l'ordre de 20 à 105%.

La faible dose d'exposition du champ électrique a entraîné une augmentation du rendement du radis crémeux 'Murzynka', tandis que la forte dose (10 kV/cm et 60 s) a provoqué une diminution du rendement.

Des semis de cresson thalle (*Arabidopsis thaliana*) âgés de sept jours ont été soumis à l'effet de champ électrique pulsé (CEP) d'une durée de 10 ns, 25 ns et 100 ns pour des intensités de champ de 5 à 50 kV/cm.

Il a été constaté que la surface foliaire a doublé après 5 et 7 jours à partir de la stimulation pendant 10 ns et de faibles amplitudes d'intensité du champ de 5 kV/cm. Cependant, l'application d'impulsions plus longues (100 ns) et de fortes intensités de champ électrique ont causé la mort des semis.

Les chercheurs suggèrent que cela pourrait avoir été causé par la libération de calcium des réserves internes, qui a été observée lors de l'action du CEP sur les cellules des mammifères.

D'autres études sur l'effet du champ électrique pulsé (CEP) avec une intensité de 10, 20 et 30 kV/cm et 100 ns sur la germination des graines et sur la hauteur des semis de l'arbre saxaoul (*Haloxylon ammodendron*). Une augmentation du taux de germination des graines de 72,9% à 90,3% et 98%, respectivement, a été notée pour les intensités de champ de 10 et 20 kV/cm [3].

L'effet de la stimulation des graines avec un champ d'une intensité de 30 kV/cm a causé une diminution de la capacité de germination à 55,7%. Cela peut indiquer que de forts champs électriques peuvent avoir un effet défavorable sur la germination des graines.

Des chercheurs ont utilisé un champ électrique pulsé radiofréquence pour atténuer la dormance des graines de pomme. Les graines ont été exposées pendant 1 h, à une tension constante de 25 V, des taux de répétition des impulsions de 4 Hz avec une durée d'impulsion de 20 ms. Le CEP radiofréquence appliqué seul pendant la stratification ou avec des phytohormones et des composés sélectionnés a augmenté le pourcentage et la dynamique de la germination des graines du «Ligol» de pomme ainsi que la dynamique de la croissance des semis [4].

La décharge Corona trouve une application dans l'agriculture pour le tri des semences. La décharge corona a lieu lorsque le courant électrique traverse l'air à partir d'une électrode de décharge connectée à une haute tension. Les graines de carotte ont été soumises au traitement au moyen d'un séparateur électrique cylindrique avec une intensité de champ électrique  $E = 3 \times 10^5 \text{ V/m}$  pendant les décharges corona [4].

Le séparateur a séparé les graines mortes des graines viables, et en même temps les a stimulées pendant 2s au cours de leur séparation. La recherche a montré que la stimulation des graines de carotte avec un champ de décharge corona augmentait la germination de 7 à 19%. Des



Chercheurs ont stimulé les graines de carotte, de radis et de betterave rouge en utilisant le champ électrique de décharge corona. Sous l'effet du champ, la capacité de germination des graines de carotte a augmenté de 24%, celle des graines de radis et de betterave rouge de 12%. Dans le cas des graines à faible pouvoir germinatif, la stimulation a accéléré leur germination de 2 à 3 jours [4].

#### **II.4.2. Traitement par Laser :**

Le mot laser vient des premières lettres du nom anglais de l'appareil d'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. Le laser est un appareil produisant une lumière monochromatique cohérente avec un faisceau parallèle. Grâce à la faible largeur de la ligne d'émission et du faisceau parallèle, le rayonnement laser peut être fortement focaliser sur une très petite zone, ce qui entraîne une densité d'énergie superficielle élevée.

Les études menées à ce jour indiquent un effet stimulant favorable du traitement avant semis des graines avec la lumière laser sur la germination, la croissance et le développement des plantes, et sur la quantité et la qualité des rendements des plantes cultivées.

Les effets du rayonnement laser dépendent de nombreux paramètres différents, à savoir :

- La longueur d'onde,
- Le temps d'exposition,
- La puissance,
- La dose,
- La méthode d'irradiation (constante ou impulsionnelle).

Les caractéristiques des grains sont elles-mêmes sont également importantes, par exemple :

- Leur orientation lors de l'irradiation,
- Les caractères génétiques (espèce, variété),
- Les propriétés physiologiques (état de santé, qualité des semences).

Dans une grande majorité, des expériences de stimulation laser des graines sont menées avec l'utilisation d'un laser à hélium-néon (He-Ne), bien qu'il y ait eu des cas d'utilisation de semi-conducteurs, de rubis, d'azote, d'argon, de lasers à diode et de lasers à CO<sub>2</sub>.

La domination des expériences avec l'utilisation du laser He-Ne est liée à sa longueur d'onde caractéristique de 632,4 nm. Cette longueur d'onde correspond à la lumière rouge qui, à côté du rouge lointain, est responsable de l'activation du photochrome, important en physiologie végétale. Les changements dans le contenu des formes photochromes (Pr et Pfr) régulent les processus vitaux importants des plantes par exemple germination des graines [4].

Il est plus courant d'utiliser des lasers de faible puissance et des temps d'irradiation relativement longs, ou des lasers avec une puissance plus élevée et des temps d'irradiation courts, mesurés en millisecondes et parfois aussi en picosecondes (10-12 secondes).

Un laser peut être classé comme fonctionnant en mode continu ou pulsé, selon que la puissance de sortie est essentiellement continue dans le temps ou si sa sortie prend la forme d'impulsions de lumière à une ou une autre échelle de temps.

Outre la détermination de la dose ou du rayonnement, le nombre d'irradiations est également très important. Il est communément admis que les graines doivent être irradiées plusieurs fois, avec de petites doses de rayonnement, pour éliminer la possibilité de mutations.

Par conséquent, dans la plupart des études, 3 à 5 traitements d'irradiation sont appliqués, le temps d'irradiation étant de plusieurs secondes. Du point de vue agro physique, la stimulation laser utilise la capacité des graines à absorber et à stocker l'énergie lumineuse, à la transformer en énergie stockée dans des composés chimiques, et à l'utiliser ensuite dans la germination des graines, puis dans la croissance et le développement des plantes.

Bien que les mécanismes de la stimulation laser n'aient pas été entièrement compris, on constate que la stimulation laser des plantes entraîne une augmentation de leur potentiel bioénergétique, conduisant à une activation plus élevée au niveau du photochrome, de la phytohormone et des systèmes fermentaires, en tant que stimulation de leurs processus biochimiques et physiologiques [3].

Le rayonnement laser He-Ne provoque l'induction de photochrome. Par la suite, les activités des enzymes apparentées, qui ont été modulées par le photochrome pourraient être améliorées. Elle entraîne une augmentation de l'entropie et de l'énergie interne des graines lors de la germination. Enfin, le métabolisme biochimique et physiologique de la cellule s'accélère. L'augmentation des émissions de bio photon est liée à l'accélération de la division cellulaire et à la croissance des semis.

Le but de la plupart des expériences menées jusqu'à présent était de déterminer l'effet de la stimulation laser sur le processus de germination des graines. Les effets positifs de l'irradiation laser sur l'énergie et la capacité de germination, sur la dynamique de la germination des graines et sur les paramètres de qualité des plants ont été démontrés.

Dans une étude, une amélioration de l'énergie de germination des graines de concombre à la suite d'une irradiation de 2,4 et 6 fois avec un laser à hélium-néon, par rapport au témoin été

Obtenu. L'augmentation du nombre d'irradiations a provoqué une augmentation de l'énergie de germination. En fonction du nombre d'irradiations, l'énergie de germination a augmenté de 1,3 à 15,8%.

Dans une autre expérience, l'effet de l'irradiation à plusieurs reprises des graines de pois a augmenté l'énergie de germination de 20 à 23,6%. La stimulation laser n'a pas affecté de manière significative la capacité de germination des graines de concombre et de pois.

Des chercheurs ont démontré un effet favorable de la stimulation laser sur l'énergie de germination et la capacité de trois cultivars de concombre. Une amélioration de l'énergie de germination a été observée après l'application de l'irradiation à trois et cinq temps, tandis qu'une augmentation significative de la capacité de germination a été notée après l'application de toutes les doses de rayonnement laser (irradiation 1, 3 et 5 fois avec laser avec puissance de 200 mW/cm<sup>2</sup>).

Dans une étude, une augmentation de la capacité de germination des graines de scorzonera (10,5–13,2%) a été démontrée par rapport au témoin non irradié. La capacité de germination s'est améliorée avec l'augmentation du nombre d'irradiations de 1 à 5. La capacité de germination la plus élevée et le moins de semis anormaux ont été notés après une irradiation 5 fois des graines.

Une étude menée en 2008 a démontré que l'irradiation des graines de radis avec le laser He-Ne provoquait une amélioration du pourcentage de germination final (FGP) par rapport aux graines témoins, bien que cela dépende de la température de germination des graines.

Le critère de germination était la pénétration du tégument par le germe, la longueur du germe étant égale à celle de la graine. L'irradiation n'a amélioré le FGP que pendant la germination à une température de 20° C (optimal pour la germination des graines de radis).

Aucun effet positif de la stimulation des graines avec le laser sur l'augmentation du FGP n'a été noté dans les conditions de basse température (15° C) [4].

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les graines témoins et les graines traitées avec la lumière laser en termes de temps de germination moyen. Les chercheurs ont conclu que la lumière laser n'affectait pas le processus de germination déterminant les paramètres liés au temps écoulé [3].

L'irradiation des graines d'Acacia farnésienne L. avec la lumière laser He-Ne a provoqué une amélioration et une accélération de la germination des graines. Les graines de l'espèce restent dormantes en raison de l'imperméabilité du tégument à l'eau. Le traitement des semences avec la

lumière laser a provoqué une perforation du tégument à un ou à plusieurs endroits. Une augmentation du temps d'exposition (de 1 à 9 min) et de l'intensité (de 0,03 à 1,70 W/cm<sup>2</sup>) de l'irradiation de la lumière laser He-Ne a provoqué une augmentation du pourcentage de germination et de la vitesse de germination et a réduit le temps de germination.

De plus, une augmentation de l'irradiante et du temps d'exposition à l'irradiation par la lumière laser He-Ne a augmenté les niveaux de substances promotrices endogènes et diminué les niveaux de substances inhibitrices endogènes dans les téguments.

Le laser active la division cellulaire dans les tissus végétaux et affecte l'allongement des cellules. Les résultats des études menées par certains chercheurs indiquent un effet positif de l'irradiation avant semis sur la croissance des semis. À la suite de l'ensemencement avant irradiation des graines, un allongement de la partie aérienne des semis de féverole a été noté, et un allongement de l'hypocotyle des semis de concombre.

L'irradiation au laser des graines peut provoquer un allongement des radicules de concombre, de poivrons et de scorzonera.

Certaines études indiquent que l'amélioration et l'accélération de la germination résultant de l'irradiation laser des graines est précédée d'une activité accrue de certaines enzymes, à savoir - l'amylase et la protéase, qui pourrait soutenir l'hypothèse sur le mécanisme d'exposition au laser [3].

Le traitement des graines de pois avec le laser He-Ne a provoqué une augmentation de l'activité des enzymes amylolytiques au cours du processus de germination. L'effet le moins stimulant a été noté aux premiers stades de la germination, avant que les graines soient complètement gonflées. L'activité des enzymes amylolytiques dans les graines de pois s'est intensifiée avec le temps et a atteint son maximum 120 heures après le semis. Une stimulation de l'activité enzymatique de l'amylase et de la protéase après l'application d'un rayonnement laser a également été observée dans les graines de tournesol. Cependant, la plus grande activité enzymatique de l'amylase a été notée beaucoup plus tôt, dès 48 heures après le semis. Cette accélération résulte probablement du fait que dans cette expérience, les graines ont été trempées dans l'eau pendant 3 heures avant l'irradiation. La lumière laser peut-être utilisée pour améliorer l'état de santé des graines. Dans une expérience sur l'effet de la lumière laser He-Ne sur la survie des champignons dans les graines de colza, des chercheurs ont trouvé, pour certains cultivars et micro-organismes, une relation directement proportionnelle entre la durée de l'irradiation et la santé des semences [3].

Le nombre de colonies fongiques a été notablement réduit, notamment dans le cas du colza de

printemps. Ce phénomène a été observé à des temps d'irradiation plus courts, de 30 et 90 minutes. Dans une autre étude, une irradiation avec une intensité de  $6 \text{ mW/cm}^2$ , appliquée 3 et 5 fois, a détruit des champignons du genre *Penicillium* et a inhibé la présence de champignons du genre *Alternaria* (isolés des graines de semis de luzerne).

Certaines études sont démontrées que la stimulation avant semis des graines avec la lumière laser peut modifier l'émergence des semis. L'irradiation des graines de pois a provoqué une accélération de l'émergence de 2 jours. Dans des recherches, l'irradiation laser des semences de maïs a significativement augmenté le taux d'émergence des semis et l'émergence au champ. Les réponses positives les plus élevées ont été trouvées lorsque le temps de traitement était de 30 et 60 secondes et que les intensités étaient de  $3,2$  et  $20 \text{ mW/cm}^2$ , respectivement.

Une intensité de  $20 \text{ mW/cm}^2$  pendant 60 secondes a produit des augmentations significatives du taux d'émergence des semis (43%), du poids sec (63%) et de l'émergence (48%), par rapport au témoin.

Dans une étude, une augmentation du taux d'émergence (de 22 à 24%) était un effet de l'irradiation de vieilles graines de pois uniquement (avec une capacité de germination initiale de 62,0 et 76,3%). Aucune réponse de ce type n'a été notée dans le cas de semences ayant des paramètres de haute qualité (capacité de germination de 88,8 à 95,0%). De plus, l'étude a démontré que la stimulation au laser servant le semis provoquait une accélération de la levée obtenue à partir de graines de moins bonne qualité (anciennes) de 1,1 à 2,4 jours.

La recherche montre que l'irradiation laser a un effet positif sur les traits qui façonnent le rendement des plantes. Des chercheurs ont démontré que l'irradiation laser des graines peut entraîner une augmentation de la surface des feuilles de pois, qui est liée à la teneur en chlorophylle des feuilles et est un indicateur de l'activité photosynthétique [4].

Dans une autre étude, la stimulation laser des graines a provoqué une augmentation de la teneur en chlorophylle des feuilles de maïs. La stimulation laser des graines entraîne une augmentation du rendement des organes génératifs et végétatifs des plantes et une amélioration de sa qualité. Dans une expérience menée par les chercheurs, l'irradiation de graines de concombre de serre avec un faisceau divergent de laser He-Ne (méthode des doses d'énergie ajustables) a provoqué une augmentation du rendement en fruits de 16 à 31,5%, selon le cultivar [4].

Dans une étude publiée en 1994, l'augmentation du rendement des fruits de concombre de serre et de grande culture était respectivement de 5–60% et 10–25%.

À la suite de la stimulation au laser des graines, le rendement des tomates de serre et de plein champ a augmenté de 10 à 30% et de 10 à 20%, respectivement, par rapport au témoin.

Les plantes de ces espèces ont atteint leur maturité de récolte plus tôt. Le rendement précoce de la tomate de serre (jusqu'à 1/3 du temps de culture) a augmenté d'environ 27 à 60% par rapport au témoin. Attendu que le rendement précoce du concombre de serre a augmenté de 31%. De plus, les plants issus de graines irradiées étaient plus résistants au froid.

L'augmentation des rendements de concombres de plein champ dans les conditions de la Pologne est également confirmée par une étude menée en 2002 et dans les conditions de la Bulgarie (une étude menée en 1997).

L'exposition au laser à 4 et 6 temps n'a pas affecté le rendement de deux cultivars de tomates de plein champ. Des chercheurs ont noté une augmentation des rendements de l'oignon (15,5%), du haricot commun (27%) et des poivrons (13%), y compris le rendement précoce - de 19 à 24%.

Une étude publiée en 2001 a démontré que l'irradiation 2 à 6 fois des graines de haricot vert a provoqué une augmentation du rendement en graines des deux cultivars de l'espèce de 8,2 à 19,0%. C'était le résultat d'une augmentation du nombre de gousses par plante et du poids de 1000 graines.

Des études ont démontré que l'irradiation multiple des graines de pois a provoqué une augmentation des rendements de 5,6–21,6% et 6,2–6,4%, respectivement. Dans les deux expériences, l'augmentation du rendement a été causée par un plus grand nombre de gousses et de graines par plante. L'irradiation n'a eu aucun effet significatif sur le nombre de graines dans une gousse [3] [4].

Les chercheurs ont observé certaines différences de croissance et de développement entre les plantes issues de graines irradiées et témoins. Les plantes issues de graines stimulées étaient plus hautes et fleurissaient et mûrissaient 3–4 jours plus tôt que les plantes développées à partir de graines témoins.

Les différences entre les groupes de plantes comparés ont été notées tout au long de la période de croissance, mais elles étaient significatives en phase de floraison. La maturation plus précoce des plantes issues de graines stimulées s'est également traduite par une teneur eau plus faible dans les

Graines, par rapport aux graines du contrôle. Les plantes cultivées à partir de graines irradiées produisent des feuilles de plus grande surface que les plantes issues de graines témoins.

Les chercheurs ont démontré que l'irradiation de graines de fenouil et de coriandre à l'aide d'un laser He-Ne contribuait à une ramification plus forte des plantes et à une augmentation du nombre d'ombelles. Il y avait également une augmentation de la teneur en huile essentielle dans les fruits. Les meilleurs effets ont été obtenus à la suite d'une irradiation de 20 minutes, par rapport à une stimulation pendant une durée plus courte (5 et 10 minutes) et au contrôle non traité.

La stimulation des graines de scorsonère avec la lumière laser He-Ne peut entraîner une augmentation du rendement racinaire. Une étude a montré que l'augmentation du rendement n'était pas, cependant, un effet de l'augmentation de la masse des racines mais plutôt d'une augmentation du taux de levée à la suite de l'irradiation des semences avant le semis.

Au cours d'une année où aucune amélioration de l'émergence n'a été notée, aucune augmentation du rendement racinaire n'a été observée. Le traitement pré-semis des graines avec la lumière laser n'a eu aucun effet sur la masse racinaire. Un effet positif de l'exposition à la lumière laser sur la teneur en sucres des racines de betterave à sucre a été observé.

Des études ont mentionné une augmentation des principaux composants de l'huile essentielle contenue dans les fruits de fenouil et de coriandre à la suite de l'irradiation des graines.

Une majorité des publications disponibles prouvent des effets positifs de la lumière laser, mais on peut également trouver des études dans lesquelles aucun effet positif de la dose d'irradiation sur les valeurs des caractères étudiés des plantes n'a été constaté.

Des chercheurs ont démontré que la stimulation des graines de carotte avec la lumière laser He-Ne n'avait pas d'effet positif sur la capacité de germination des graines, malgré le fait que la portée de l'étude menée par ces auteurs était très large [3] [4].

Dans leur expérience, ils ont analysé l'effet d'une irradiation de 2, 4, 6, 8, 10 et 12 fois. Les taux d'émergence des semis à partir de graines irradiées et témoins ne différaient pas les uns des autres.

La stimulation des graines n'a également eu aucun effet sur la dynamique de germination des graines et l'émergence des plantules. Les rendements totaux et commerciaux de racines de carottes obtenues à partir de parcelles semées avec des graines témoins ne différaient pas du rendement des racines de parcelles semées avec des graines stimulées.

De l'avis des chercheurs, la carotte fait partie de ces espèces résistantes à l'effet positif de la lumière laser.

Les chercheurs ont démontré que dans le cas d'espèces telles que le concombre, les poivrons et la tomate, la variété était le principal facteur différenciant l'effet de l'irradiation avant semis avec un laser à semi-conducteur sur l'énergie et la capacité de germination des graines et sur la longueur de la radicule et la partie aérienne du semis.

Certains cultivars ont répondu positivement à la stimulation laser des graines, d'autres non. Des résultats similaires ont été obtenus en ce qui concerne les cultivars de pois, haricots, concombre et tomate après l'application de l'irradiation avec l'utilisation du laser He-Ne.

Tous les chercheurs qui ont étudié l'impact de la stimulation lasers ou lignent que le niveau des effets obtenus dépend d'un certain nombre de facteurs, tels que l'espèce, la variété, la méthode d'irradiation, la dose de rayonnement, mais aussi largement des conditions thermiques d'humidité dans lesquelles les plantes poussent et se développent.

On peut supposer que pour certaines espèces végétales, il existe une certaine plage de rayonnement au sein de laquelle toutes les doses ont un effet stimulant similaire sur les graines. Ce n'est qu'après le dépassement de cette plage de rayonnement qu'il se produit souvent un effet négatif de l'irradiation qui peut entraîner une détérioration de traits tels que l'inhibition de la germination et une réduction du taux d'émergence [3] [4].

#### **II.4.3. Traitement par champ magnétique**

La Terre a un champ magnétique variable. Selon la latitude, son intensité varie de 0 à 67  $\mu\text{T}$ . Il s'agit d'un élément naturel de l'environnement de tous les organismes vivant sur Terre [2].

Les plantes sont bien adaptées à la vie dans le champ magnétique naturel. Leur isolement de son effet provoque des symptômes défavorables, tels que l'inhibition de la croissance et la perturbation de leur tropisme.

Des études menées par divers chercheurs indiquent que le traitement des semences avec un champ magnétique de paramètres appropriés a eu un effet positif sur le processus de germination, l'émergence des semis, la croissance et les rendements des plantes cultivées.



L'impact biostimulant dépend généralement des facteurs suivants :

- Induction magnétique,
- Fréquence des champs alternatifs,
- Temps d'exposition des graines,
- Polarité (nord ou sud)

Des champs magnétiques statiques (c'est-à-dire stationnaires) et alternatifs ont été utilisés pour la stimulation des graines. L'induction des champs utilisés pour le traitement des semences variait de 3 mT à 480 mT. Le temps d'exposition était de 4 s à 24 h .

Comme indiqué par certaines études, l'efficacité de l'effet du champ magnétique sur les graines dépend également de l'espèce et du cultivar. Le traitement des graines par champ magnétique a eu un effet positif sur l'énergie de germination.

La stimulation des graines d'oignon avec un champ magnétique à basse fréquence 20 MT pendant 10, 20 et 30 minutes a provoqué une augmentation de ce paramètre. Plus la durée d'exposition est longue, plus l'énergie de germination des graines est élevée.

Selon le cultivar, l'augmentation de l'énergie de germination était de 5,0 à 22,5%. Une amélioration de ce paramètre a également été observée dans une étude sur la stimulation des graines de radis avec un champ magnétique alternatif d'induction de 30 et 60 MT.

L'augmentation de l'énergie de germination était de 0,5 à 19,2% selon l'induction magnétique et le lot de graines. Les effets les plus avantageux de la stimulation magnétique ont été observés pour les vieilles graines, c'est-à-dire âgées de 7 à 8 ans (avec une capacité de germination initiale de 66,5 à 75,5%). Leur énergie de germination a augmenté de 12,3–19,2%, selon le lot de graines et la valeur de l'induction magnétique appliquée. La stimulation du champ magnétique a également provoqué une amélioration de la capacité de germination des graines [4].

Des chercheurs ont noté une augmentation de la capacité de germination des graines d'oignon stimulées par le champ magnétique, de 2,5 à 13,7% par rapport au témoin.

L'allongement de la durée du traitement de 10 à 60 minutes a entraîné une augmentation de la capacité de germination de 5,0 à 5,2%, selon le cultivar.

Une amélioration a également été obtenue traitant de vieilles graines de radis (7–8 ans) avec un champ magnétique avec une induction de 30 et 60 mT. Les semences de haute qualité de l'espèce

(Avec une capacité de germination initiale de 88,3–92,5%) n'ont répondu avec aucune amélioration du paramètre.

Des chercheurs sont également signalé un effet positif du champ magnétique avec 10,8 mT sur les graines d'oignon à faible viabilité. Dans leur expérience, la viabilité initiale des graines d'oignon n'était que de 41%. Après le traitement par champ magnétique, la capacité de germination a augmenté jusqu'à 56%.

Le traitement des graines de tomates avec un champ magnétique statique avec une induction de 125 et 250 mT et des temps d'exposition de 1 min à 24 h a raccourci le temps requis pour la germination de 1 à 90% des graines. Le taux de germination des graines traitées était supérieur à celui des graines non traitées. Le temps moyen de germination a été significativement réduit par rapport au témoin.

Le champ magnétique statique avec 3 mT a augmenté le taux de germination des graines d'ocimum basilicum.

Les graines d'asperges traitées par un champ magnétique statique se sont imprégnées et ont germé plus rapidement. Le pourcentage de germination des graines était également plus élevé que sans l'influence d'un champ magnétique.

Le traitement des graines de souci avec un champ magnétique avec une induction de 50,75, 100 et 125 mT a affecté l'amélioration des paramètres de germination suivants : temps de germination moyen, temps nécessaire à 50% de germination, pourcentage de germination final.

Des chercheurs ont étudié la germination des graines de pomme, d'abricot et de pêche après un traitement par champ magnétique de 60 mT. Toutes les graines de pomme ont germé en 18 jours dans un champ magnétique par rapport à 25 jours sans lui. Chez l'abricot, les graines traitées ont terminé la germination en 10 jours contre 20 jours dans le cas de graines non traitées. Chez les deux espèces, le pourcentage de germination était plus élevé dans les graines traitées que dans les graines non traitées. Aucune des graines de pêche n'a germé sous la stimulation magnétique, bien que certaines graines non traitées l'aient fait. La stimulation des graines par champ magnétique a provoqué une amélioration et une accélération de l'émergence des plantes cultivées [4].

Le traitement au champ magnétique des graines de souci avec 25, 50, 75, 100 et 125 mT pendant 3 min a amélioré l'émergence et réduit le temps d'émergence moyen et le temps pour atteindre 50% d'émergence par rapport au témoin.

L'irradiation par champ magnétique des graines de pois à 30 et 85 mT pendant 15 s a amélioré l'émergence des semis. Dans les conditions de déficit hydrique du sol, de meilleurs effets du traitement sur l'émergence ont été obtenus que dans les conditions d'humidité optimale du sol.

L'émergence de plants de haricots larges à partir de graines traitées avec un champ magnétique alternatif de 30 et 85 mT a été notée environ 2 jours plus tôt par rapport au témoin. Alors que l'émergence de pois à partir de graines traitées avec le même facteur s'était antérieure de 2 à 3 jours.

De plus, certains chercheurs sont indiqués que l'amélioration de la germination des graines et de l'émergence des semis s'accompagnait de l'allongement des racicules et de la tige primaire ainsi que de l'augmentation du poids frais ou sec des semis.

Les semis d'oignons cultivés à partir de graines traitées au champ magnétique avec une induction de 20 mT et des temps d'exposition de 10, 20 et 30 min étaient plus longs que ceux issus de graines témoins. Les plants les plus longs ont été développés à partir de graines stimulées pendant la plus longue période.

La stimulation des graines de radis avec un champ magnétique avec une induction de 30 et 60 mT a provoqué un allongement de l'hypocotyle et de la racicule des semis.

Le traitement de vieilles graines d'oignon avec un champ magnétique avec une induction de 10,8 mT a provoqué un allongement de la pousse de 18,5 à 51,9% et de la racicule de 33,3 à 88,9%. À la suite de la stimulation des graines, une augmentation a également été notée dans le poids frais et le poids sec des plants.

Le traitement avec un champ magnétique statique de 250 mT produit une augmentation dans les premiers stades de croissance des plants de tomates. Les traitements par champ magnétique avec 60, 120, 180 mT pendant 5, 10 et 15 min ont eu un effet positif sur la longueur des racines et des pousses et la masse sèche et fraîche des semis de pois.

Le traitement au champ magnétique avec 25, 50, 75, 125 mT pendant 3 min a considérablement amélioré la longueur des racines et des pousses des semis de souci [20].

Le champ magnétique statique a augmenté la longueur des racicules et des tiges de plants de basilic et d'asperges. La stimulation des graines par champ magnétique a entraîné une amélioration des rendements des plantes cultivées. Le traitement des graines d'haricot large avec un champ magnétique avant le semis a eu une influence significative sur le rendement en graines. Les plantes

issues de graines traitées ont produit plus de graines que celles obtenues à partir de graines non traitées. Aucune influence n'a été observée concernant ce traitement sur le nombre de graines par gousse ou le poids de 1000 graines.

Une accélération de quelques jours de la maturité de la fève a été enregistrée. La plante mûrit plus rapidement lorsque les graines ont été traitées avec un champ magnétique.

Des chercheurs ont prouvé que les tomates mûrissaient plus tôt sous l'effet d'un champ magnétique. Le traitement avant semis des graines de pois avec champ magnétique a produit une augmentation significative du rendement en graines. Une augmentation du rendement en graines due à la stimulation avant le semis résulte d'un plus grand complément de gousses et de pertes de plantes moindres d'une unité de surface pendant la végétation.

Le traitement utilisé sur les graines d'oignon n'a eu aucun effet sur le poids frais des plants de 3 mois issus de ces graines lorsqu'ils ont été exposés pendant 10 et 30 minutes, mais lorsqu'ils ont été traités pendant 60 minutes, le poids frais de la plante, racine la longueur et le diamètre maximal du bulbe ont augmenté.

Le rendement du radis cultivé à partir de graines traitées par un champ magnétique avec une induction de 30, 60, 100 mT et des temps d'exposition de 4 et 60 s a augmenté de 20 à 105% par rapport au témoin non traité. L'expérience de terrain réalisée ont indiqué que la stimulation du champ magnétique avant le semis avec 100 mT pendant 10 min et 170 mT pendant 3 min améliorait la croissance et le rendement de la tomate.

Au stade végétatif, le traitement a entraîné une augmentation significative de la surface foliaire et du poids sec des feuilles. Les taux de croissance relative des feuilles, des tiges et des racines des plantes dérivées de graines traitées magnétiquement étaient supérieurs à ceux indiqués par les plantes témoins. Au stade de maturité des fruits, le traitement magnétique a augmenté de manière significative le poids moyen des fruits, le rendement en fruits par plante, le rendement en fruits par zone.

De plus, un retard significatif dans l'apparition des premiers symptômes du géminivirus et de la brûlure précoce et un taux d'infection réduit de la brûlure précoce ont été observés dans les plantes à partir de graines exposées aux champs magnétiques.

Le mécanisme de l'effet stimulant du champ magnétique sur la germination des graines n'est pas encore bien connu, mais plusieurs théories ont été proposées. Certains d'entre eux attribuent cet effet à des changements biochimiques ou à des activités enzymatiques modifiées [4].

Des résultats obtenus indiquent que l'impact du champ magnétique à basse fréquence au stade de la libération de l'enzyme appelée estérase au cours du gonflement des graines de blé accélère considérablement la libération des enzymes de l'état lié ainsi que la libération des graines du dormant étape. Plus tard, les effets de champ diminuent sensiblement.

Des chercheurs ont suggéré l'hypothèse que le champ magnétique interagit avec les courants ioniques dans la membrane cellulaire embryonnaire. Le champ magnétique provoque des changements dans la concentration ionique et dans la pression osmotique, qui régule l'entrée de l'eau aux graines. Les graines traitées magnétiquement absorbent plus d'eau et l'absorbent plus rapidement que les graines non traitées. Ce résultat pourrait être une explication de l'effet du champ magnétique sur le taux de germination et la vitesse de germination des graines et, par conséquent, sur l'amélioration de la croissance des plantes et du rendement des cultures [4].

#### **II.4.4. Traitement par eau magnétisée :**

Une autre façon d'appliquer un champ magnétique est l'utilisation d'eau traitée magnétiquement (eau magnétisée). L'irrigation avec de l'eau magnétisée peut améliorer la croissance et le développement des plantes. Il peut améliorer la germination des graines, le développement végétatif précoce des semis et peut également modifier la teneur en minéraux des graines et des fruits.

L'eau magnétisée (MW) est généralement obtenue en faisant passer de l'eau entre les sabots polaires d'un aimant permanent ou d'un électroaimant. Les effets du traitement de l'eau magnétisée dépendent de :

- L'induction magnétique,
- La période d'exposition du conditionnement de l'eau,
- La qualité de l'eau,
- Le volume de l'eau,
- La vitesse d'écoulement de l'eau
- La température de l'eau.

Un champ magnétique appliqué à l'extérieur provoque des changements dans la structure atomique, moléculaire et électronique de l'eau traitée. L'eau magnétisée provoque une augmentation

de la perméabilité des membranes cellulaires aux ions calcium et une inhibition de la croissance des micro-organismes pathogènes [4].

Le traitement à l'eau magnétisée entraîne également une augmentation de la conductivité électrique et une diminution de la tension superficielle [4].

Dans une étude menée et publiée en 1999 par des chercheurs, une eau faiblement conditionnée avec un champ électromagnétique pulsé de 100 kHz pendant 5 à 30 s a stimulé la croissance des cultures de levure. Selon ces auteurs, l'eau conditionnée interagit avec le calcium structurel de la membrane cellulaire pour la rendre plus perméable. Un traitement faible donne une légère augmentation de la perméabilité et permet l'entrée de petites quantités de calcium externe, ce qui active la cascade de signalisation du calcium et favorise la croissance. L'eau fortement conditionnée (traitée pendant 2 min) provoque des dommages membranaires plus graves, ce qui perturbe le métabolisme et inhibe la croissance.

Dans une autre étude publiée en 2007, l'eau magnétisée à la suite d'un passage de 1, 3 et 10 fois à travers un champ magnétique avec une induction de 75 mT, 300 mT et 900 mT a été utilisée pour la stimulation des graines de tomate et de concombre. Les graines de tomates traitées avec toutes les combinaisons de MW ont révélé une augmentation du taux de germination d'environ 5%.

Dans le cas des graines de concombre, une augmentation de la capacité de germination de 13% et 15%, respectivement, a été notée pour un passage et une induction de 1 à 10 fois et de 300 mT.

Des chercheurs ont utilisé de l'eau traitée magnétiquement à 211mT pendant 30,45 et 60min pour l'irrigation des graines de navet. L'eau magnétique a provoqué une augmentation du pourcentage de germination et du taux d'émergence jusqu'à 28,3% et 11,5%, respectivement. Les paramètres de croissance, tels que la longueur des semis, les poids frais et secs, la teneur en chlorophylle, ont également été améliorés. Les semis irrigués avec de l'eau traitée magnétiquement présentaient une teneur en protéines, une alpha-amylase et une protéase plus élevée.

Des chercheurs ont appliqué de l'eau magnétisée obtenue à la suite d'un passage unique à travers un magnétiseur avec une pression de travail de 0,6 MPa, à un débit d'eau moyen de 2,25 m<sup>3</sup>/h, induction de 0,30 T, pour la stimulation de graines de diverses espèces végétales.

Le MW a provoqué une augmentation de la capacité de germination du lupin jaune de 4%, de la moutarde blanche de 11%, de la salade de maïs de 10%, des semis de coriandre de 5%, par rapport aux semences témoins [4].

Dans une autre expérience, l'eau magnétisée a eu un effet positif sur la germination et le taux de croissance des semis de semis de coriandre et de concombre de plein champ.

Une étude a démontré un effet positif du MW sur la germination et la croissance initiale des plants d'herbes sarriette d'été, semis de coriandre, de marjolaine et de camomille commune.

De l'eau magnétisée a été appliquée avec succès pour la stimulation du processus de germination des graines de Pinus tropicalise M. Les résultats ont montré une augmentation du pourcentage de germination jusqu'à 70– 81% par rapport aux échantillons témoins (43%), ainsi qu'une plus grande croissance des semis après la germination.

Une étude menée en Égypte indique que la stimulation magnétique des graines et de l'eau utilisée pour leur irrigation peut être utilisée pour limiter les effets secondaires du déficit hydrique pendant la croissance des plantes.

Les plants de tomates issus de graines traitées au champ magnétique et arrosés avec de l'eau magnétisée ont mieux résisté dans des conditions de déficit hydrique (40 et 60% de la capacité) que les plants issus de graines non traitées. Le meilleur état des plantes a été mis en évidence par des paramètres tels que la hauteur, la longueur des racines, la surface et le nombre de feuilles, la masse fraîche et sèche, la teneur en pigments photosynthétiques.

Certaines recherches ont montré que le traitement magnétique de l'eau d'irrigation peut être plus efficace que le traitement magnétique des semences pour l'émergence et la croissance des semis. Une enquête publiée en 2011 a indiqué que le traitement magnétique de l'eau d'irrigation provoquait une augmentation de l'émergence des semis de pois, du poids sec des pousses et du contenu de N, K, Ca, Mg, S, Na, Zn, Fe et Mn comparé non seulement au contrôle mais aussi au traitement magnétique des graines. Les résultats des études citées suggèrent que l'eau traitée magnétiquement a le potentiel d'améliorer la croissance précoce des semis et aussi le contenu nutritif des semis [4].

#### **II.4.5. Traitement par champ électromagnétique :**

Pour étudier l'effet du traitement des semences par champ magnétique, champ électrique et combinaison des deux champs sur les graines de brinjal.

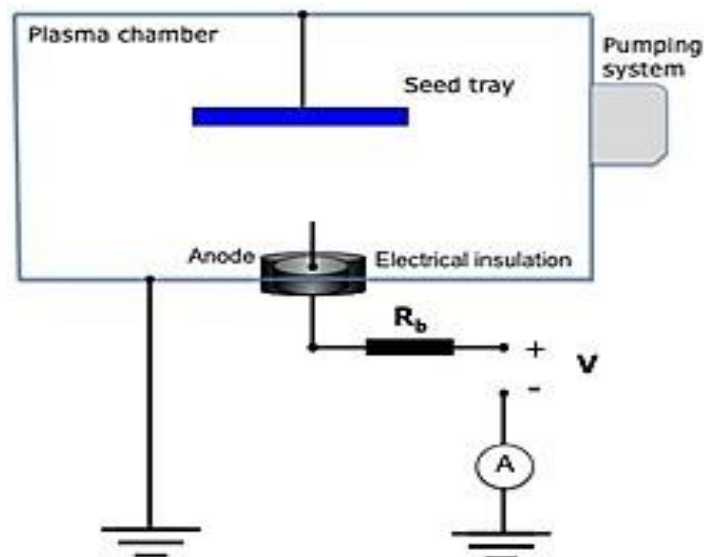
Le traitement par champ magnétique a utilisé deux cylindriques coaxiaux avec des graines au centre connecté à un générateur de champ électromagnétique, son intensité variait de 200, 400, 600 et 800 Gauss pendant 30 minutes. D'autre part, le traitement par champ électrique a utilisé 24 V connecté avec deux électrodes immergées avec des graines dans une solution d'électrolyte avec une intensité de 100, 200, 300, 400 pendant 1 minute [5].

Le traitement combiné n'a utilisé que 100 mA d'intensité du champ électrique avec les quatre intensités de champ magnétique. Les semences soumises à un traitement électromagnétique des semences ont amélioré toutes les caractéristiques des semis, le traitement 800 Gauss pendant 30 minutes a donné les meilleurs résultats globaux (98% de germination) suivi de la même intensité combinée (800 Gauss + 100mA) [5].

#### **II.4.6. Traitement par plasma :**

Dans cette étude, du plasma à décharge lumineuse a été appliqué sur les graines d'orge et de maïs afin de réduire le nombre de champignons transmis par les graines. La configuration du plasma utilisée pour traiter les échantillons de semences est illustrée dans la figure 2.3.

Un plateau à tamis a été monté à 32 cm au-dessus de l'anode au potentiel du sol. Chaque échantillon composé de 500 graines a ensuite été placé en une seule couche dans le bac, les échantillons sont été soumis à des décharges lumineuses à 100W pour les graines d'orge et 200W pour les graines de maïs pendant 2, 5, 10, 15 et 20 minutes.



**FigureII.3 : Système de traitement par plasma**

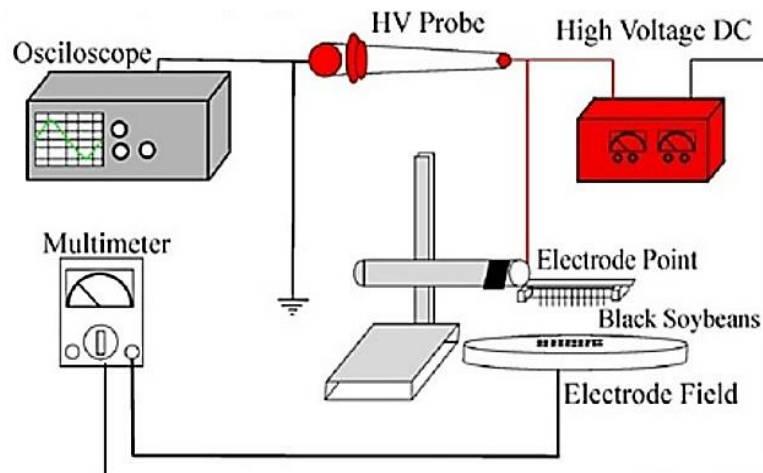


Au bout de 7 jours après le traitement, les graines ont ensuite été examinées au stéréo microscope pour la croissance fongique et les taux de germination ont été déterminés au bout de 8 jours. Il a été constaté que les charges fongiques des graines des deux espèces végétales diminuaient avec l'augmentation des temps d'exposition au plasma. Tandis que le taux de germination de l'orge semblait diminuer avec l'augmentation du temps de traitement atteignant 8% en comparaison avec le contrôle avec un minimum de 87 %, et les semences de maïs semblaient fluctuer avec un taux minimum de 90% [6].

#### II.4.7. Traitement par décharge couronne :

En utilisant une configuration matricielle de 8x8 points ; 3 cm de long et espacés de 3 cm, ainsi bombarder les graines de *soja* avec un espace d'air entre les électrodes de 2 cm, alimenté par un 6 kV DC, bombardant les graines à intervalles de ( $t = 6n / \text{avec } n < 6$ ) (Figure 2.4).

Il a été constaté que plus le temps de traitement des graines était long, meilleur était le résultat ; longueur de la tige, nombre de feuilles, temps de croissance, alors que le traitement de 18 minutes a montré le plus grand nombre de graines germées [7].



**FigureII.4 : Système de traitement par Corona**

Une étude a été réalisée avec des graines de *carotte*, de *radis*, de *betterave* et d'*orge*, en utilisant un champ électrique à décharge corona de courant continu de 5 kV/cm pour la durée du traitement des semences sur le terrain était le même pour tous les types de semences :  $t = 2s$ .

Il a été établi que la fonction de densité de germination des graines affectées par le champ de décharge corona est décrite par la distribution log normale pour toutes les graines traitées et celle des graines non affectées par la distribution normale.

Ce fait montre que les graines affectées par le champ de décharge corona germent plus rapidement que ceux non affectés, et leur dynamique de germination est plus grande. En raison de l'influence du champ stimulant, la viabilité des graines de carotte a augmenté de 24%, celle du radis et de la betterave de 12 %, des graines d'orge 9% et il accélère la germination des graines de 2-3 jours et augmente la germination compatibilité [8].

#### **II.4.8. Traitement à basse tension :**

Pour étudier l'effet de la basse tension continue du *Raphanus sativus* (une espèce de *radis*), douze pots sont été regroupés en quatre ensembles, chacun contenant trois pots. Dans chaque pot, 20 graines ont été semées. Gardant tous les paramètres constants (eau, exposition au soleil) sauf les tensions 3V, 6V et 9V.

L'électricité a été fournie pendant 10 min par jour à trois groupes uniquement à l'aide de deux électrodes immergées verticalement, une à l'intérieur de chacun des pots extrêmes, laissant un groupe comme contrôle. Le nombre de semis qui ont émergé du sol ont été comptés quotidiennement. Après 45 jours, les semis ont été retirés pour des mesures telles que la longueur et le diamètre des racines et sa masse.

Le traitement au 9V s'est révélé être le traitement le plus efficace dans l'ensemble des paramètres (vitesse d'émergence, graines germées, taux de germination, longueur des racines, diamètre des racines et poids frais) suivi par le traitement au 6V, d'ailleurs le 3V traitement et le groupe de control étaient similaires [8].

Pour le traitement de niébé l'expérience a été réalisée pendant trois semaines, testant l'effet du champ électrique basse tension (12V) sur trois cultivars de niébé, 200 graines uniformes ont été choisies pour chaque cultivar à tremper dans 1/4 litre d'eau du robinet pendant 90 minutes avant traitement.

Les graines ont été exposées à 0 contrôle, 10, 20 et 40 minutes entre deux plaques horizontales en aluminium. La température et l'humidité ont été mesurées et notées tous les jours, généralement toutes les caractéristiques des plantes ont été prises en compte dans la mesure finale (longueur des pousses, longueur des racines, longueur des tiges, nombre de feuilles, poids frais et poids sec ... etc.).

Le traitement qui a donné les meilleurs résultats globaux sur les trois cultivars en termes de pourcentage de germination et de vitesse de croissance a été l'exposition au traitement de 20

Minutes (la différence des caractéristiques des plantes a été distribuée de manière aléatoire), avec des résultats négatifs dans une durée plus élevée de 40 minutes [9].

Pour le traitement des graines de blé, un procédé électrochimique présageant d'une efficacité élevée et d'une faible consommation d'énergie par rapport aux méthodes connues.

La conception de l'expérience consiste à immerger les graines de blé dans un bécher contenant une solution d'électrolyte, avec deux électrodes connectées à une source de courant continu comprise entre 2 V et 10 à des intervalles de temps différents (1, 2 et 4 heures) et le bécher est contenu dans un bain-marie. Parallèlement aux graines traitées, deux groupes de contrôle ont été choisis, l'un imbibé d'eau distillée et l'autre dans la solution d'électrolyte [10].

Les résultats comparatifs des caractéristiques des semis ont montré une différence mineure entre le groupe témoin et le groupe traité (en utilisant 8V et 10V) pendant 1 heure, et la différence a augmenté au traitement de 2 heures, mais sans amélioration significative entre le groupe traité (1 heure, 2 heures et 4 heures par rapport à l'autre) [10].

## **II.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de traitement des graines et de mieux comprendre la différence entre les méthodes classiques (conventionnelle) et alternatives. Nous avons observé que le traitement des semences avec les facteurs physiques peut être un moyen très efficace d'améliorer la qualité des semences et à des effets bénéfiques sur l'accélération de la germination, l'émergence et la croissance des semis.

# *Chapitre III*

*Résultats et interprétation*

---

## *Chapitre 3 : Résultats et interprétation*

---

### **III.1. Introduction :**

Il a été observé dans la littérature que le traitement des graines par les champs électromagnétiques (électriques et magnétiques) provoque des changements physiologiques et biochimiques considérable. L'absorption de l'eau par la graine devient plus rapide et aussi la respiration et la photosynthèse qui s'intensifient des graines en cours de germination.

Dans la majorité des recherches établies pour le traitement des graines par la décharge couronne en utilisant des alimentations à haute tension et même à haute fréquence pour certaines applications tel que l'électrolocation et l'extraction, ces générateurs peuvent êtres à courant alternatif (AC) ou continu (DC), avec des intensités de tension variables avec des faibles pour le traitement par la décharge couronne ou forts courants comme dans le cas du champ pulsé.

L'objectif de cette contribution est de vérifier et valider l'influence de l'impact de la décharge couronne sur la dynamique de germination des graines utilisées pour ces expériences. La première étape de ce travail consiste à l'organisation du banc expérimental qui se compose d'une alimentation haute tension, chambre de traitement, échantillons à traité (semences : sorgho), instruments de mesures (tension, courant, surveillance température et humidité, appareil photo). Cette étape sera suivie par des expériences achevées par une analyse statistique, d'autres détails importants seront invoqués lors de l'exposition du plan de travail et la méthodologie.

### **III .2. Plan de travail :**

L'organisation des expériences et la préparation du matériel tels que ; les éléments de mesure, l'alimentation haute tension DC constitue une étape primordiale pour la réussite de cette contribution, pour assurer le bon déroulement de cette démarche nous avons suivis les étapes suivantes :

- Réalisation d'une alimentation haute tension DC pour les applications agro- alimentaire (40kV) basée sur les multiplicateurs de tension ;
- Réalisation d'une chambre de traitement des graines muni d'une électrode active démontable pour faciliter l'étude des paramètres géométriques (distance inter-électrodes, type de configuration).

- Préparation et choix des graines de céréales à traiter par exemple ; blé, seigle, sarrasin.
- Préparation des semis et des plaques de semis.
- Elaboration des expériences.
- Etude statistique et validation du modèle théorique.
- Interprétation des résultats.

### III.3. Méthodologie et organisation des expériences

#### III.3.1. Réalisation d'une alimentation haute tension DC :

L'alimentation haute tension à courant continu avec une tension variable est l'élément primordiale pour effectuer les différents tests au laboratoire. La première démarche a réalisé est de concevoir et tester cette alimentation basée sur le doubleur de Schenkel présenté dans la figure 3.1 et 3.2. Les composants nécessaires pour réaliser ce générateur sont comme suit :

- Condensateur céramique  $U_{\max}=30$  KV avec  $C=1000$  PF ;
- Diode haute tension  $U_{\max}=30$  KV ;
- Transformateur haute tension ;

Le principe de fonctionnement du doubleur de Schenkel (Figure 3.1 et 3.2) est :

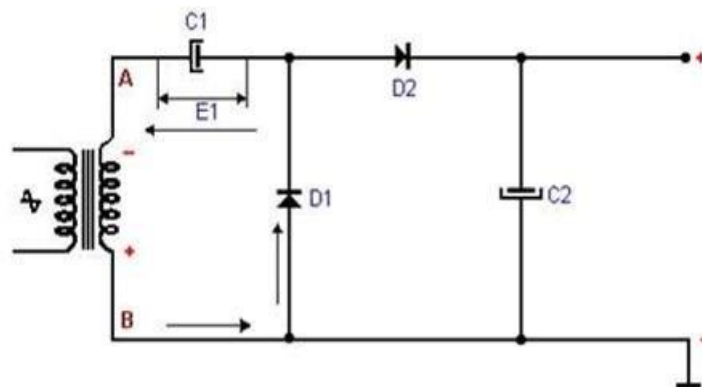


Figure.III.1. Schéma d'un doubleur de schenkel (polarité négative)

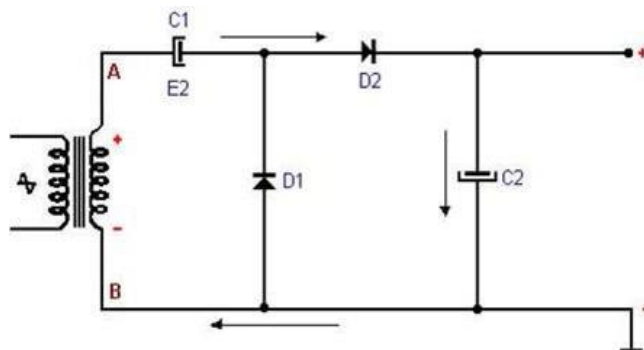


Figure.III.2. Schéma d'un doubleur de schenkel (polarité positive)

Précisons tout d'abord que l'extrémité inférieure du secondaire étant à la masse, nous aurons toujours pour le point B, le niveau de référence zéro (potentiel nul). Cependant, en alternatif, le point B (niveau zéro) sera bien positif par rapport au point A, lorsque celui-ci sera négatif.

En effet, si la tension alternative au secondaire est de 8000 Volts, le point A passera par rapport au point B de - 8000 Volts à + 8000 Volts, selon l'alternance considérée. Ainsi, quand nous aurons au point A = - 8000 Volts, nous pourrions dire que le point B est positif par rapport au point A.

Voyons maintenant le comportement des éléments, en fonction de chaque alternance. Lors de l'alternance négative le point A est négatif, donc D2 est bloqué. Par contre, le point B est positif par rapport à A, ce qui revient à dire que l'anode de D1 est positive par rapport à sa cathode. Donc, D1 conduit et charge C1.

Lors de l'alternance positive, le point A est positif par rapport à B. Donc D2 conduit, alors que D1 est bloqué. La tension appliquée à D2 résulte de la mise en série de la tension du secteur pendant l'alternance positive et de la tension précédente, à laquelle s'est chargé C1. Ainsi, D2 redresse la tension E2 qui est égale à :

$$E_2 = 2E_1 \quad (3-1)$$

Le condensateur C2 se charge donc à cette valeur :

$$U_{C2} = 2,82 \times U_{\text{eff}} \quad (3-2)$$

Comme précédemment, les condensateurs sont soumis à des tensions de polarités invariables ; cependant, C2 supporte la valeur de la HT doublée ( $2,82 \times U_{\text{eff}}$ ), alors que C1 ne supporte qu'une tension égale à la valeur de crête du secteur ( $1,41 \times U_{\text{eff}}$ ). La tension inverse de pointe appliquée à D1 et à D2 est égale à ( $2,82 \times U_{\text{eff}}$ ).

La multiplication de la tension dépendant pourtant de C1, la valeur capacitive de ce composant augmente avec le courant. C2 joue aussi le rôle de condensateur d'entrée de filtre. Théoriquement on a la tension à la sortie du quadrupler :

$$U_S = 1,41 \times U_{\text{eff}} \times K \quad (3-3)$$

Où **K** est le nombre d'étage soude doubleur.

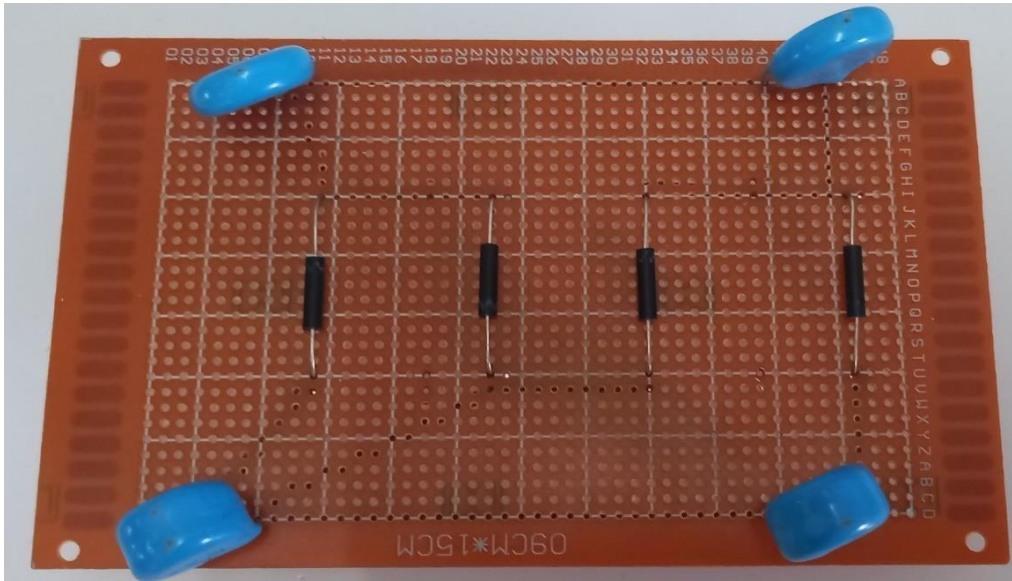
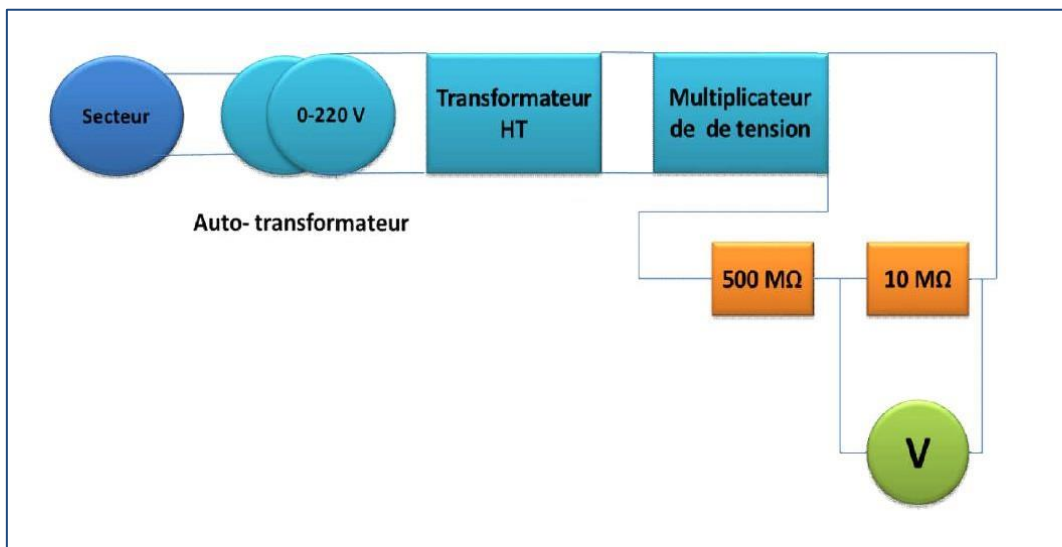


Figure.III.3. Photographie du circuit réalisé.

Dans ce montage (figure.3.4) la partie haute tension est composé d'un autotransformateur qui sert à varier la tension et d'un transformateur haute tension qui génère 8kV comme tension du secondaire et 11 kV comme tension crête et un courant de 20 mA. (Ce dernier alimente un circuit multiplicateur de tension (quadri pleur) qui a le même principe que le doubleur de schenkel en série (figure.3.1 et 3.2).



FigureIII.4. Schéma descriptif du montage de mesure de la haute tension.

Pour mesurer la tension de sortie du générateur pratiquement on a utilisé un diviseur de tension composé de deux résistances de puissance (de haute tension-Figure3.5)  $R_1=500M\Omega$  et  $R_2=10M\Omega$  en série ainsi que la résistance du multimètre  $R_V=10M\Omega$  donc le rapport geste égale à :



$$g = \frac{R_{eq}}{R_2 + R_{eq}} \quad \text{Et} \quad R_{eq} = \frac{R_v \cdot R_1}{R_v + R_1} = 5M\Omega$$

Donc :



$$g=0.0099$$

Et

$$1/g=101$$

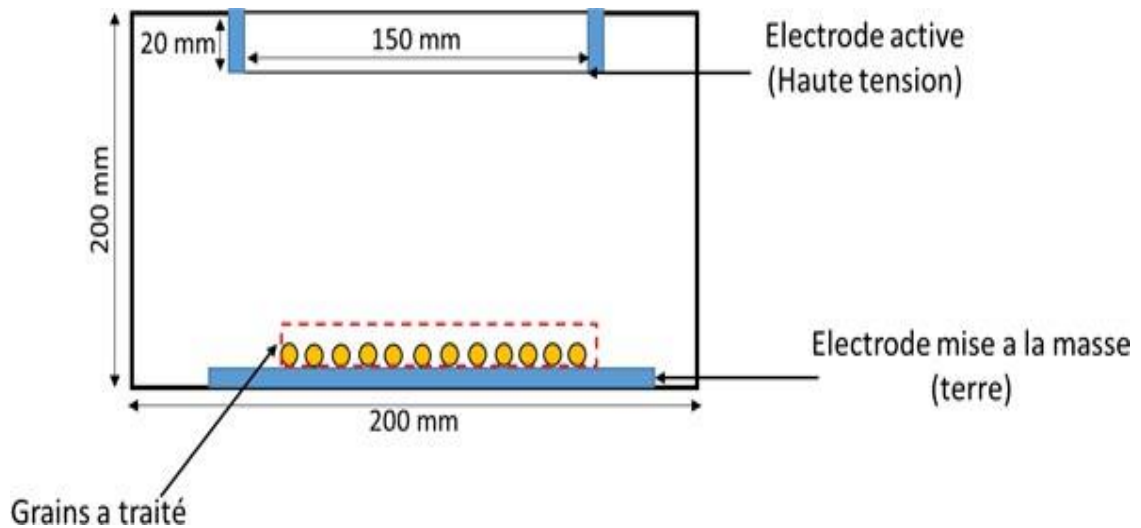
**Figure.III.5. Photographie du diviseur utilisé.**

### **III.3.2. Réalisation de la chambre de traitement :**

La réalisation du prototype de traitement par décharge couronne sera exécutée suivant un cahier de charge bien déterminé parmi les éléments à prendre en considération lors de la conception :

- La haute tension, il est très important d'adapter la chambre à la tension très élevée afin d'éviter les claquages en utilisant des matériaux isolant comme indiqué dans la figure.3.6.
- Une électrode active démontable afin de faciliter l'étude de l'effet des configurations géométriques (fil-plaque, pointe-plaque, multi-pointes /plaque) sur les caractéristiques courant-tension et l'accélération de la germination.
- Distance inter-électrodes ou gaps variables comme montré dans la vue de l'ensemble de ce prototype.
- Circulation de l'air a fin de régénérer l'air ambiant au sein de la chambre.
- Visibilité des parois (face avant) afin de prendre des séquences photo de la morphologie de la décharge couronne lors des expériences.

Un schéma simplifié de la chambre dans la configuration fil-plaque est illustré dans la figure 3.6:



**Figure.III.6. Schéma simplifié de la chambre à réaliser ;**

La figure.3.7 illustre la chambre de traitement des semences de sorgho.



**Figure. III.7.Photo de la chambre de traitement en mod opérationnel.**

### **III .3.3. Préparation et choix des échantillons de semences à traiter :**

Tant la pureté physique que la germination exercent un impact important sur le rendement et déterminent la valeur culturale des semences. La valeur culturale (pourcentage de semences pures viables) définit la valeur réelle d'un lot de semences d'une spéculation destinée à la culture. Seules les semences pures viables produisent des plantes. Il convient donc d'effectuer des calculs visant à ajuster correctement la dose de semis si nécessaire.

**Semences pures viables (%) = Semences pures (%) x Germination (%)**

**Exemple :** Si l'étiquette d'un sac de semences indique un taux de germination de 80 % et de pureté de 95 %,

**Semences pures viables =  $(80 \times 95) / 100 = 76\%$**

Avant l'échantillonnage il faut bien se documenter c'est-à-dire lire tout l'étiquetage attentivement si non le rendement de la germination sera faible donc les expériences ne seront pas fiables.

Les semences choisies pour le traitement sont d'importance majeurs vue leurs consommation très élevée soit par les humains ou par les animaux (sorgho, blé, seigle, sarrasin).

#### **III.4. Préparation des semis et des plaques de semis :**

Dans cette opération, nous avons opté pour l'utilisation de deux méthodes conventionnelles de semis tels que ; préparation des semences dans des boîtes à pétrie avec du coton humide et aussi dans plaque de semis et du terreau.

Avant de commencer l'opération de semis dans les plaques, il nous a fallu penser à une solution pratique et économique. Pour cela, on a choisi des plaques de semis (Figure 3.8), sinon de point de vue écologique on peut penser tout simplement au recyclage des boîtes à œufs en carton (facile d'utilisation pour le repiquage).



**Figure.III.8. Plaque de germination**

Caractéristiques de Plaque de Germination :

- Plaque de Germination
- Idéal pour semence ou pour propager des graines
- Présentation :40 alvéoles
- Dimensions de chaque alvéole :6x5x5cm (150ml)
- Dimensions du plateau :53x30x6cm

Le choix du terreau est important, il ne doit pas être enrichi en matières organiques car les graines ont leur propre réserve pour croître. Il existe des terreaux “spécial semis ” qui conviennent parfaitement, mais il y a une possibilité de fabriquer du terreau en mélangeant du terreau à du sable pour le rendre plus léger (Figure 3.9).



**FigureIII.9. Technique de préparation des semis.**

### **III .3.5. Les graines utilisées**

- **Graine de Dura:** Pour que la culture de maïs pousse correctement, elle a besoin d'une atmosphère complètement ensoleillée et un peu chaude, et le sol doit être bien drainé et des engrais organiques sont généralement utilisés pour rendre le sol également et les grains de maïs sont plantés en lignes (rainures) à une profondeur de 3 cm sous le sol et doit être la distance entre chaque grain est d'environ 10 cm Le maïs est généralement planté au début du printemps (après que tout danger de gel est passé).Le maïs est récolté à l'état naturel 20 jours après l'émergence des fils de soie, donc la couleur de la soie est brune ,tandis que l'enveloppe est encore verte, et c'est un signe de la maturité du maïs sur lequel il a poussé chaque tige au moins une sera près du sommet[1].



**FigureIII.10. Photographie de la graine de dura**



**FigureIII.11. Les étapes de germination[2].**

- **Graine de coriandre** : Creusez dans le sol à une profondeur de 1/2 cm et environ 15 à 20 cm entre chaque trou, en rangées distantes d'environ 1/3 mètre. Les graines de coriandre ont besoin de beaucoup d'humidité pour germer, vous devez donc vous assurer de les arroser régulièrement. Vous avez besoin d'environ 1 pouce d'eau par semaine et vous devriez commencer à germer après 2 ou 3 semaines [3].



**FigureIII.12. Grain de coriandre**

- **Grain de haricot** : En 3 jours à peine, Grâce à l'eau, la graine gonfle et germe. La radicule, qui plus tard des racines, perce le l'enveloppe de la graine et pousse vers le bas. Puis la tigelle, la petite tige, pousse vers le haut, la plante se met à grandir [4].



**Figure.III.13. Grain de haricot**

- **Graine de sorgho** : Quand la graine de sorgho est semée dans un terrain humide, elle s'inhibe et gonfle. Si le sol est chaud (températures supérieures à 20°C), la germination a lieu rapidement. C'est le cas lors de la saison des pluies en zone tropicale. La coléoptile émerge du sol 3 ou 4 jours après le semis. En conditions plus froides de contre - saison ou dans les régions tempérées, l'apparition des plantules peut demander d'une à deux semaines [3].



**FigureIII.14. Graine de sorgho**

Le tableau.3.1 présente les durées de germination pour chaque type de graine ainsi que les conditions favorables pour cette opération.

**Tableau.III.1. La germination dans les conditions normale des différentes graines.**

	<i>Durée de Germination</i>	<i>Temperature</i>	<i>Humidité</i>	<i>Profondeur</i>
<i>Dura</i>	20jours	15/23°C	40%-50%	3cm
<i>Coriande</i>	2-3semaine	15/20°C	50%	1/2cm
<i>Haricot</i>	3jours	18°C	50%-60%	2cm
<i>Sorgho</i>	3-4jour	20°C	25%	3cm

Quatre types de graines sont mentionnés ci-dessus et chaque type est divisé en 6 groupes. Cinq groupes avec thérapie au plasma générer par la décharge couronne, Et un témoin de groupe de chaque type pour comparaison.

Une expérience a été menée sur 120 graines de sorgho. Ces graines ont été plantées dans du coton contenu dans des boîtes de Pétri. Elles ont été réparties en 4 groupes distincts :

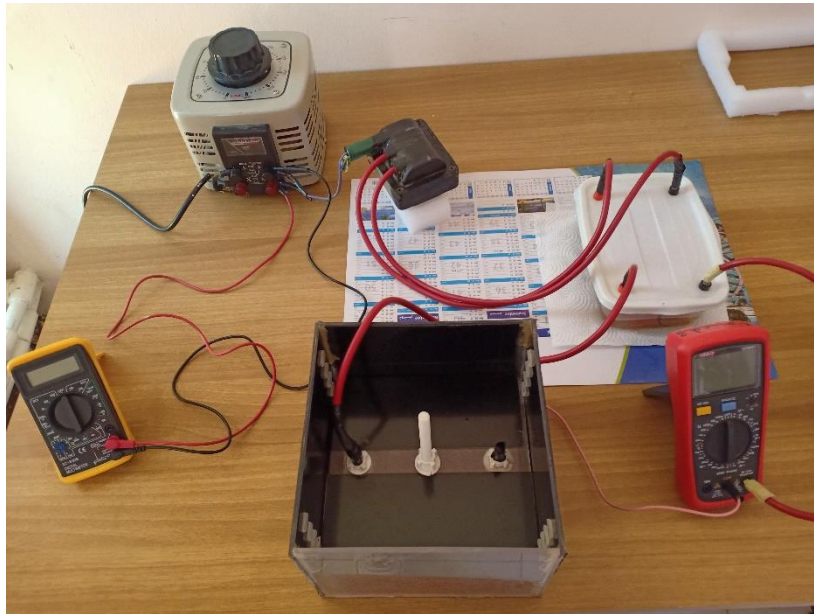
- 3 groupes de traitement, chacun composé de 30 graines subdivisées en 3 boîtes de 10 graines. 1 groupe témoin de 30 graines non traitées, également subdivisé en 3 boîtes de 10 graines.
  - Parmi les 3 groupes de traitement :  
Les 3 groupes ont été exposés à une tension de 15 kV, à 4 cm de distance.
  - Groupe 1 (15 kV) : 10 minutes d'exposition
  - Groupe 2 (15 kV) : 15 minutes d'exposition
  - Groupe 3 (15 kV) : 20 minutes d'exposition
- Les groupes témoin n'a subi aucune exposition électrique.

#### **III.4. Etudes expérimentale**

- Avant le traitement des échantillons, une étude paramétrique sera effectuée afin de déterminer la caractéristique courant tension en fonction de la distance inter-électrodes et la tension appliquée aussi la configuration utilisée. La valeur du courant est considérée dans la majorité des études comme l'indice de l'efficacité du traitement pour cela la première partie de l'étude expérimentale sera focalisée sur la mesure du courant en fonction de la tension pour les différents paramètres cités ci-dessus aussi sera comparée avec le modèle théorique et les résultats de la modélisation.
- Les principaux facteurs influençant sur traitement des graines sont la tension variable et le temps de traitement ainsi que le type de configuration utilisé.
- Surveillanceetsuivedel'évolutiondelagerminationdesgainesaprèslesemis.
- Analyse des résultats et comparaison avec celles du modèle théorique de la dynamique de germination.

### **III.5. Caractéristiques courant-tension :**

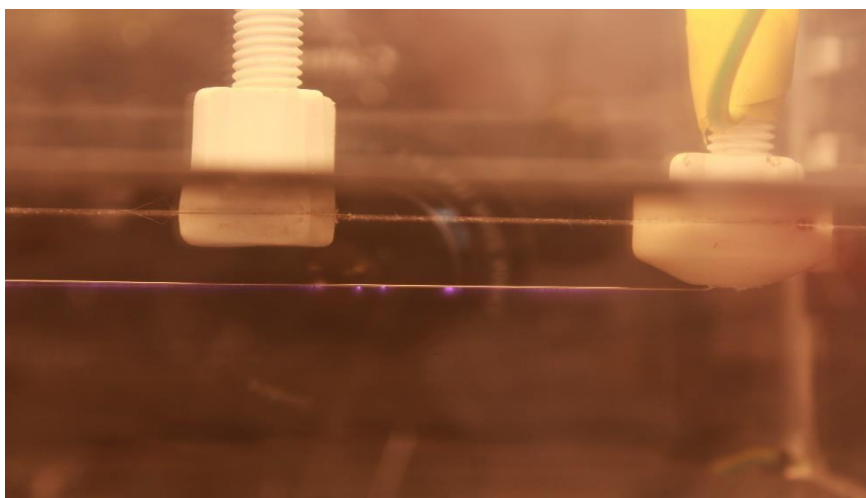
Dans cette section, nous présentons les caractéristiques courant-tension (Figure.3.16) ainsi que la puissance consommée obtenues à partir de la chambre de traitement pour deux distance inter-électrodes étudiées. Le banc d'essai est présenté dans la figure 3.15.



**Figure.III.15. Vue d'ensemble du banc expérimental**

### **III.6. Morphologie de la décharge couronne dans la configuration :**

La morphologie des décharges couronne négative pour la configuration étudiée est représentée sur la figure.3.17. La décharge couronne négative produit des spots actifs discrets le long du fil couronne appelés 'tufts' comme illustré dans la figure ci-dessous.



**Figure.III.16. Morphologie de la décharge couronne pour une tension de 30kV et une distance inter-électrode  $D=4\text{cm}$**



**III.7. Résultats et interprétation de l'accélération de la germination :**

Après 20 heures, nous avons constaté que les racines commencent à apparaître avec un taux de 13% pour les échantillons traités pendant 10 min à 15 kV et graines sur 10 ont poussé pour des graines non repaire donc l'effet du traitement par décharge couronne est considéré comme mineur.

L'échantillons (2) : le taux de germination est de 10%, pour les graines traitées pendant 15 min à 15 KV et aussi notons que deux graines sur 10 ont poussé pour les graines non traitées,

L'échantillons (3) : le taux de germination est de 46% pour celles traitées pendant 20 min à 15 kV et aussi notons qu'une seule graine sur 10 a germiné pour les graines non traitées.



**Groupe (1) 15kV-10min**



**Groupe (2) 15kV-15min**



Groupe (3)15kV-20min

Figure.III.17. Suivi de la germination pour les trois échantillons(20H).

Après 33 heures, nous avons constaté que les racine sont germinée avec un taux de 76% et de longueur 0.2cm qui traités pendant 5 min à 15 kV. L'échantillon (2) le taux de germination atteint 80% et avec une longueur de 0.5cm pour les graines traitées pendant 10 min à 15 kV et aussi 2 graines sur 10 ont poussé pour les graines repaires, L'échantillon (3) le taux de germination atteint 80% avec une longueur de 0.8cm pour les graines traitées pendant20 min à 15 kV et aussi on note que 3 graines sur 10 ont poussé pour le cas des graines non traitées.



Groupe (1)15kV-10min



G

roupe (2) 15KV-15min



**Groupe (3) 15KV-20min**

**Figure.III.18. Suivre de la germination pour les trois échantillons (33H).**

Après 46 heures du traitement, le taux de germination atteint son maximum avec une valeur de 76 % et une longueur de 0.6 cm pour les graines traitées pendant 10 min à 15 kV et 8 graines sur 10 ont poussé pour des graines non traitées. Pour l'échantillon (2), le taux de germination dépasse 80% et on remarque que la longueur de croissance atteint 1 cm pour les semences traitées pendant 15 min à 15 kV et aussi 7 graines sur 10 ont poussé pour des graines non traitées, pour ce dernier groupe de test l'échantillon (3), la germination atteint 80% et la longueur mesurée est de 1.5 cm pour les graines traitées pendant 20 min à 15 kV sans oublier que 3 graines sur 10 ont poussé pour des graines non traitées.



**Groupe (1) 15KV-10min**



**Groupe (2) 15KV-15min**



**Groupe (3) 15KV-20min**

**Figure. III.19. Suivre de la germination pour les trois échantillons (46H).**

Après 59 heures du traitement, le taux de germination atteint son maximum avec une valeur de 90% traitées pendant 10 min à 15kV et 10 graines sur 10 ont poussé pour des graines non traitées. Pour l'échantillon (2), le taux de germination dépasse 93 % Traitées pendant 15 min à 15kV et aussi 9 graines sur 10 ont poussé pour des graines non traitées, pour ce dernier groupe de test l'échantillon (3), la germination atteint 100% traitées pendant 20 min à 15 kV sans oublier que 7 graines sur 10 ont poussé pour des graines non traitées.



**Groupe (1) 15KV-10min**



Groupe (2) 15KV-15min



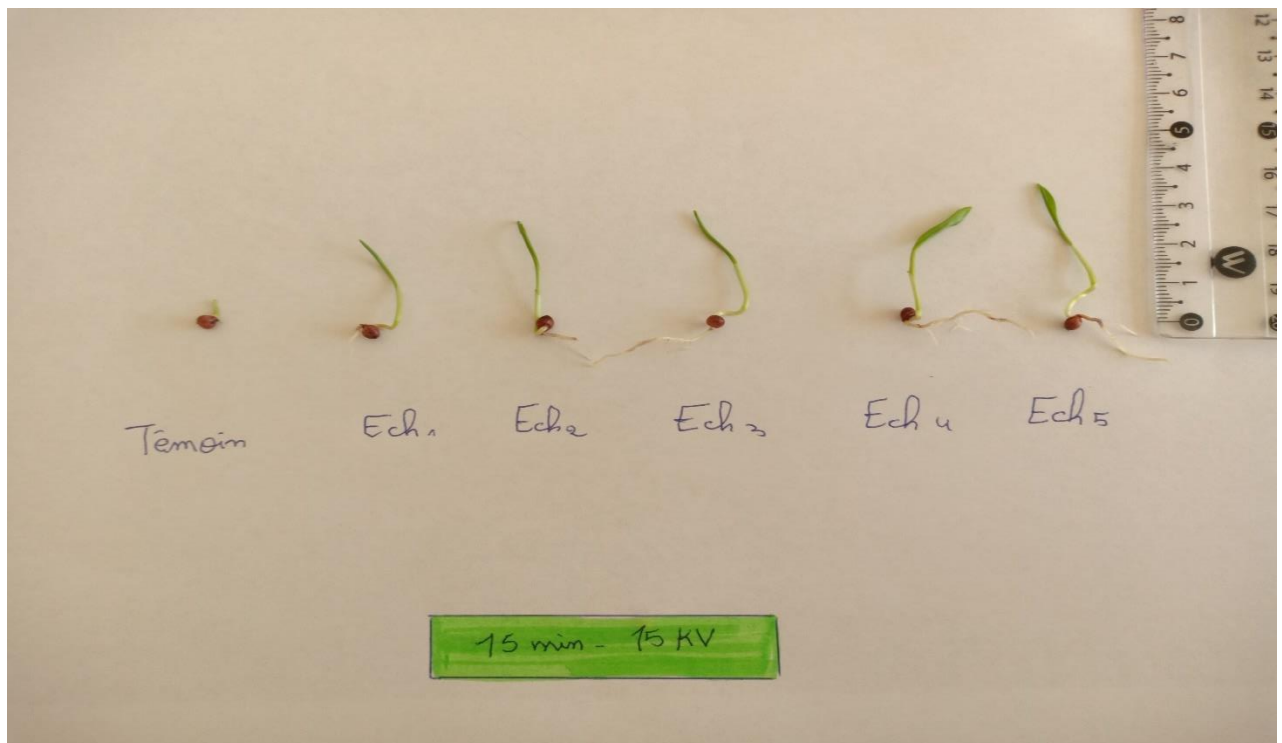
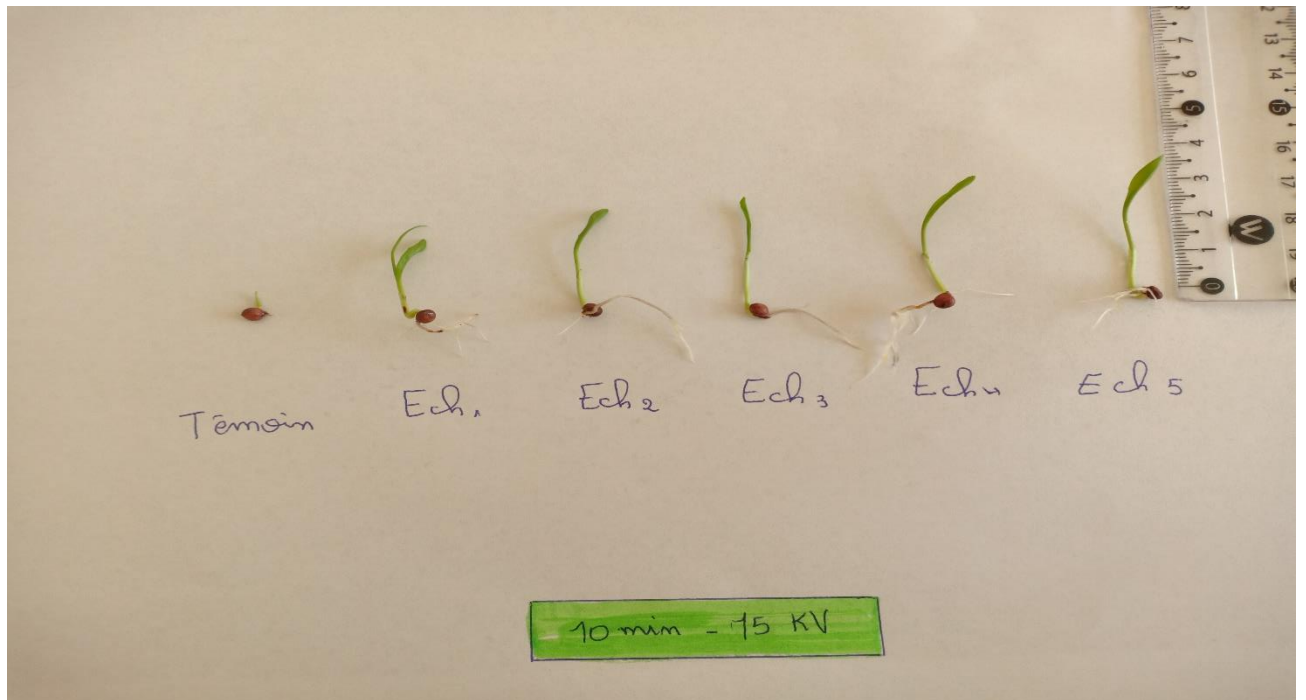
Groupe (3) 15KV-20min

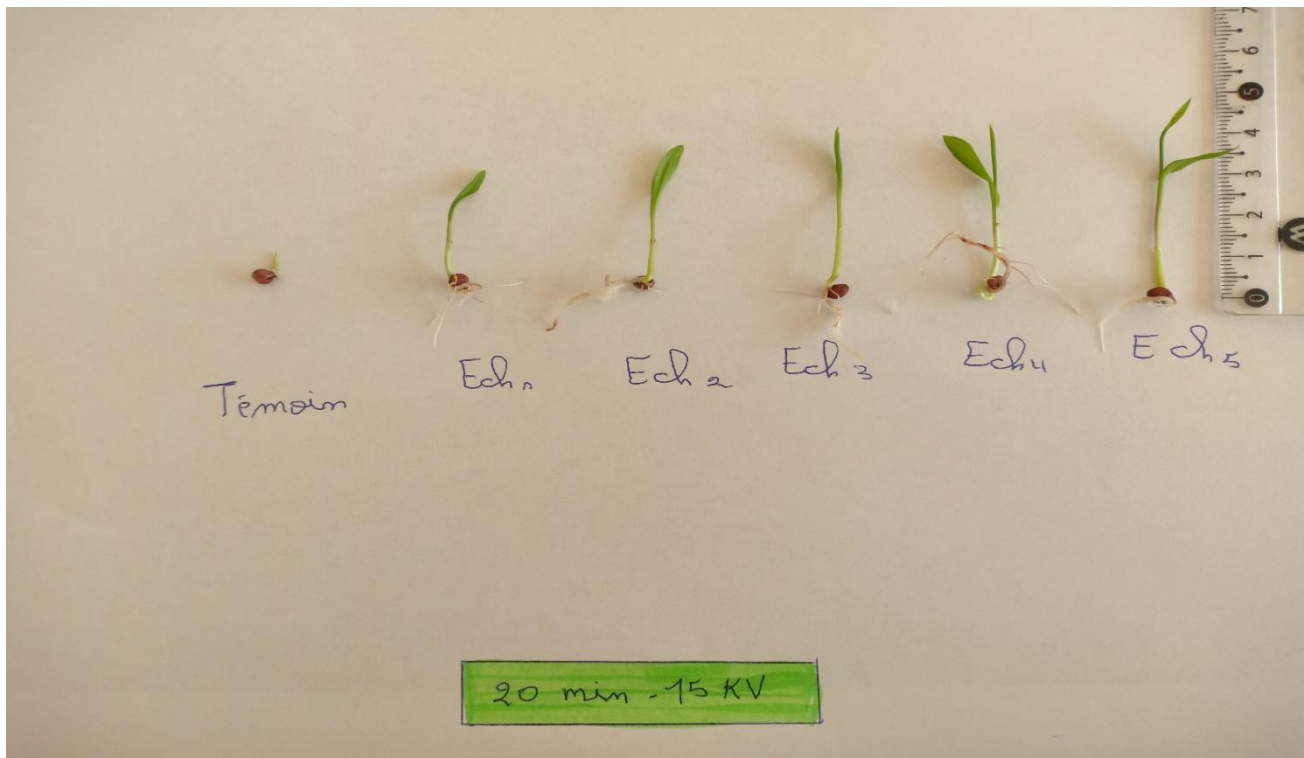
Figure. III.20. Suivre de la germination pour les trois échantillons (59H).

Dans le 5<sup>ème</sup> jour, nous remarquons que toutes les graines traitées avaient poussé, la différence était dans la longueur de la tige, où la longueur moyenne de la tige était de 3,5 centimètre dans le groupe traité avec 15kV durant 10 minutes,

Pour les graines de deuxième groupe traitées avec 15 KV pendant 15min nous remarquons que la longueur de la tige atteint 4,5cm

Pour le troisième groupe où les graines sont traitées avec 15kV pendant 20min nous remarquons que la longueur de la tige est de 5,5 cm et pour les graines non traité la croissance est faible par rapport à celle traité par la décharge couronne pour la majorité des échantillons.





**Figure.III.21. Croissance des graines pour s différents cas étudiés10,15,20munîtes.**

Dans ces expériences, la germination rapide des graines traitées par rapport à celle contrôlée indique que la décharge couronne peut jouer un rôle important dans la sécrétion rapide d'enzymes et l'augmentation du taux de mobilisation des aliments. Cela peut également impliquer la rupture de la dormance des graines, car les graines traitées sont été enregistrées avec un taux de germination élevé.

Plusieurs autres recherches appuient également cette découverte en soulignant le rôle de l'électricité dans la germination des graines.

L'azote est l'élément libre le plus abondant dans l'air, Le plasma de décharge corona augmente le pourcentage d'azote à l'intérieur des plantes en l'ionisant, qui s'infiltré dans les graines car c'est l'un des composants essentiels de la cellule qui agit comme un composant des protéines, des acides nucléiques et de la chlorophylle ( la substance des feuilles vertes)et comme régulateur de croissance.

### **III.8. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de présenter les différents éléments constituant un système de traitement des semences par champ électrique. Il est évident que les générateurs haute tension et les chambres de traitement sont des éléments fondamentaux dans la conception de ces systèmes à l'échelle de laboratoire ou industrielle.

Le traitement par champ électrique respecte l'environnement, nous permettant aussi de nous passer des engrais et de produits chimique Stan disque les résultats de germination et de croissance

Des graines traitées avec 15kV pendant 20minutes sont satisfaisant en termes de taux de germination et aussi consommation de puissance, Ces paramètres représente la valeur optimale pour l'accélération de la germination et la croissance de la plante.



# *Conclusion Générale*

## **Conclusion Générale :**

Ce projet de fin d'étude évoque une synthèse sur l'application du champ électrique ou plus précisément la décharge couronne pour améliorer et l'accélération de la germination des semences ainsi que la croissance des plantes par la suite, on peut conclure que l'application de cette technique à des doses appropriées peut être un moyen efficace d'améliorer de nombreux paramètres végétaux qui augmentent leur productivité.

Les effets bénéfiques de la stimulation des graines sont principalement liés aux premières étapes de la vie des plantes, c'est-à-dire la germination, l'émergence et la croissance des semis. Dans de nombreux cas, l'amélioration de ces caractéristiques est également le résultat de l'augmentation des rendements des plantes.

Des recherches récentes encouragent la mise en œuvre de ces méthodes physiques d'amélioration de la qualité des semences dans les pratiques agricoles et horticoles.

Il a été constaté que l'application de la décharge couronne sur les graines de sorgho affectent significativement le processus de germination.

Les résultats de cette première approche sont satisfaisants où on a constaté que le temps de traitement affecte significativement l'accélération de la germination (d'après les résultats 20 minutes est le temps optimal pour le traitement). La germination des graines à commencer d'apparaître des 20 heures après le traitement par décharge couronne atteint un taux 46 % après 33 heures et 80 % après 59 heures sa chant que la durée moyenne de germination de cette variété des graines nécessite 72 heures jusqu'à 96 heures après leurs semis.

D'autre part, le contrôle et suivie de la croissance de ces graines avec le temps montre que les graines traitées sont une croissance bien accélérée où leurs tiges sont atteints 7cm de longueur au bout de quatre jours et pour les graines non traitées leur évolutions physiologique ne dépasse pas 0.5 cm.

D'autre paramètres feront l'objet des futures investigations tels que la variété des semences, le temps de traitement (jusqu'à une heure d'exposition), les niveaux de la tension afin d'optimiser cette technique pour des meilleurs rendements, l'augmentation de nombre des échantillons afin d'élaborer une étude statique approfondie et un modèle mathématique de ce processus.

## Références chapitre 1

- [1] G.Claude.(1998),«Effet couronne sur les réseaux électriques aériens»,Paris.
- [2] M. Derakhshanin.(2001), «Simulations numériques des vibrations induites par effet de couronne sur un court conducteur soumis à une pluie artificielle,» université de Chicoutimi, Canada.
- [3] A. Gourbi, «Mécanisme des vibrations induites par effet de couronne,» Université Djillali Liabes de Sidi bel Abbès.
- [4] <https://boowiki.info/art/la-conduction-electrique/decharge-couronne.html#Bibliografia>, [En ligne].consulté le 15/03/2022
- [5] J. JOLIBOIS.(2008), «étude de développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique,» thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- [6] K. Haimaet M. Soumia.(2020), «Décharge Couronne en Configuration Coaxiale : Application à la neutralisation des charges,» Guelma.
- [7] M. Abekghani, Ounnoughi. et Tacfarinas.(2014), «Etude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative,» Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [8] A. Cherif et A. Sabrina.(2018), «L'effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne,» Université Abderrahmane Mira –Bejaïa.
- [9] Available: Décharge couronne, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet-coronna>, [En ligne]. Consulté le 30/03/2022
- [10] M. Ismahene et M. Soumia.(2019), «Mesure du champ électrique,» Mémoire d'Ingénieur, université de Guelma.
- [11] Y. bourek.(2016), «détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par logique floue,». Université de Betna2.
- [12] C. Garyet M. Moreou, «L'effet de couronne en tension alternative,» Paris.
- [13] M. Rezzougiet A. Tilmatine, «Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments,» China.

- [14] M. Panaget. (1997), «Étude en laboratoire des effets physico-chimique induits par les pertes électriques des lignes de transport à haute tension,» Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie.
- [15] K. Houcine, «Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension,» tizi-ouzou.
- [16] F.Koliatene, «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique,» Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier.
- [17] B.Mokhtaria.(2014),«étude de la production de l'ozone dans les décharges couronne,» oran.
- [18] R.Said.(2017), «étude des propriétés de surface des films de polymère traité par une décharge électrique,» Thèse de doctorat de l'université Akli mohandoulhadjbouira.
- [19] «journal électrostatique,» Vols. % 1 sur % 2233-238, avril 2007.
- [20] A.Thijeset M.Defraeye,«Electrohydrodynamic drying of food: New insights from conjugate modeling,» vol. 198, pp. 269-284.

## Référence chapitre 2

- [1] Y. Corzas, «Lutte contre l'érosion des terres noires en montagne méditerranéenne. connaissance du matériel végétal herbacé et quantification de son impact sur l'érosion,» Marsielle.
- [2] «Prétraitement des graines avant le semis,» [En ligne]. [Accès le 19/09/2020].
- [3] F. Peter, L. Ffolliott & John. et Thames. (1983), «Récolte, manipulation, conservation et prétraitement des semences de Prosopis».
- [4] M. Krawiec., A. Dziwulska-Hunek. et K. (. Kornarzynski., «The use of physical factors for seed quality improvement of horticultural plants».
- [5] D. Jyothi, P. Rai, K. Khnada et D. Srikanth, «Effect of magnetic and electric field seed treatment on the seedling attributes of Brinjal (Solanum melongena) seeds.».
- [6] Brasoveanu, M.; Nemtanu, M.R.; Surdu-Bob, C.; Karaca. (2015), «Effect Of Glow Discharge Plasma On Germination And Fungal Load Of Some Cereal Seeds,» vol. 67, n° 12, pp. 617-624.

[7]Putroi,S.;Nucifira,N.;Kanie,M.;Pratiwi,S.(2016),«CoronaDischargePlasmaTechnologyto Accelerate the Growth ofBlack Soybean Plants.Naturel0Sciences Reserche,» vol. 6, n° %1No 14.

[8]S.Lynikiene,A.Pozelieneet G.Rutkauska,«Influenceofcoronadischargefieldonseed viability and dynamics of germination.».

[9]S. mohammed et S. kanimarani, «Effect of Seed Exposure to Direct Electrical Current on GerminationandSeedlingsGrowthofthreeCowpeas(VignaunguiculataL.)Cultivars. Pureand appleid sciences.,» vol. 30 (5), n° %1168-179.

[10]Zhao,Y.;Liu,J.;Qin,H.;Liang,Z.:(2012),«TheEffect ofElectrochemicalProcessingon Biological Behavior of Wheat Seeds Germination,» vol. 7, n° %111313-11322

### **Références chapitre 3**

[1] Available:<https://www.gammvert.fr/conseils/conseils-de-jardinage/semer-le-mais>,[Enligne].

Consulté le 29/05/2022

[2] Available:[https://uel.unisciel.fr/biologie/module1/module1\\_ch04/co/observer\\_ch4\\_15.html](https://uel.unisciel.fr/biologie/module1/module1_ch04/co/observer_ch4_15.html),[En ligne]. Consulté le 29/05/2022

[3] Available:<https://jardinage.lemonde.fr/dossier2015semiscoriandre.html#:~:text=Les%20semis%20se%20font%20en,terre%20doit%20rester%20l%C3%A9g%C3%A8rement%20humide>, [En ligne]. Consulté le 18/05/2022

[4] Available:<https://www.journaldesfemmes.fr/jardin/conseils-jardinage/2683601-quand-et-comment-semer-des-haricots-verts>, [En ligne].consulté le 18/05/2022