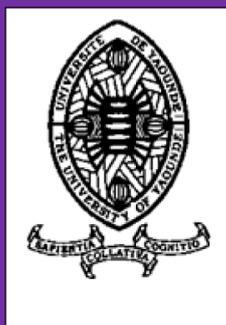


UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I  
FALCULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET  
GÉOSCIENCES

UNITÉ DE RECHERCHE ET  
FORMATION DOCTORALE EN  
CHIMIE ET APPLICATIONS



UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FALCULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCE

RESEARCH AND POSTGRADUATE  
TRAINING UNIT IN CHEMISTRY  
AND ITS APPLICATIONS

DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE  
*INORGANIC CHEMISTRY DEPARTMENT*

LABORATOIRE DE CHIMIE PHYSIQUE ET ANALYTIQUE APPLIQUÉE  
*LABORATORY OF APPLIED PHYSICAL AND ANALYTICAL CHEMISTRY*

**Etude de l'influence du traitement plasma de type  
Glidarc sur la conservation et la germination des  
semences de maïs**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 24 juin 2024 par :

KAMSEU MOGO Jean Paul

*Matricule : 08T0685*

*Master en Chimie Inorganique (UYI)*

En vue de l'obtention du **DOCTORAT/Ph.D** en Chimie

Spécialité : Chimie Inorganique

*Option : Physico-chimie de l'environnement et des matériaux*

*Devant le jury composé de :*

Président : ELIMBI Antoine, Professeur, Université de Yaoundé I

Rapporteur : LAMINSI Samuel, Professeur, Université de Yaoundé I

Membres : NENWA Justin, Professeur, Université de Yaoundé I

SIELIECHI Joseph, Professeur, Université de Ngaoundéré

KAMGANG YOUNBI Georges, Maître de Conférences Université de Yaoundé



Année 2024

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I  
FALCULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET  
GÉOSCIENCES

UNITÉ DE RECHERCHE ET  
FORMATION DOCTORALE EN  
CHIMIE ET APPLICATIONS



UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FALCULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCE

RESEARCH AND POSTGRADUATE  
TRAINING UNIT IN CHEMISTRY  
AND ITS APPLICATIONS

DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE  
*INORGANIC CHEMISTRY DEPARTMENT*

LABORATOIRE DE CHIMIE PHYSIQUE ET ANALYTIQUE APPLIQUÉE  
*LABORATORY OF APPLIED PHYSICAL AND ANALYTICAL CHEMISTRY*

**Etude de l'influence du traitement plasma de type  
Glidarc sur la conservation et la germination des  
semences de maïs**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 24 juin 2024 par :

**KAMSEU MOGO Jean Paul**

**Matricule : 08T0685**

*Master en Chimie Inorganique (UYI)*

En vue de l'obtention du **DOCTORAT/Ph.D en Chimie**

**Spécialité : Chimie Inorganique**

**Option : Physico-chimie de l'environnement et des matériaux**

*Devant le jury composé de :*

**Président** : ELIMBI Antoine, Professeur, Université de Yaoundé I

**Rapporteur** : LAMINSI Samuel, Professeur, Université de Yaoundé I

**Membres** : NENWA Justin, Professeur, Université de Yaoundé I

SIELIECHI Joseph, Professeur, Université de Ngaoundéré

KAMGANG YOUNBI Georges, Maître de Conférences Université de Yaoundé

**Année 2024**

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN  
*Paix – Travail – Patrie*  
UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I  
FACULTÉ DES SCIENCES  
BP 812 Yaoundé



REPUBLIC OF CAMEROON  
*Peace – Work – Fatherland*  
THE UNIVERSITY OF YAOUNDÉ I  
FACULTY OF SCIENCE  
P.O. Box 812 Yaoundé

DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE  
DEPARTMENT OF INORGANIC CHEMISTRY

## Attestation de correction du manuscrit de thèse de Doctorat/Ph.D

Nous soussignés, membres du jury de la soutenance de thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur **KAMSEU MOGO Jean Paul**, Matricule **08T0685**, soutenance autorisée par la correspondance N° **07841-2024/UYI/CRFD/STG/24** du 26 mars 2024 de Monsieur le Recteur de l'Université de Yaoundé I, attestons que les corrections exigées au candidat lors de cette évaluation faite le 24 juin 2024 ont été réellement effectuée et que le présent document peut être déposé sous sa forme actuelle.

En foi de quoi la présente attestation est établie et lui délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

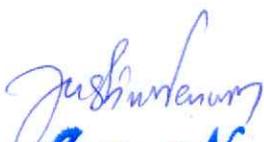
02 OCT 2024

Yaoundé.....

Président du Jury

  
Antoine Elimbi  
Pr. ELIMBI Antoine

Examineurs

  
Justin Nenuwa  
Professeur  
Pr. NENWA Justin

  
Kamgang Youbi G. PhD  
Maitre de Conférences  
Pr. KAMGANG YOUBI Georges

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I</b><br><b>Faculté des Sciences</b><br>Division de la Programmation et du<br>Suivi des Activités Académiques |  | <b>THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I</b><br><b>Faculty of Science</b><br>Division of Programming and Follow-up<br>of Academic Affairs |
| <b>LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS</b>  |   | <b>LIST OF PERMANENT TEACHING STAFF</b>   |

## ANNÉE ACADEMIQUE 2023/2024

(Par Département et par Grade)

**DATE D'ACTUALISATION 04 Juin 2024**

### ADMINISTRATION

**DOYEN** : TCHOUANKEU Jean- Claude, *Professeur*

**VICE-DOYEN / DPSAA**: ATCHADE Alex de Théodore, *Professeur*

**VICE-DOYEN / DSSE** : NYEGUE Maximilienne Ascension, *Professeur*

**VICE-DOYEN / DRC** : NOUNDJEU Pierre, *Maître de Conférences*

**Chef Division Administrative et Financière** : NDOYE FOE Florentine Marie Chantal,  
*Maître de Conférences*

**Chef Division des Affaires Académiques, de la Recherche et de la Scolarité DAARS** :  
AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, *Professeur*

#### 1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (43)

| N° | NOMS ET PRÉNOMS      | GRADE      | OBSERVATIONS               |
|----|----------------------|------------|----------------------------|
| 1. | BIGOGA DAIGA Jude    | Professeur | En poste                   |
| 2. | FEKAM BOYOM Fabrice  | Professeur | En poste                   |
| 3. | KANSCI Germain       | Professeur | En poste                   |
| 4. | MBACHAM FON Wilfred  | Professeur | En poste                   |
| 5. | MOUNDIPA FEWOU Paul  | Professeur | <i>Chef de Département</i> |
| 6. | NGUEFACK Julienne    | Professeur | En poste                   |
| 7. | NJAYOU Frédéric Nico | Professeur | En poste                   |
| 8. | OBEN Julius ENYONG   | Professeur | En poste                   |

|    |                                   |                       |                      |
|----|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 9. | ACHU Merci BIH                    | Maître de Conférences | En poste             |
| 10 | ATOCHO Barbara MMA                | Maître de Conférences | En poste             |
| 11 | AZANTSA KINGUE GABIN<br>BORIS     | Maître de Conférences | En poste             |
| 12 | BELINGA née NDOYE FOE F.<br>M. C. | Maître de Conférences | <i>Chef DAF / FS</i> |
| 13 | DAKOLE DABOY Charles              | Maître de Conférences | En poste             |
| 14 | DONGMO LEKAGNE Joseph<br>Blaise   | Maître de Conférences | En poste             |

|    |                                |                       |                        |
|----|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 15 | DJUIDJE NGOUNOUE Marceline     | Maître de Conférences | En poste               |
| 16 | DJUIKWO NKONGA Ruth<br>Viviane | Maître de Conférences | En poste               |
| 17 | EFFA ONOMO Pierre              | Maître de Conférences | <i>VD/FS/Univ Ebwa</i> |
| 18 | EWANE Cécile Annie             | Maître de Conférences | En poste               |
| 19 | KOTUE TAPTUE Charles           | Maître de Conférences | En poste               |
| 20 | LUNGA Paul KEILAH              | Maître de Conférences | En poste               |
| 21 | MANANGA Marlyse Joséphine      | Maître de Conférences | En poste               |
| 22 | MBONG ANGIE M. Mary Anne       | Maître de Conférences | En poste               |
| 23 | MOFOR née TEUGWA Clotilde      | Maître de Conférences | <i>Doyen FS / UDs</i>  |
| 24 | NANA Louise épouse WAKAM       | Maître de Conférences | En poste               |
| 25 | NGONDI Judith Laure            | Maître de Conférences | En poste               |
| 26 | Palmer MASUMBE NETONGO         | Maître de Conférences | En poste               |
| 27 | PECHANGOU NSANGOU<br>Sylvain   | Maître de Conférences | En poste               |
| 28 | TCHANA KOUATCHOUA<br>Angèle    | Maître de Conférences | En poste               |

|     |                             |                  |          |
|-----|-----------------------------|------------------|----------|
| 29. | AKINDEH MBUH NJI            | Chargé de Cours  | En poste |
| 30. | BEBEE Fadimatou             | Chargée de Cours | En poste |
| 31. | BEBOY EDJENGUELE Sara N.    | Chargé de Cours  | En poste |
| 32. | FONKOUA Martin              | Chargé de Cours  | En poste |
| 33. | FOUPOUAPOUOGNIGNI Yacouba   | Chargé de Cours  | En poste |
| 34. | KOUOH ELOMBO Ferdinand      | Chargé de Cours  | En poste |
| 35. | MBOUCHE FANMOE Marceline J. | Chargé de Cours  | En poste |
| 36. | OWONA AYISSI Vincent Brice  | Chargé de Cours  | En poste |
| 37. | WILFRED ANGIE ABIA          | Chargé de Cours  | En poste |

|     |                                     |           |          |
|-----|-------------------------------------|-----------|----------|
| 38. | BAKWU BASSOGOG Christian<br>Bernard | Assistant | En Poste |
| 39. | ELLA Fils Armand                    | Assistant | En Poste |
| 40. | EYENGA Eliane Flore                 | Assistant | En Poste |
| 41. | MADIESSE KEMGNE Eugenie<br>Aimée    | Assistant | En Poste |
| 42. | MANJIA NJIKAM Jacqueline            | Assistant | En Poste |
| 43. | WOGUIA Alice Louise                 | Assistant | En Poste |

## 2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (49)

|    |                              |            |                                       |
|----|------------------------------|------------|---------------------------------------|
| 1. | AJEAGAH Gideon AGHAINDUM     | Professeur | <i>DAARS/FS</i>                       |
| 2. | DIMO Théophile               | Professeur | En Poste                              |
| 3. | DJIETO LORDON Champlain      | Professeur | En Poste                              |
| 4. | DZEUFJET DJOMENI Paul Désiré | Professeur | En Poste                              |
| 5. | ESSOMBA née NTSAMA MBALA     | Professeur | <i>CD et Vice<br/>Doyen/FMSB/UYYI</i> |

|     |                              |            |  |
|-----|------------------------------|------------|--|
| 6.  | KEKEUNOU Sévilor             | Professeur | <i>Chef de Département(a.i)</i>                          |
| 7.  | NJAMEN Dieudonné             | Professeur | En poste   |
| 8.  | NOLA Moïse                   | Professeur | En poste   |
| 9.  | TAN Paul VERNYUY             | Professeur | En poste   |
| 10. | TCHUEM TCHUENTE Louis Albert | Professeur | <i>Inspecteur de service /<br/>Coord.Progr./MINSANTE</i> |
| 11. | ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert  | Professeur | En poste   |

|     |  |                       |                                 |
|-----|--|-----------------------|---------------------------------|
| 12. | ALENE Désirée Chantal                    | Maître de Conférences | <i>Vice Doyen/<br/>Uté Ebwa</i> |
| 13. | ATSAMO Albert Donatien                   | Maître de Conférences | En poste                        |
| 14. | BILANDA Danielle Claude                  | Maître de Conférences | En poste                        |
| 15. | DJIOGUE Séfirin                          | Maître de Conférences | En poste                        |
| 16. | GOUNOUE KAMKUMO Raceline<br>épse FOTSING | Maître de Conférences | En poste                        |
| 17. | JATSA BOUKENG Hermine épse<br>MEGAPTCHE  | Maître de Conférences | En Poste                        |
| 18. | KANDEDA KAVAYE Antoine                   | Maître de Conférences | En poste                        |
| 19. | LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.                | Maître de Conférences | En poste                        |
| 20. | MAHOB Raymond Joseph                     | Maître de Conférences | En poste                        |
| 21. | MBENOUN MASSE Paul Serge                 | Maître de Conférences | En poste                        |
| 22. | MEGNEKOU Rosette                         | Maître de Conférences | En poste                        |
| 23. | MOUNGANG Luciane Marlyse                 | Maître de Conférences | En poste                        |
| 24. | NOAH EWOTI Olive Vivien                  | Maître de Conférences | En poste                        |
| 25. | MONY Ruth épse NTONE                     | Maître de Conférences | En Poste                        |
| 26. | MVEYO NDANKEU Yves Patrick               | Maître de Conférences | En poste                        |
| 27. | NGUEGUIM TSOFAK Florence                 | Maître de Conférences | En poste                        |
| 28. | NGUEMBOCK                                | Maître de Conférences | En poste                        |
| 29. | TAMSA ARFAO Antoine                      | Maître de Conférences | En poste                        |
| 30. | TOMBI Jeannette                          | Maître de Conférences | En poste                        |

|     |   |                 |          |
|-----|---|-----------------|----------|
| 31. | AMBADA NDZENGUE GEORGIA<br>ELNA               | Chargé de Cours | En poste |
| 32. | BASSOCK BAYIHA Etienne Didier                 | Chargé de Cours | En poste |
| 33. | ETEME ENAMA Serge                             | Chargé de Cours | En poste |
| 34. | FEUGANG YOUMSSI François                      | Chargé de Cours | En poste |
| 35. | FOKAM Alvine Christelle Epse<br>KENGNE        | Chargé de Cours | En poste |
| 36. | GONWOUO NONO Legrand                          | Chargé de Cours | En poste |
| 37. | KOGA MANG DOBARA                              | Chargé de Cours | En poste |
| 38. | LEME BANOCK Lucie                             | Chargé de Cours | En poste |
| 39. | MAPON NSANGO Indou                            | Chargé de Cours | En poste |
| 40. | METCHI DONFACK MIREILLE<br>FLAURE EPSE GHOUMO | Chargé de Cours | En poste |
| 41. | NGOUATEU KENFACK Omer Bébé                    | Chargé de Cours | En poste |

|     |                         |                  |                              |
|-----|-------------------------|------------------|------------------------------|
| 42. | NJUA Clarisse YAFI      | Chargée de Cours | <i>Chef Div. Uté Bamenda</i> |
| 43. | NWANE Philippe Bienvenu | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 44. | TADU Zephyrin           | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 45. | YEDE                    | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 46. | YOUNOUSSA LAME          | Chargé de Cours  | En poste                     |

|     |                            |            |          |
|-----|----------------------------|------------|----------|
| 47. | KODJOM WANCHE Jacguy Joyce | Assistante | En poste |
| 48. | NDENGUE Jean De Matha      | Assistant  | En poste |
| 49. | ZEMO GAMO Franklin         | Assistant  | En poste |

### **3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (32)**

|    |                          |            |                            |
|----|--------------------------|------------|----------------------------|
| 1. | AMBANG Zachée            | Professeur | <i>Chef de Département</i> |
| 2. | DJOCGOUE Pierre François | Professeur | En poste                   |
| 3. | MBOLO Marie              | Professeur | En poste                   |
| 4. | MOSSEBO Dominique Claude | Professeur | En poste                   |
| 5. | NDONGO BEKOLO            | Professeur | En poste                   |
| 6. | ZAPFACK Louis            | Professeur | En poste                   |

|     |                             |                       |                     |
|-----|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| 7.  | ANGONI Hyacinthe            | Maître de Conférences | En poste            |
| 8.  | BIYE Elvire Hortense        | Maître de Conférences | En poste            |
| 9.  | MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel | Maître de Conférences | En poste            |
| 10. | MALA Armand William         | Maître de Conférences | En poste            |
| 11. | MBARGA BINDZI Marie Alain   | Maître de Conférences | <i>DAAC /UDla</i>   |
| 12. | NGALLE Hermine BILLE        | Maître de Conférences | En poste            |
| 13. | NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.   | Maître de Conférences | <i>CT / MINRESI</i> |
| 14. | TONFACK Libert Brice        | Maître de Conférences | En poste            |
| 15. | TSOATA Esaïe                | Maître de Conférences | En poste            |
| 16. | ONANA JEAN MICHEL           | Maître de Conférences | En poste            |

#### 4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (27)

|     |                                       |                 |   |
|-----|---------------------------------------|-----------------|---|
| 17. | DJEUANI Astride Carole                | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 18. | GONMADGE CHRISTELLE                   | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 19. | MAFFO MAFFO Nicole Liliane            | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 20. | MANGA NDJAGA JUDE                     | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 21. | NNANGA MEBENGA Ruth<br>Laure          | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 22. | NOUKEU KOUAKAM Armelle                | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 23. | NSOM ZAMBO EPSE PIAL<br>ANNIE CLAUDE  | Chargé de Cours | <i>En<br/>détachement/UNESCO<br/>MALI</i> |
| 24. | GODSWILL NTSOMBOH<br>NTSEFONG         | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 25. | KABELONG BANAHOU Louis-<br>Paul-Roger | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 26. | KONO Léon Dieudonné                   | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 27. | LIBALAH Moses BAKONCK                 | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 28. | LIKENG-LI-NGUE Benoit C               | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 29. | TAEDOUNG Evariste Hermann             | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 30. | TEMEGNE NONO Carine                   | Chargé de Cours | En poste                                  |
| 31. | DIDA LONTSI Sylvere Landry            | Assistant       | En poste                                  |
| 32. | METSEBING Blondo-Pascal               | Assistant       | En poste                                  |

|    |                            |            |  |
|----|----------------------------|------------|--|
| 1. | GHOGOMU Paul MINGO         | Professeur | <i>Ministre Chargé de<br/>Mission PR</i> |
| 2. | NANSEU NJIKI Charles Péguy | Professeur | En poste                                 |
| 3. | NDIFON Peter TEKE          | Professeur | <i>CT MINRESI</i>                        |
| 4. | NENWA Justin               | Professeur | En poste                                 |
| 5. | NGOMO Horace MANGA         | Professeur | <i>Vice Chancellor/UB</i>                |
| 6. | NJIOMOU C. épse DJANGANG   | Professeur | En poste                                 |
| 7. | NJOYA Dayirou              | Professeur | En poste                                 |

|     |                              |                          |          |
|-----|------------------------------|--------------------------|----------|
| 8.  | ACAYANKA Elie                | Maître de<br>Conférences | En poste |
| 9.  | EMADAK Alphonse              | Maître de<br>Conférences | En poste |
| 10. | KAMGANG YOUBI Georges        | Maître de<br>Conférences | En poste |
| 11. | KEMMEGNE MBOUGUEM<br>Jean C. | Maître de<br>Conférences | En poste |
| 12. | KENNE DEDZO GUSTAVE          | Maître de<br>Conférences | En poste |
| 13. | MBEY Jean Aime               | Maître de<br>Conférences | En poste |

|    |                                 |                       |                                  |
|----|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 14 | NDI NSAMI Julius                | Maître de Conférences | <i>Chef de Département</i>       |
| 15 | NEBAH Née NDOSIRI Bridget NDOYE | Maître de Conférences | <i>Sénatrice/SENAT</i>           |
| 16 | NYAMEN Linda Dyorisse           | Maître de Conférences | En poste                         |
| 17 | PABOUDAM GBAMBIE AWAWOU         | Maître de Conférences | En poste                         |
| 18 | TCHAKOUTE KOUAMO Hervé          | Maître de Conférences | En poste                         |
| 19 | BELIBI BELIBI Placide Désiré    | Maître de Conférences | <i>Chef Service/ ENS Bertoua</i> |
| 20 | CHEUMANI YONA Arnaud M.         | Maître de Conférences | En poste                         |
| 21 | KOUOTOU DAOUDA                  | Maître de Conférences | En poste                         |

|     |                          |                  |          |
|-----|--------------------------|------------------|----------|
| 22. | MAKON Thomas Beauregard  | Chargé de Cours  | En poste |
| 23. | NCHIMI NONO KATIA        | Chargée de Cours | En poste |
| 24. | NJANKWA NJABONG N. Eric  | Chargé de Cours  | En poste |
| 25. | PATOUOSSA ISSOFA         | Chargé de Cours  | En poste |
| 26. | SIEWE Jean Mermoz        | Chargé de Cours  | En Poste |
| 27. | BOYOM TATCHEMO Franck W. | Assistant        | En Poste |

#### **6- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (34)**

|    |                             |            |  |
|----|-----------------------------|------------|--|
| 1. | Alex de Théodore ATCHADE    | Professeur | <i>Vice-Doyen / DPSAA</i>                    |
| 2. | DONGO Etienne               | Professeur | <i>Vice-Doyen/FSE/UIYI</i>                   |
| 3. | NGOUELA Silvère Augustin    | Professeur | <i>Chef de Département UDS</i>               |
| 4. | PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel | Professeur | <i>Recteur UBertoua/ Chef de Département</i> |
| 5. | MBAZOA née DJAMA Céline     | Professeur | En poste                                     |
| 6. | MKOUNGA Pierre              | Professeur | En poste                                     |
| 7. | TCHOUANKEU Jean-Claude      | Professeur | <i>Doyen /FS/ UYI</i>                        |

|     |                     |                       |          |
|-----|---------------------|-----------------------|----------|
| 8.  | AMBASSA Pantaléon   | Maître de Conférences | En poste |
| 9.  | EYONG Kenneth OBEN  | Maître de Conférences | En poste |
| 10. | FOTSO WABO Ghislain | Maître de Conférences | En poste |

|     |                              |                       |                                |
|-----|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 11. | KAMTO Eutrophe Le Doux       | Maître de Conférences | En poste                       |
| 12. | KENMOGNE Marguerite          | Maître de Conférences | En poste                       |
| 13. | KOUAM Jacques                | Maître de Conférences | En poste                       |
| 14. | MVOT AKAK CARINE             | Maître de Conférences | En poste                       |
| 15. | NGO MBING Joséphine          | Maître de Conférences | <i>Chef de Cellule MINRESI</i> |
| 16. | NGONO BIKOBO Dominique Serge | Maître de Conférences | <i>C.E.A/ MINESUP</i>          |
| 17. | NOTE LOUGBOT Olivier Placide | Maître de Conférences | <i>Dir ENS/Uté Bertoua</i>     |
| 18. | NOUNGOUE TCHAMO Diderot      | Maître de Conférences | En poste                       |
| 19. | TABOPDA KUATE Turibio        | Maître de Conférences | En poste                       |
| 20. | TAGATSING FOTSING Maurice    | Maître de Conférences | En poste                       |
| 21. | OUAHOUE WACHE Blandine M.    | Maître de Conférences | En poste                       |
| 22. | ZONDEGOUMBA Ernestine        | Maître de Conférences | En poste                       |

|     |                                |                  |          |
|-----|--------------------------------|------------------|----------|
| 23. | MESSI Angélique Nicolas        | Chargé de Cours  | En poste |
| 24. | MUNVERA MFIFEN Aristide        | Chargé de Cours  | En poste |
| 25. | NGNINTEDO Dominique            | Chargé de Cours  | En poste |
| 26. | NGOMO Orléans                  | Chargée de Cours | En poste |
| 27. | NONO NONO Éric Carly           | Chargé de Cours  | En poste |
| 28. | OUETE NANTCHOUANG Judith Laure | Chargée de Cours | En poste |
| 29. | SIELINOUE TEDJON Valérie       | Chargé de Cours  | En poste |
| 30. | TCHAMGOUE Joseph               | Chargé de Cours  | En poste |
| 31. | TSAFFACK Maurice               | Chargé de Cours  | En poste |
| 32. | TSAMO TONTSA Armelle           | Chargé de Cours  | En poste |
| 33. | TSEMEUGNE Joseph               | Chargé de Cours  | En poste |
| 34. | NDOGO ETEME Olivier            | Assistant        | En poste |

| <b>6- DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES (ER) (1)</b> |               |            |                            |
|---|---------------|------------|----------------------------|
|   | BODO Bertrand | Professeur | <i>Chef de Département</i> |

| <b>7- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (22)</b> |  |  |  |
|--|--|--|--|
|--|--|--|--|

|    |                             |            |   |
|----|-----------------------------|------------|---|
| 1. | ATSA ETOUNDI Roger          | Professeur | <i>Chef de Division des SI/ MINESUP</i>       |
| 2. | FOUDA NDJODO Marcel Laurent | Professeur | <i>Inspecteur Général Académique/ MINESUP</i> |

|    |                |                       |          |
|----|----------------|-----------------------|----------|
| 3. | NDOUNDAM René  | Maître de Conférences | En poste |
| 4. | TSOPZE Norbert | Maître de Conférences | En poste |

|     |  |                 |  |
|-----|--|-----------------|--|
| 5.  | ABESSOLO ALO'O Gislain                 | Chargé de Cours | <i>Chef de Cellule MINFOPRA</i>        |
| 6.  | AMINOU HALIDOU                         | Chargé de Cours | <i>Chef de Département</i>             |
| 7.  | DJAM Xaviera YOUH - KIMBI              | Chargé de Cours | En Poste                               |
| 8.  | DOMGA KOMGUEM Rodrigue                 | Chargé de Cours | En poste                               |
| 9.  | EBELE Serge Alain                      | Chargé de Cours | En poste                               |
| 10. | HAMZA Adamou                           | Chargé de Cours | En poste                               |
| 11. | JIOMEKONG AZANZI Fidel                 | Chargé de Cours | En poste                               |
| 12. | KOUOKAM KOUOKAM E. A.                  | Chargé de Cours | En poste                               |
| 13. | MELATAGIA YONTA Paulin                 | Chargé de Cours | En poste                               |
| 14. | MESSI NGUELE Thomas                    | Chargé de Cours | En poste                               |
| 15. | MONTHÉ DJIADEU Valéry M.               | Chargé de Cours | En poste                               |
| 16. | NZEKON NZEKO'O ARMEL JACQUES           | Chargé de Cours | En poste                               |
| 17. | OLLE OLLE Daniel Claude Georges Delort | Chargé de Cours | <i>Directeur Adjoint ENSET Ebolowa</i> |
| 18. | TAPAMO Hyppolite                       | Chargé de Cours | En poste                               |

|     |                               |           |                       |
|-----|-------------------------------|-----------|-----------------------|
| 19. | BAYEM Jacques Narcisse        | Assistant | En poste              |
| 20. | EKODECK Stéphane Gaël Raymond | Assistant | En poste              |
| 21. | MAKEMBE. S . Oswald           | Assistant | <i>Directeur CUTI</i> |
| 22. | NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.     | Assistant | En poste              |

**8- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (33)**

|    |                       |            |                            |
|----|-----------------------|------------|----------------------------|
| 1. | AYISSI Raoult Domingo | Professeur | <i>Chef de Département</i> |
|----|-----------------------|------------|----------------------------|

|    |                            |                       |  |
|----|----------------------------|-----------------------|--|
| 2. | KIANPI Maurice             | Maître de Conférences | En poste   |
| 3. | MBANG Joseph               | Maître de Conférences | En poste   |
| 4. | MBEHOU Mohamed             | Maître de Conférences | <i>Chef de Division/ENSPY</i>  |
| 5. | MBELE BIDIMA Martin Ledoux | Maître de Conférences | <i>Chef de Département de modélisation et applications industrielles/ENSPY</i> |
| 6. | NOUNDJEU Pierre            | Maître de Conférences | <i>VDRC/FS/UIYI</i>  |
| 7. | TAKAM SOH Patrice          | Maître de Conférences | En poste   |
| 8. | TCHAPNDA NJABO Sophonie B. | Maître de Conférences | <i>Directeur/AIMS Rwanda</i>   |
| 9. | TCHOUNDJA Edgar Landry     | Maître de Conférences | En poste   |

|     |                               |                  |   |
|-----|-------------------------------|------------------|---|
| 10. | AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard | Chargé de Cours  | <i>Chef Cellule MINEPAT</i>               |
| 11. | BOGSO ANTOINE Marie           | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 12. | BITYE MVONDO Esther           | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 13. | CHENDJOU Gilbert              | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 14. | DJIADOU NGAHA Michel          | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 15. | DOUANLA YONTA Herman          | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 16. | KIKI Maxime Armand            | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 17. | LOUMNGAM KAMGA Victor         | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 18. | MBAKOP Guy Merlin             | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 19. | MBATAKOU Salomon Joseph       | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 20. | MENGUE MENGUE David Joël      | Chargé de Cours  | <i>Chef Dpt /ENS Université d'Ebolowa</i> |
| 21. | MBIAKOP Hilaire George        | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 22. | NGUEFACK Bernard              | Chargé de Cours  | En poste                                  |
| 23. | NIMPA PEFOUKEU Romain         | Chargée de Cours | En poste                                  |
| 24. | OGADOA AMASSAYOGA             | Chargée de Cours | En poste                                  |
| 25. | POLA DOUNDOU Emmanuel         | Chargé de Cours  | <i>En stage</i>                           |

|     |                                  |                 |          |
|-----|----------------------------------|-----------------|----------|
| 26. | TENKEU JEUFACK<br>Yannick Léa    | Chargé de Cours | En poste |
| 27. | TCHEUTIA Daniel Duviol           | Chargé de Cours | En poste |
| 28. | TETSADJIO TCHILEPECK<br>M. Eric. | Chargé de Cours | En poste |

|     |                                |           |          |
|-----|--------------------------------|-----------|----------|
| 29. | FOKAM Jean Marcel              | Assistant | En poste |
| 30. | GUIDZAVAI KOUCHERE<br>Albert   | Assistant | En poste |
| 31. | MANN MANYOMBE<br>Martin Luther | Assistant | En poste |
| 32. | MEFENZA NOUNTU<br>Thiery       | Assistant | En poste |
| 33. | NYOUMBI DLEUNA<br>Christelle   | Assistant | En poste |

### 9- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (24)

|    |                                  |            |                            |
|----|----------------------------------|------------|----------------------------|
| 1. | ESSIA NGANG Jean Justin          | Professeur | <i>Chef de Département</i> |
| 2. | NYEGUE Maximilienne<br>Ascension | Professeur | <i>VICE-DOYEN / DSSE</i>   |
| 3. | SADO KAMDEM Sylvain<br>Leroy     | Professeur | En poste                   |

|     |   |                       |  |
|-----|---|-----------------------|--|
| 4.  | ASSAM ASSAM Jean Paul                         | Maître de Conférences | En poste                                   |
| 5.  | BOUGNOM Blaise Pascal                         | Maître de Conférences | En poste                                   |
| 6.  | BOYOMO ONANA                                  | Maître de Conférences | En poste                                   |
| 7.  | KOUITCHEU MABEKU Epse<br>KOUAM Laure Brigitte | Maître de Conférences | En poste                                   |
| 8.  | RIWOM Sara Honorine                           | Maître de Conférences | En poste                                   |
| 9.  | NJIKI BIKOÏ Jacky                             | Maître de Conférences | En poste                                   |
| 10. | TCHIKOUA Roger                                | Maître de Conférences | <i>Chef de Service de la<br/>Scolarité</i> |

|     |  |                 |          |
|-----|--|-----------------|----------|
| 11. | ESSONO Damien Marie                    | Chargé de Cours | En poste |
| 12. | LAMYE Glory MOH                        | Chargé de Cours | En poste |
| 13. | MEYIN A EBONG Solange                  | Chargé de Cours | En poste |
| 14. | MONI NDEDI Esther Del<br>Florence      | Chargé de Cours | En poste |
| 15. | NKOUDOU ZE Nardis                      | Chargé de Cours | En poste |
| 16. | NKOUÉ TONG Abraham                     | Chargé de Cours | En poste |
| 17. | TAMATCHO KWEYANG<br>Blandine Pulchérie | Chargé de Cours | En poste |
| 18. | SAKE NGANE Carole<br>Stéphanie         | Chargé de Cours | En poste |
| 19. | TOBOLBAÏ Richard                       | Chargé de Cours | En poste |

|     |                                 |           |          |
|-----|---------------------------------|-----------|----------|
| 20. | EZO'O MENGO Fabrice<br>Téléstor | Assistant | En poste |
| 21. | EHETH Jean Samuel               | Assistant | En poste |
| 22. | MAYI Marie Paule Audrey         | Assistant | En poste |
| 23. | NGOUE NAM Romial Joël           | Assistant | En poste |
| 24. | NJAPNDOUNKE Bilkissou           | Assistant | En poste |

#### 10. DEPARTEMENT DE PHYSIQUE(PHY) (42)

|    |                                 |            |   |
|----|---------------------------------|------------|---|
| 1. | BEN- BOLIE Germain<br>Hubert    | Professeur | En poste                                |
| 2. | BIYA MOTTO Frédéric             | Professeur | <i>DG/HYDRO Mekin</i>                   |
| 3. | DJUIDJE KENMOE épouse<br>ALOYEM | Professeur | En poste                                |
| 4. | EKOBENA FOU DA Henri<br>Paul    | Professeur | <i>Vice-Recteur. Uté<br/>Ngaoundéré</i> |
| 5. | ESSIMBI ZOBO Bernard            | Professeur | En poste                                |
| 6. | EYEBE FOU DA Jean sire          | Professeur | En poste                                |
| 7. | HONA Jacques                    | Professeur | En poste                                |
| 8. | NANA ENGO Serge Guy             | Professeur | En poste                                |
| 9. | NANA NBENDJO Blaise             | Professeur | En poste                                |

|     |                               |            |  |
|-----|-------------------------------|------------|--|
| 10. | NDJAKA Jean Marie<br>Bienvenu | Professeur | <i>Chef de Département</i>             |
| 11. | NJANDJOCK NOUCK<br>Philippe   | Professeur | En poste                               |
| 12. | NOUAYOU Robert                | Professeur | En poste                               |
| 13. | SAIDOU                        | Professeur | <i>Chef de<br/>centre/IRGM/MINRESI</i> |
| 14. | SIMO Elie                     | Professeur | En poste                               |
| 15. | TABOD Charles TABOD           | Professeur | <i>Doyen FSUniv/Bda</i>                |
| 16. | TCHAWOUA Clément              | Professeur | En poste                               |
| 17. | WOAFO Paul                    | Professeur | En poste                               |
| 18. | ZEKENG Serge Sylvain          | Professeur | En poste                               |

|     |                                      |                          |  |
|-----|--------------------------------------|--------------------------|--|
| 19. | ENYEGUE A NYAM épouse<br>BELINGA     | Maître de<br>Conférences | <i>Chef de Division de la<br/>formation continue et à<br/>distance/ENSPY</i> |
| 20. | FEWO Serge Ibraïd                    | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 21. | FOUEJIO David                        | Maître de<br>Conférences | <i>Chef Cell/ MINADER</i>  |
| 22. | MBINACK Clément                      | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 23. | MBONO SAMBA Yves<br>Christian U.     | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 24. | MELI'I Joelle Larissa                | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 25. | MVOGO ALAIN                          | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 26. | NDOP Joseph                          | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 27. | SIEWE SIEWE Martin                   | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 28. | VONDOU Derbetini<br>Appolinaire      | Maître de<br>Conférences | En poste   |
| 29. | WAKATA née BEYA Annie<br>Sylvie      | Maître de<br>Conférences | <i>Directeur/ENS/UIYI</i>  |
| 30. | WOULACHE Rosalie Laure               | Maître de<br>Conférences | <i>En stage depuis février 2023</i>  |
| 31. | ABDOURAHIMI                          | Chargé de Cours          | En poste   |
| 32. | AYISSI EYEBE Guy<br>François Valérie | Chargé de Cours          | En poste   |
| 33. | CHAMANI Roméo                        | Chargé de Cours          | En poste   |
| 34. | DJOTANG TCHOTCHOU<br>Lucie Angennes  | Chargée de Cours         | En poste   |
| 35. | EDONGUE HERVAIS                      | Chargé de Cours          | En poste   |
| 36. | KAMENI NEMATCHOUA<br>Modeste         | Chargé de Cours          | En poste   |
| 37. | LAMARA Maurice                       | Chargé de Cours          | En poste   |

|     |                             |                 |  |
|-----|-----------------------------|-----------------|--|
| 38. | NGA ONGODO Dieudonné        | Chargé de Cours | En poste   |
| 39. | OTTOU ABE Martin<br>Thierry | Chargé de Cours | <i>Directeur Unité de<br/>production des<br/>réactifs/IMPM</i> |
| 40. | TEYOU NGOUPO Ariel          | Chargé de Cours | En poste   |
| 41. | WANDJI NYAMSI William       | Chargé de Cours | En poste   |
| 42. | SOUFFO TAGUEU Merimé        | Assistant       | En poste   |

### 11- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (43)

|     |                              |            |   |
|-----|------------------------------|------------|---|
| 1.  | BITOM Dieudonné-Lucien       | Professeur | <i>Doyen / FASA /Uds</i>                |
| 2.  | EKOMANE Emile                | Professeur | <i>Chef Div./Uté Ebolowa</i>            |
| 3.  | GANNO Sylvestre              | Professeur | En poste                                |
| 4.  | NDAM NGOUPAYOU<br>Jules-Remy | Professeur | En poste                                |
| 5.  | NDJIGUI Paul-Désiré          | Professeur | <i>Chef de Département</i>              |
| 6.  | NGOS III Simon               | Professeur | En poste                                |
| 7.  | NKOUMBOU Charles             | Professeur | En poste                                |
| 8.  | NZENTI Jean-Paul             | Professeur | En poste                                |
| 9.  | ONANA Vincent Laurent        | Professeur | <i>Chef de Département/Uté.<br/>Eb.</i> |
| 10. | YENE ATANGANA<br>Joseph Q.   | Professeur | <i>Chef Div. /MINTP</i>                 |

|     |                                      |                       |                                  |
|-----|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 11. | BISSO Dieudonné                      | Maître de Conférences | En poste                         |
| 12. | Elisé SABABA                         | Maitre de Conférences | En poste                         |
| 13. | EYONG John TAKEM                     | Maître de Conférences | En poste                         |
| 14. | FUH Calistus Gentry                  | Maître de Conférences | <i>Sec. D'Etat/MINMIDT(ai)</i>   |
| 15. | GHOGOMU Richard<br>TANWI             | Maître de Conférences | <i>Chef de Div. /Uté Bertoua</i> |
| 16. | MBIDA YEM                            | Maitre de Conférences | En poste                         |
| 17. | MBESSE Cécile Olive                  | Maitre de Conférences | En poste                         |
| 18. | METANG Victor                        | Maître de Conférences | En poste                         |
| 19. | MOUNDI Amidou                        | Maître de Conférences | <i>CT/MINIMDT</i>                |
| 20. | NGO BIDJECK Louise<br>Marie          | Maître de Conférences | En poste                         |
| 21. | NGUEUTCHOUA Gabriel                  | Maître de Conférences | <i>CEA/MINRESI</i>               |
| 22. | NJILAH Isaac KONFOR                  | Maître de Conférences | En poste                         |
| 23. | NYECK Bruno                          | Maître de Conférences | En poste                         |
| 24. | TCHAKOUNTE Jacqueline<br>épse NUMBEM | Maître de Conférences | <i>Chef. Cell /MINRESI</i>       |
| 25. | TCHOUANKOUE Jean-<br>Pierre          | Maître de Conférences | En poste                         |

|     |                    |                       |          |
|-----|--------------------|-----------------------|----------|
| 26. | TEMGA Jean Pierre  | Maître de Conférences | En poste |
| 27. | ZO'O ZAME Philémon | Maître de Conférences | DG/ART   |

|     |   |                  |                              |
|-----|---|------------------|------------------------------|
| 28. | ANABA ONANA Achille<br>Basile                     | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 29. | BEKOA Etienne                                     | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 30. | ESSONO Jean                                       | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 31. | MAMDEM TAMTO<br>Lionelle Estelle, épouse<br>BITOM | Chargée de Cours | En poste                     |
| 32. | MINYEM Dieudonné                                  | Chargé de Cours  | <i>Chef Serv./Uté Maroua</i> |
| 33. | NGO BELNOUN Rose<br>Noël                          | Chargée de Cours | En poste                     |
| 34. | NGO'O ZE ARNAUD                                   | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 35. | NOMO NEGUE Emmanuel                               | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 36. | NTSAMA ATANGANA<br>Jacqueline                     | Chargée de Cours | En poste                     |
| 37. | TCHAPTCHET TCHATO<br>De P.                        | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 38. | TEHNA Nathanaël                                   | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 39. | FEUMBA Roger                                      | Chargé de Cours  | En poste                     |
| 40. | MBANGA NYOBE Jules                                | Chargé de Cours  | En poste                     |

|     |   |            |          |
|-----|---|------------|----------|
| 41. | KOAH NA LEBOGO Serge<br>P.                            | Assistant  | En poste |
| 42. | NGO'O ZE ARNAUD                                       | Assistant  | En poste |
| 43. | TENE DJOUKAM Joëlle<br>Flore, épouse KOUANKAP<br>NONO | Assistante | En poste |

**Répartition chiffrée des Enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I**

| <b>NOMBRE D'ENSEIGNANTS</b> |                    |                               |                         |                   |                 |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|
| <b>DÉPARTEMENT</b>          | <b>Professeurs</b> | <b>Maîtres de Conférences</b> | <b>Chargés de Cours</b> | <b>Assistants</b> | <b>Total</b>    |
| BCH                         | 8 (01)             | 20 (12)                       | 9 (04)                  | 6 (05)            | <b>43 (22)</b>  |
| BPA                         | 11 (01)            | 19 (09)                       | 16 (05)                 | 3 (02)            | <b>49 (17)</b>  |
| BPV                         | 6 (01)             | 10 (02)                       | 14 (08)                 | 2 (00)            | <b>32 (11)</b>  |
| CI                          | 7 (01)             | 14 (04)                       | 5 (01)                  | 1 (00)            | <b>27 (06)</b>  |
| CO                          | 7 (01)             | 15 (05)                       | 11 (05)                 | 1 (00)            | <b>34 (11)</b>  |
| ER                          | 1 (00)             |                               | /                       | /                 | <b>1 (0)</b>    |
| IN                          | 2 (00)             | 2 (00)                        | 14 (01)                 | 4 (00)            | <b>22 (01)</b>  |
| MAT                         | 1 (00)             | 8 (00)                        | 19 (02)                 | 5 (01)            | <b>33 (03)</b>  |
| MIB                         | 3 (01)             | 7 (03)                        | 9 (05)                  | 5 (02)            | <b>24 (11)</b>  |
| PHY                         | 18 (01)            | 12 (04)                       | 11 (01)                 | 1 (00)            | <b>42 (06)</b>  |
| ST                          | 10 (00)            | 17 (03)                       | 13 (03)                 | 3 (01)            | <b>43 (07)</b>  |
| <b>Total</b>                | <b>74 (07)</b>     | <b>124 (42)</b>               | <b>121 (35)</b>         | <b>31 (11)</b>    | <b>350 (95)</b> |

Soit un total de

**350 (95)** dont :

- Professeurs **74 (07)**
- Maîtres de Conférences **124 (42)**
- Chargés de Cours **121 (35)**
- Assistants **31 (11)**

( ) = Nombre de Femmes

**95**

# DEDICACE

*Je dédie ce travail :*

*A mon papa feu Monsieur KAMSEU Paul, et maman  
DJUIDJEU pour tous les sacrifices consentis à mon égard  
depuis mon tendre enfance jusqu'à nos jours.*

# REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail n'aurait été possible sans l'effort conjugué de plusieurs personnes qui malgré leurs occupations, ont bien voulu m'accompagner dans cette lourde tâche.

- Un spécial remerciement à Madame le Ministre de la Recherche Scientifique et de l'Innovation (MINRESI) Dr Madeleine TCHUINTE pour le soutien au quotidien ainsi que la facilitation pour l'obtention des 25 bourses de mobilités (SCAC) de l'ambassade de France au Cameroun.
- Ma gratitude va à l'endroit du Professeur Julius NDI NSAMI, Chef de Département pour ses nombreux conseils et encouragements et pour toute l'attention qu'il a apportée à résoudre certains de mes problèmes académiques. Pour toute la confiance qu'il a mise en moi pour me confier des enseignements en tant qu'enseignant vacataire.
- J'exprime toute ma reconnaissance au Professeur Samuel LAMINSI, directeur de ce mémoire, pour toutes les qualités humaines et scientifiques dont il a fait preuve durant tout mon séjour en thèse : ses conseils, sa constante disponibilité et ses encouragements permanents.
- Je remercie le Professeur Joseph FOVO DJEUGAP, pour tout l'appui logistique qu'il nous a offert durant notre stage pour mener à bien les travaux dans le domaine Agronomique au sein du Laboratoire de Phytopathologie de l'Université de Dschang. Durant l'évolution de ce travail, ses compétences scientifiques, son souci de clarté, de rigueur et de précision ainsi que son expérience pratique m'ont été très profitables.
- Mes remerciements vont également au Professeur Georges KAMGANG YOUNBI, pour m'avoir facilité la compréhension des phénomènes chimiques en phase plasma et pour sa forte implication dans le travail de fond pour sa bonne compréhension, son soutien moral et son entière disponibilité doublée de travail bien fait.
- Je remercie tous les membres du jury pour avoir examiné mon manuscrit en l'occurrence le président du jury professeur Antoine ELIMBI et les professeurs Justin NENWA, Joseph SIELIECHI et Georges KAMGANG YOUNBI.
- Toute ma gratitude s'adresse au Secrétaire Général Adjoint des Services du Premier Ministre Professeur Pascal NGUIHE KANTE pour ses conseils, soutiens et encouragements au quotidien.
- Je remercie le Professeur Thierry Dufour, Dr Manon Soulier et M Korentin Geraud pour l'accueil scientifique au Laboratoire de Physique des Plasmas (UMR7648) de l'Université de Sorbonne.
- Je remercie le Directeur Général de l'Institut de Recherche Agricole pour le

Développement (IRAD) Dr Noé WOIN parce qu'il a bien voulu m'accorder l'opportunité de faire ce travail dans sa structure.

- Mes remerciements vont également à l'endroit de mon Chef de Division Dr Hortense MAFOUASSON ainsi qu'à tous mes collègues de la Station Polyvalente de Recherche Agricole de Dschang (SPRAD) pour la facilitation de l'accès à la documentation, pour leurs disponibilités permanentes et leurs multiples conseils qui m'ont été d'une aide précieuse au cours de ce travail.
- Mes remerciements vont également au Dr Elie KAMSEU pour m'avoir aidé à faire les Analyses Microscopiques au Département d'Ingénierie "Enzo Ferrari" en Italie. À tous les aînés du Laboratoire notamment, Professeur Elie ACAYANKA, Dr Serge DJEPANG, Dr Serge NZALI, Dr berthelot SOP. Leurs disponibilités, leurs multiples conseils ainsi que leurs documents mon été d'une aide capitale.
- Je voudrais remercier tous mes camarades de laboratoire et promotion en particulier Dr Blondel NDIFFO, Dr Claude MBAFOU, Mme Suzie VOUFO, Mme Audrey TSAPI, Mme Marie TEBU, M Rollin DAYAM pour esprit d'équipe qui n'a cessé de régner au cours de notre promotion.
- Ma reconnaissance s'adresse à la famille MA'A MOGO et particulièrement à M Jean FOTSO pour tous les efforts et sacrifices consentis en mon égard.
- Je pense également à tous mes amis commerçants des marchés MOKOLO, CENTRAL et 8<sup>ème</sup> pour leurs encouragements et leurs sympathies.
- Ce travail m'offre l'occasion d'exprimer ma gratitude à ma belle-famille et à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu tout au long de ma formation. Que tous daignent trouver ici l'expression de ma sincère reconnaissance.
- À tous mes amis, qu'ils reçoivent de moi l'expression de ma profonde gratitude particulièrement à Mme Agrippine KOUNA, Mme Nina TASSI, M Arsène TANKOUA, M Cyril NKOUAKAP, Mme Albertine NSANGOU, Mme Nathalie TIAM.
- Un merci chaleureux à l'endroit de ma tendre épouse METANMO Carole ainsi qu'à tous mes frères et sœurs qui ont su chacun à leur façon me soutenir et m'encourager pendant la réalisation de ce mémoire de thèse de Doctorat/Ph.D.
- À tous ceux dont j'ai involontairement omis les noms, qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de cette thèse, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde estime.

# TABLE DES MATIERES

|  |               |
|--|---------------|
| <b>DEDICACE</b> .....  | <b>xvii</b>   |
| <b>REMERCIEMENTS</b> .....   | <b>xix</b>    |
| <b>TABLE DES MATIERES</b> .....  | <b>xxii</b>   |
| <b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....  | <b>xxviii</b> |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....  | <b>xxx</b>    |
| <b>LISTE DES FIGURES</b> .....   | <b>xxxii</b>  |
| <b>RESUME</b> .....  | <b>xxxv</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>xxxvii</b> |
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....   | <b>1</b>      |
| <b>CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE</b> .....  | <b>5</b>      |
| <b>I.1.Généralités sur les plasmas</b> .....   | <b>6</b>      |
| I.1.1. Origine et définition .....   | 6             |
| I.1.2. Obtention des plasmas .....   | 6             |
| I.1.3. Différents types de plasma.....   | 7             |
| I.1.3.1. Plasmas froids ou non thermiques .....  | 7             |
| I.1.3.2. Plasmas chauds ou plasmas thermiques .....                                      | 9             |
| I.1.3.3. Plasmas tièdes : l'éffluage électrique.....                                     | 10            |
| <b>I.2.Quelques propriétés des plasmas</b> .....   | <b>10</b>     |
| I.2.1. Propriétés électriques principales.....   | 10            |
| I.2.2. Propriétés physico-chimiques .....  | 11            |
| I.2.3. Principales interactions en phase plasma.....                                     | 13            |
| I.2.4. Composition chimique pour le plasma glidarc .....                                 | 14            |
| <b>I.3. Propriétés induites par les espèces créées dans le plasma d'air humide</b> ..... | <b>16</b>     |
| I.3.1. Propriétés oxydantes.....   | 16            |
| I.3.2. Propriétés acidifiantes.....  | 16            |
| I.3.3. Propriétés complexantes .....   | 16            |
| I.3.4. Propriétés radicalaires.....  | 17            |
| I.3.5. Définition de la post-décharge .....  | 19            |
| I.3.6. Eau activée par plasma Glidarc .....  | 20            |
| I.3.7. Sources des espèces générées dans l'eau activée par plasma Glidarc .....          | 20            |

|   |           |
|---|-----------|
| I.3.8. Propriétés physiques et chimiques de l'eau activée par plasma.....                                 | 22        |
| <b>I.4. Applications du plasma en agriculture .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>I.5. Généralités sur le maïs.....</b>  | <b>25</b> |
| I.5.1. Origine .....  | 25        |
| I.5.2. Botanique .....  | 25        |
| I.5.3. Différentes phases du cycle du maïs .....  | 27        |
| I.5.4. Exigences écologiques.....   | 29        |
| I.5.5. Conditions climatiques .....   | 29        |
| I.5.6. Conditions édaphiques.....   | 30        |
| I.5.7. Exigences nutritionnelles du maïs.....   | 30        |
| I.5.7.1. Exigences du maïs en azote.....  | 30        |
| I.5.7.2. Exigence du maïs en phosphore .....  | 31        |
| I.5.7.3. Exigence du maïs en Potassium.....   | 31        |
| I.5.8. Culture du maïs .....  | 31        |
| I.5.9. Contraintes de production du maïs.....   | 33        |
| I.5.10. Problèmes de sécheresse .....   | 33        |
| I.5.11. Baisse de fertilité du sol.....   | 34        |
| I.5.12. Acidité du sol .....  | 35        |
| I.5.13. Striga.....   | 35        |
| I.5.14. Maladies et les ravageurs du maïs .....   | 36        |
| I.5.14.1. Maladies du maïs .....  | 36        |
| I.5.14.2. Maladies fongiques .....  | 36        |
| I.5.14.3. Maladies bactériennes .....   | 37        |
| I.5.14.4. Viroses du maïs.....  | 37        |
| I.5.14.5. Ravageurs du maïs .....   | 37        |
| <b>I.6. Insecticides de synthèse et produits biologiques pour le traitement des semences de maïs.....</b> | <b>38</b> |
| I.6.1. Insecticides de synthèse pour le traitement des semences de maïs. ....                             | 38        |
| I.6.2. Produits biologiques pour le traitement des semences de maïs. ....                                 | 39        |
| I.6.2.1. Plantes aromatiques.....   | 39        |
| I.6.2.2. Utilisation de la cendre.....  | 40        |
| I.6.2.3. Poudres des plantes insecticides .....   | 40        |
| I.6.2.4. Huiles essentielles.....   | 41        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES .....</b>                         | <b>42</b> |
| <b>II.1. Matériel utilisé.....</b>   | <b>43</b> |
| II.1.1. Matériel Végétal.....  | 43        |
| II.1.2. Caractéristique de la variété de maïs.....                                     | 44        |
| II.1.3. Description de la zone d'étude.....  | 45        |
| II.1.3.1. Localisation .....   | 45        |
| II.1.3.2. Précipitations .....   | 46        |
| II.1.4. Réacteur glidarc .....   | 46        |
| II.1.5. Traitement des semences de maïs au plasma glidarc .....                        | 47        |
| II.1.6. Dispositif à plasma glidarc et procédure de traitement direct .....            | 48        |
| II.1.7. Dispositif à plasma glidarc et procédure de traitement indirect .....          | 49        |
| <b>II.2. Méthodes .....</b>  | <b>50</b> |
| II.2.1. Dispositif expérimental de l'essai en champs.....                              | 50        |
| II.2.2. Méthodes de caractérisation, d'analyse et de traitement au plasma glidarc..... | 52        |
| II.2.3. Spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (FTIR) .....                  | 52        |
| II.2.4. Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....                                 | 53        |
| II.2.5. Test d'absorption d'eau.....   | 55        |
| II.2.6. Test de pathogénicité.....   | 55        |
| II.2.7. Test de germination.....   | 56        |
| II.2.8. Analyse de la couleur des graines .....  | 56        |
| II.2.9. pH-métrie.....   | 57        |
| II.2.10. Conductivité et sels totaux dissous .....                                     | 57        |
| II.2.11. Détermination de la concentration des ions nitrates .....                     | 57        |
| II.2.12. Détermination de la concentration du Peroxyde d'hydrogène.....                | 58        |
| II.2.13. Détermination de la hauteur des plants .....                                  | 58        |
| II.2.14. Détermination de la largeur des feuilles.....                                 | 59        |
| II.2.15. Détermination du diamètre au collet .....                                     | 59        |
| II.2.16. Détermination de la teneur en chlorophylle des feuilles .....                 | 59        |
| II.2.17. Rendement .....   | 59        |
| <b>II.3. Analyses de sol du site expérimental .....</b>                                | <b>60</b> |
| II.3.1. Méthodes d'analyse des substrats .....   | 60        |
| II.3.2. Granulométrie .....  | 60        |
| II.3.3. Acidité .....  | 60        |

|   |           |
|---|-----------|
| II.3.4. La matière organique et le carbone organique.....   | 61        |
| II.3.5. Azote total.....  | 62        |
| II.3.6. Bases échangeables et capacité d'échange cationique .....                                       | 63        |
| II.3.7. Phosphore assimilable par la méthode de Bray II.....  | 64        |
| <b>Conclusion .....</b>   | <b>65</b> |
| <b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>   | <b>66</b> |
| <b>Introduction .....</b>   | <b>67</b> |
| <b>III.1. Résultats des analyses de sol du site expérimental .....</b>                                  | <b>67</b> |
| <b>III.2. Effets de l'eau activée sur les paramètres physico-chimiques.....</b>                         | <b>69</b> |
| III.2.1. Potentiel d'hydrogène (pH).....  | 69        |
| III.2.2. Conductivité et Solides Totaux Dissous (STD).....  | 71        |
| III.2.3. Nitrates et quantité d'azote contenu dans les nitrates .....                                   | 72        |
| III.2.4. Peroxyde d'hydrogène (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....                                     | 73        |
| <b>III.3. Effets de l'eau activée par plasma sur les paramètres de biomasse en champs .75</b>           |           |
| III.3.1. Taux de germination en champs en fonction du temps de traitement .....                         | 75        |
| III.3.2. Longueur de la tige en champs en fonction du temps de traitement.....                          | 76        |
| III.3.3. Largeur des feuilles aux champs en fonction du temps de traitement .....                       | 77        |
| III.3.4. Diamètre au collet en champs en fonction du temps de traitement .....                          | 78        |
| III.3.5. Teneur en chlorophylle en champs .....   | 79        |
| III.3.6. Effet du traitement plasma sur le rendement du maïs en champs .....                            | 79        |
| <b>III.4. Caractérisation de la surface des graines de maïs traitées en post décharge spatiale</b>      |           |
| <b>.....82</b>  |           |
| III.4.1. Changement de couleur à la surface de la graine après un traitement au plasma<br>glidarc ..... | 82        |
| III.4.2. Analyse IR des graines de maïs. ....   | 83        |
| III.4.3. Analyse de la MEB sur les graines de maïs .....  | 84        |
| <b>III.5. Analyse des agents pathogènes sur les graines de maïs.....</b>                                | <b>87</b> |
| <b>III.6. Effet du plasma sur l'absorption d'eau.....</b>   | <b>90</b> |
| <b>III.7. Amélioration de la germination .....</b>  | <b>92</b> |
| <b>III.8. Evaluation du bilan et coût énergétique de traitement .....</b>                               | <b>95</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>                               | <b>100</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>                                       | <b>102</b> |
| <b>ANNEXES .....</b>   | <b>128</b> |
| <b>Annexe 1 : Appareils utilisés.....</b>                                      | <b>129</b> |
| <b>Annexe 2: Données des résultats obtenus.....</b>                            | <b>133</b> |
| <b>Annexe 3 : Conférences, Formations et Communications Scientifiques.....</b> | <b>135</b> |
| <b>PUBLICATIONS ISSUES DE LA THÈSE.....</b>                                    | <b>136</b> |

# LISTE DES ABREVIATIONS

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>ATP-SR-Y</b> | : Acid Tolerance Population Streak Resistant Yellow                   |
| <b>DBD</b>      | : Décharge à Barrière Diélectrique                                    |
| <b>DCSBD</b>    | : Diffuse Coplanar Surface Barrier Discharge.                         |
| <b>DDP</b>      | : Différence De Potentiel   |
| <b>GAPAW</b>    | : Gliding Arc Plasma Activated Water.                                 |
| <b>GLIDARC</b>  | : Gliding arc discharge   |
| <b>EAP</b>      | : Eau activée par plasma  |
| <b>JAS</b>      | : Jour Après Semi   |
| <b>ONUAA</b>    | : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| <b>PAW</b>      | : Plasma Activated Water  |
| <b>PDS</b>      | : Post-Décharge Spatiale  |
| <b>pH</b>       | : Potentiel d'Hydrogène   |
| <b>POA</b>      | : Procédé d'Oxydation Avancée   |
| <b>RNS</b>      | : Reactive Nitrogen Species   |
| <b>ROS</b>      | : Reactive Oxygen Species   |
| <b>STD</b>      | : Solides Totaux Dissous  |
| <b>Te</b>       | : Température des électrons   |
| <b>Tg</b>       | : Température des gaz   |

# LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| <i>Tableau I</i> : Principaux types de réactions intervenants en phase plasma.....   | 14 |
| <i>Tableau II</i> : Espèces chimiques présentes dans le plasma d'air humide .....  | 18 |
| <i>Tableau III</i> : Quelques exemples de la littérature des systèmes plasma pouvant être utilisés pour la production d'eau activée par plasma. ....     | 21 |
| <i>Tableau IV</i> : Réactions chimiques ayant lieu pendant la génération de PAW entraînant la formation de ROS et RONS.....                              | 22 |
| <i>Tableau V</i> : Quelques exemples de la littérature sur les applications du plasma en agriculture. ....   | 24 |
| <i>Tableau VI</i> : Composition chimique approximative (%) des principales parties du maïs. ....   | 44 |
| <i>Tableau VII</i> : Caractéristiques de la variété couramment cultivée dans la région de l'Ouest Cameroun.....  | 44 |
| <i>Tableau VIII</i> : Appréciation de l'acidité du sol.....  | 61 |
| <i>Tableau IX</i> : Appréciation du taux de la matière organique.....  | 61 |
| <i>Tableau X</i> : Appréciation de la qualité de la matière organique.....   | 62 |
| <i>Tableau XI</i> : Appréciation du taux d'azote total (N).....  | 62 |
| <i>Tableau XII</i> : Norme d'appréciation de la teneur du sol en bases échangeables.....   | 63 |
| <i>Tableau XIII</i> : Appréciation de la teneur en phosphore assimilable. ....   | 64 |
| <i>Tableau XIV</i> : Caractéristiques chimiques du sol avant la mise en place de l'essai. ....   | 68 |
| <i>Tableau XV</i> : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau du robinet avant et après traitement au plasma Glidarc. ....                       | 70 |
| <i>Tableau XVI</i> : Rendement moyen du maïs issu de la parcelle arrosée et non arrosée à l'eau activée par plasma. ....                                 | 80 |
| <i>Tableau XVII</i> : Estimation du coût de production d'engrais azoté ainsi que du taux d'infection des champignons du maïs par plasma glidarc.....     | 97 |
| <i>Tableau XVIII</i> : Compte d'exploitation de la production des semences de maïs avec et sans technologie plasma Glidarc sur une surface de 1 ha ..... | 98 |

# LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure 1</i> : Dispositif expérimental de production d'un plasma .....   | 6  |
| <i>Figure 2</i> : Température des espèces lourdes et des électrons en fonction de la pression.....  | 7  |
| <i>Figure 3</i> : Plasma de type arc glissant.....  | 9  |
| <i>Figure 4</i> : Propriétés de la décharge électrique glissante dans l'air humide. ....  | 19 |
| <i>Figure 5</i> : Photographie montrant la diversité des épis de maïs. ....   | 26 |
| <i>Figure 6</i> : Présentation de la morphologie aérienne d'un plant de Zea Mays en fin de croissance.<br>.....                               | 27 |
| <i>Figure 7</i> : Les différentes phases du développement d'un plant de maïs.....   | 29 |
| <i>Figure 8</i> : Photographie de la variété de maïs couramment cultivée dans la région de l'Ouest<br>Cameroun. ....                          | 45 |
| <i>Figure 9</i> : Carte de localisation du site d'étude. ....   | 46 |
| <i>Figure 10</i> : Diagramme ombrothermique durant l'essai .....  | 46 |
| <i>Figure 11</i> : Schéma du réacteur de première génération, DDP = 10 kV, I=160 mA distance inter-<br>électrode d =2.5 cm. ....              | 47 |
| <i>Figure 12</i> : Schéma simplifié d'un réacteur à plasma glissant pour la production des engrais<br>azotés (post décharge temporelle). .... | 48 |
| <i>Figure 13</i> : Dispositif à plasma glidarc et procédure de traitement des semences de maïs (post<br>décharge spatiale).....               | 49 |
| <i>Figure 14</i> : Dispositif expérimental en bloc complet randomisé.....   | 51 |
| <i>Figure 15</i> : Dispositif expérimental sur une superficie de 64,4 m <sup>2</sup> (mètres carrés) .....                                    | 52 |
| <i>Figure 16</i> : Evolution du pH en fonction du temps de traitement .....   | 70 |
| <i>Figure 17</i> : Evolution de la Conductivité et des STD en fonction du temps de traitement.....  | 72 |
| <i>Figure 18</i> : Évolution des ions nitrates en fonction du temps de traitement. ....   | 73 |
| <i>Figure 19</i> : Evolution du peroxyde d'hydrogène en fonction du temps de traitement .....   | 74 |
| <i>Figure 20</i> : Taux de germination des graines en champs en fonction du temps de traitement. 75   |    |
| <i>Figure 21</i> : Variation de la longueur des tiges en champs en fonction du temps de traitement.<br>.....                                  | 76 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure 22</i> : Variation de la largeur des feuilles en champs en fonction du temps de traitement.<br>.....  | 78 |
| <i>Figure 23</i> : Variation du diamètre au collet en champs en fonction du temps de traitement...78  |    |
| <i>Figure 24</i> : Variation du taux de chlorophylle en champs en fonction du temps de traitement<br>.....  | 79 |
| <i>Figure 25</i> : Changement de couleur à la surface de la graine après un traitement au plasma<br>glidarc de 900 s. ....  | 83 |
| <i>Figure 26</i> : Analyse IRTF des graines de maïs.....  | 84 |
| <i>Figure 27</i> : Images SEM des graines traitées pendant 300s et des graines non traitées en mode<br>post décharge spatiale .....   | 85 |
| <i>Figure 28</i> : Images SEM des graines traitées pendant 900s et des graines non traitées en mode<br>post décharge spatiale .....   | 86 |
| <i>Figure 29</i> : Images SEM des graines traitées pendant 900s et des graines non traitées en mode<br>post décharge temporelle .....   | 86 |
| <i>Figure 30</i> : Images SEM des graines traitées pendant 300s et des graines non traitées en mode<br>post décharge temporelle .....   | 87 |
| <i>Figure 31</i> : Images du développement des pathogènes sur les graines non traitées (a) comparées<br>aux graines traitées au plasma 300 s (b). ....                          | 88 |
| <i>Figure 32</i> : Degré d'infection des graines non traitées et des graines traitées au plasma pendant<br>300 et 900 s. ....   | 89 |
| <i>Figure 33</i> : Absorption d'eau à 25 °C pour les semences de maïs traitées au plasma Glidarc (300<br>et 900s) et les semences de maïs témoin non traitées (référence). .... | 91 |
| <i>Figure 34</i> : Effet du traitement au plasma sur la croissance des semis : (a) longueur de la pousse<br>et (b) longueur de la racine. ....                                  | 92 |
| <i>Figure 35</i> : Résumé des réactions qui ont lieu entre la graine et le plasma. ....   | 95 |

# RESUME

La décharge électrique d'arc glissant (Glidarc) génère un plasma non thermique à pression atmosphérique. Une solution d'eau exposée au plasma est appelée eau activée par plasma (EAP) est utilisée dans cette étude pour l'amélioration des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, STD,  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2]$ ) et de biomasse en champs. Chemin faisant, les graines de maïs de variété ATP (Acide Tolérance Population) ont été semées sur une superficie de 64,4 m<sup>2</sup> ensuite arrosées avec de l'eau du robinet et l'eau activée par plasma pendant 300 et 900 secondes. La longueur et la largeur des feuilles, le diamètre du collet, la teneur en chlorophylle et les paramètres physico-chimiques ont des valeurs plus élevées sur les plantes arrosées avec l'EAP à 300 s et 900 s par rapport aux témoins. Nous avons ainsi mis en évidence les propriétés acidifiantes que possède l'eau activée résultant de la présence du radical  $\text{NO}\bullet$  dans la décharge qui au contact de l'air conduit à la formation successive des nitrites puis à celle des ions nitreux et nitriques en solution. Par la suite nous avons étudié l'effet du plasma Glidarc d'air humide en mode post décharge spatiale (transfert de gaz) sur les graines de maïs en étudiant la germination précoce et l'effet sur les agents pathogènes du maïs potentiellement nocifs. À première vue, la surface des semences traitées pendant 900 s a changé de couleur et est devenue plus foncée que celle des semences témoins. L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) n'a montré aucun changement pour les graines traitées à 300 s, mais des changements significatifs pour une exposition plus élevée (900 s) révélés par la modification de la surface gravée/érodée du caryopse de l'amidon, ce qui a entraîné des trous d'eau et de grands canaux. Le test de pathogénicité par l'infection fongique a conduit à un degré de 58% pour les semences non traitées, 6,7% et 13,3% pour les semences traitées pendant 300 et 900 s respectivement, soit une réduction importante de la charge fongique lorsque les semences ont été prétraitées. Ensuite, le taux de germination et les paramètres de croissance précoce ont été évalués. Les résultats ont montré que dans des conditions de laboratoire, ces paramètres ont augmenté de 4,6 à 17,4% pour le taux de germination, de 5,8 à 36,7% pour la longueur des pousses et de 1 à 12,9% pour la longueur des racines. En outre, la spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier (IRTF) n'a montré aucun changement dans les liaisons entre les atomes après le traitement par plasma, mais a révélé une activation de surface due à l'élimination des lipides. Cette application pourrait contribuer à la lutte contre l'insécurité alimentaire au Cameroun et dans le monde en améliorant la qualité sanitaire de la semence sans additifs chimiques.

Mots clés : Plasma de type arc glissant (Glidarc), semences de maïs, inhibition, germination, champignons.

# ABSTRACT

The gliding arc discharge (Glidarc) generates a non-thermal plasma at atmospheric pressure. A water solution exposed to the plasma is plasma activated water (PAW) and used in this work for the improvement of physico-chemical (pH, conductivity, STD,  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2]$ ) and biomass parameters in the field. In the process, maize seeds of the ATP (Acid Tolerance Population) variety were sown on an area of 64.4 m<sup>2</sup> and then watered with tap water and plasma activated water for 300 and 900 seconds. Leaf width, crown diameter, chlorophyll content and physico-chemical parameters had higher values in plants watered with 300 s, 900 s of PAW compared to the control. We have highlighted the acidifying properties of activated water resulting from the presence of the NO• radical in the discharge which, when in contact with air, leads to the successive formation of nitrites and then nitrous and nitric ions in solution. We then studied the effect of the Glidarc plasma of humid air in spatial post-discharge mode (gas transfer) on the maize seeds by investigating early germination and the effect on potentially harmful maize pathogens. At first sight, the surface of the seeds treated for 900 s changed color and became darker than that of the control seeds. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis showed no change for seeds treated at 300 s, but significant changes for higher exposure (900 s) revealed by the change in the etched/eroded surface of the starch caryopsis, which resulted in water holes and large channels. The pathogenicity test by fungal infection led to a degree of 58% for untreated seeds, 6.7% and 13.3% for seeds treated for 300 and 900 s respectively, thus a significant reduction of the fungal load when the seeds were pre-treated. Next, germination rate and early growth parameters were evaluated. The results showed that under laboratory conditions, these parameters increased from 4.6 to 17.4% for germination rate, from 5.8 to 36.7% for shoot length and from 1 to 12.9% for root length. In addition, Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy showed no change in the bonding between atoms after plasma treatment, but revealed surface activation due to lipid removal. This application could contribute to the fight against food insecurity in Cameroon and worldwide by improving the sanitary quality of the seed without chemical additives.

**Key-words:** Plasma gliding arc (Glidarc), maize seeds, inhibition, germination, fungi.

# INTRODUCTION GENERALE

La nécessité d'améliorer la production et la qualité microbiologique des aliments, sans compromettre leurs caractéristiques nutritionnelles, fonctionnelles et sensorielles, a suscité un intérêt croissant pour les technologies innovantes dans l'industrie alimentaire. Le plasma non thermique de type Glidarc est une technologie de traitement verte émergente qui offre de nombreuses applications potentielles et répond au besoin de l'industrie (Mir et *al*, 2016). Cette technologie s'obtient en appliquant une différence de potentielle très élevée (5-10 kV) entre deux électrodes divergentes disposées symétriquement autour d'un jet gazeux d'air humide (Khadjia et *al* 2015). Au Cameroun, bien que le gouvernement ait mis sur pied une nouvelle politique agricole : « l'agriculture de seconde génération » impliquant la mécanisation, l'utilisation des intrants agricoles tels les pesticides, les produits agrochimiques pour augmenter les rendements, son utilisation reste limitée et rencontre plusieurs problèmes tels que le manque de société de développement et des organismes financiers, les conditions difficiles de fourniture du matériel agricole, la pollution environnementale et la santé de la plupart des êtres vivants, la résistance de nombreux insectes nuisibles aux pesticides, ce qui entraîne une utilisation accrue des concentrations par les agriculteurs.

Face à cette situation qui interpelle la communauté scientifique, nous proposons d'utiliser les procédés d'oxydation avancés (POAs) qui sont des techniques de traitement faisant intervenir la production in-situ des intermédiaires radicalaires très réactifs notamment les radicaux hydroxyles HO<sup>•</sup> et NO<sup>•</sup>. Parmi ces techniques développées actuellement, nous avons les procédés d'oxydation chimique en phase homogène et en phase hétérogène et les décharges électriques comme le plasma de type glidarc (Clarke et *al*, 1995). Le plasma glidarc est obtenu à température et à pression ambiante, il est de plus en plus utilisé en agriculture dans le but d'amélioration le rendement grâce aux propriétés acidifiantes qu'il possède. L'eau du robinet utilisée dans le cadre de cette thèse sera activée par plasma glidarc et va acquérir de nouvelles propriétés qui pourraient être très efficaces dans l'enrichissement d'une eau en éléments azotés tels que les nitrates dont ont besoin les plantes pour leur croissance (Dayonna et *al*, 2013).

Afin de mettre en œuvre des politiques de stockage physique moins coûteuses, efficaces et respectueuses de l'environnement pour épargner aux populations le risque de pénurie de semences améliorées pendant la contre-saison agricole, la technologie plasma offrirait de bonnes perspectives pour la conservation et la germination des semences (Randeniya et *al*, 2015). Le traitement au plasma des semences a été étudié avec succès pour son effet positif sur la germination et les paramètres de croissance de nombreuses cultures agricoles, y compris les céréales et les légumineuses (Sera et *al*, 2010 ; Bormashenko et *al*, 2012 ; Dobrin et *al*, 2015 ;

Ling et al, 2014 ; Sera et al, 2017). À notre connaissance, aucune étude sur les propriétés fertilisantes de l'eau activée par le plasma d'arc glissant ainsi que l'inhibition des champignons en post-décharge spatiale (transfert de gaz) sur les graines de maïs n'a été menée jusqu'à présent. Cette thèse de Doctorat / Ph.D développe le plasma non thermique dans le secteur agricole pour substituer les intrants par de l'eau activée par plasma et les gaz plasmagène afin d'améliorer la germination, le rendement ainsi que la conservation des graines. Cette technologie innovante présente les travaux sur la fertilisation des semences de maïs, le stockage par plasma d'arc électrique glissant respectivement en mode post-décharge temporelle et post décharge spatiale. Ce traitement par plasma en mode post-décharge temporelle fait référence à l'action de l'eau traitée après l'arrêt de la décharge, et les réactions continuent sans autre source d'énergie (Kamgang et al, 2007 ; Brisset et al, 2008). Par conséquent, la présente étude comprend l'analyse de la surface des graines de maïs par SEM et IR, l'analyse physico-chimique (pH, conductivité, STD,  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2]$ ), l'absorption d'eau, la mesure des paramètres de croissance (longueur de la tige, largeur des feuilles, diamètre au collet), les paramètres physiologiques (teneur en chlorophylle, couleur) et taux d'infection des échantillons traités en post décharge spatiale par rapport aux échantillons témoins.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la faisabilité de la technologie plasma glidarc pour l'amélioration de la germination et la conservation des semences de maïs en stockage. Plus spécifiquement il s'agira:

- D'étudier la formation des espèces azotées de longue durée de vie dans l'eau activée par plasma glidarc afin optimiser l'efficacité des paramètres physico-chimiques, la biomasse végétale ainsi que le rendement ;
- D'étudier l'effet du traitement des graines de maïs par plasma en mode post décharge spatiale(transfert de gaz) sur le taux d'infection.

Pour atteindre ces objectifs, dans la première phase, nous utilisons l'eau de robinet traitée par plasma (300 et 900 s) comme engrais pour l'arrosage des graines de maïs en champs afin d'évaluer les paramètres de biomasse végétal et le rendement.

Dans la seconde phase, nous soumettons les graines de maïs récoltées au traitement plasma glidarc (post décharge spatiale) à différents temps expositions (300 et 900 s) dans le but d'inhiber la croissance des champignons.

Cette thèse s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature et aborde de façon succincte quelques généralités sur les semences de maïs, l'eau activée par plasma glidarc, les applications du plasma en agriculture ;

Le second chapitre présente les matières premières utilisées, le matériel ainsi que les méthodes expérimentales ;

Le troisième chapitre est une présentation et une interprétation des résultats obtenus avec un accent particulier mis sur la caractérisation des graines traitées au plasma glidarc.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives vont clôturer le contenu de cette thèse.

# CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

## I.1. Généralités sur les plasmas

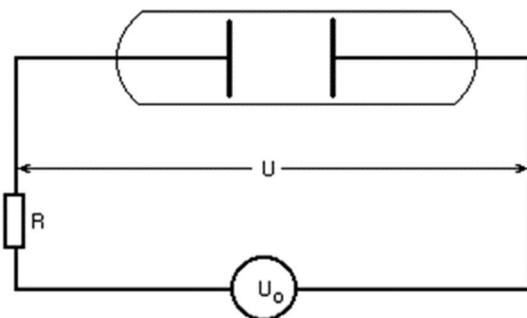
### I.1.1. Origine et définition

La classification scientifique des différents états de la matière est : solide, gazeux, liquide. En apportant de l'énergie à l'état gazeux, on se retrouve avec un nouvel état où existe un ensemble d'électrons, d'ions, de molécules et d'entités neutres dont le mouvement est dominé par l'interaction électromagnétique. Ce 4<sup>e</sup> état de la matière, identifié par le physicien Crookes en 1879 est aujourd'hui appelé état plasma (Kamgang et *al*, 2008). Ce nom apparaît pour la première fois en 1928, par le physicien américain Langmuir pour décrire la région centrale d'une décharge électrique (Depenyou et *al*, 2007). Dans la pratique on l'appelle aussi gaz ionisé, quel que soit le degré d'ionisation du gaz (Kamgang et *al*, 2008).

Le plasma peut donc se définir comme étant un milieu gazeux dont les espèces, atomes, molécules sont portées à des états excités et/ou ionisés. Les plasmas sont des milieux macroscopiquement neutres du point de vue électrique, partiellement ou totalement ionisés. Outre les électrons et les photons (particules légères), le plasma comporte un ensemble de particules « lourdes » neutres et ionisées (atomes, molécules, radicaux, ions) diversement excités ou pas (Doubla et *al*, 2002).

### I.1.2. Obtention des plasmas

Les plasmas sont obtenus entre autres au laboratoire à l'aide d'un système de décharge électrique. Ils résultent d'un transfert énergétique entre une source et un gaz, celui-ci étant souvent constitué par une décharge électrique (Djakaou et *al*, 2012). Le dispositif expérimental qui permet de créer un plasma est représenté par la figure 1.

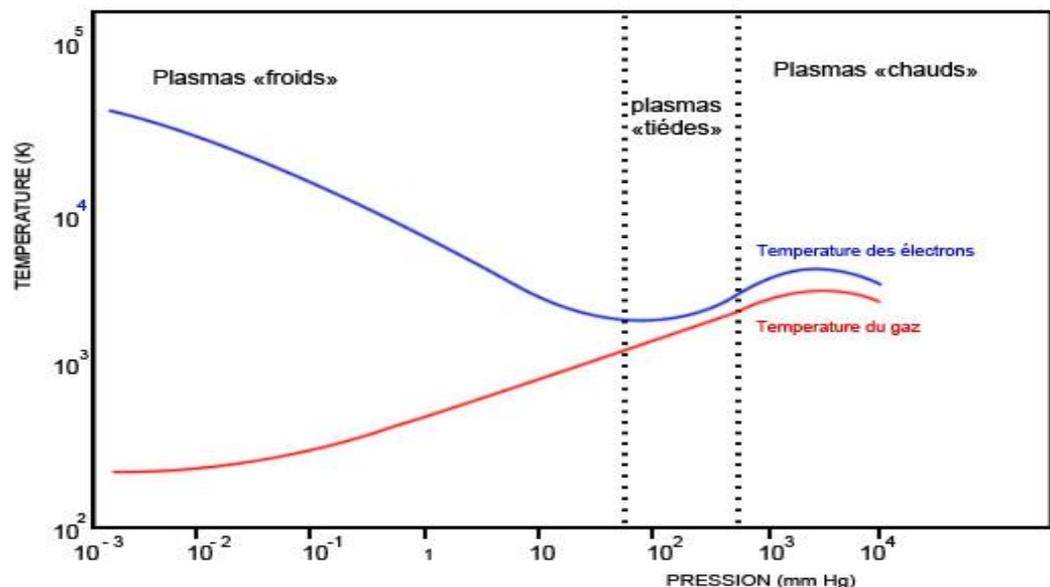


**Figure 1:** Dispositif expérimental de production d'un plasma (Doubla et *al*, 2008)

Le dispositif comporte une source d'alimentation de tension  $U_0$ , une résistance du circuit  $R$  et un tube rempli de gaz sous une pression  $P$ . Le tube est muni de deux électrodes métalliques entre lesquels une décharge électrique de courant  $I$  et de tension  $U$  peut se manifester sous l'action d'un champ électrique intense et pour des valeurs de courant électrique comprises entre  $10^{-15}$  et  $10^5$  A (Doubla et al, 2008).

### I.1.3. Différents types de plasma

La technologie des plasmas obtenue par décharge électrique est de plus en plus développée dans les domaines de la chimie, la métallurgie et la protection de l'environnement. En fonction de la température et de la pression nous distinguons les plasmas « froids », les plasmas « tièdes » et les plasmas « chauds » comme illustrés par la figure 2 (Khadija et al, 2015).



**Figure 2:**Température des espèces lourdes et des électrons en fonction de la pression (Khadija et al, 2015)

#### I.1.3.1. Plasmas froids ou non thermiques

Générés par un champ électrique, les plasmas non-thermiques sont établis à basse pression c'est à dire à une pression réduite ( $P < 10^{-1}$  atm). L'énergie (ou la température) des électrons y est largement supérieure à celle des espèces lourdes ( $T_e = 10^5-10^6$   $T_g = 10^2 - 10^3$ °k). La température très élevée des électrons leur permet d'interagir avec les autres particules du plasma leur conférant une réactivité. Ces plasmas faiblement ionisés ( $0 < \alpha < 10^{-4}$ ) sont faciles à obtenir et plus stables à pression atmosphérique. Les électrons accélérés par le champ électrique entrent en collision non élastique avec les espèces lourdes et leur transfèrent une

partie de leur énergie cinétique pour donner des espèces réactives telles que les espèces métastables, les radicaux et les ions. Grâce aux espèces réactives créées, les plasmas non-thermiques sont très utilisés et peuvent être adaptés à plusieurs applications. Parmi les décharges électriques à pression atmosphérique, on trouve la décharge couronne, la décharge à barrière diélectrique et la décharge Glidarc etc. (Hnatiuc et al, 2002)

➤ **La décharge couronne**

La décharge couronne se définit comme étant l'ensemble des phénomènes électriques, optiques et acoustiques qui se produisent entre deux électrodes de courbures non symétriques (pointe – plan, fil cylindre, etc...) auxquelles on applique une ddp de quelques kV en tension continue. La décharge sera positive ou négative selon que l'électrode active (portée à haute tension) jouera le rôle d'anode ou de cathode. L'évolution des processus qui conduisent de la simple collecte des charges électriques à l'arc dans un intervalle inter-électrode soumis à un champ électrique, dépend de la distance séparant les électrodes. Compte tenu de la facilité de sa mise en œuvre, cette décharge trouve de nombreuses applications en milieu industriel (dépollution, électro précipitation, aérosols, et surtout traitement de surface) (Nzali et al, 2010).

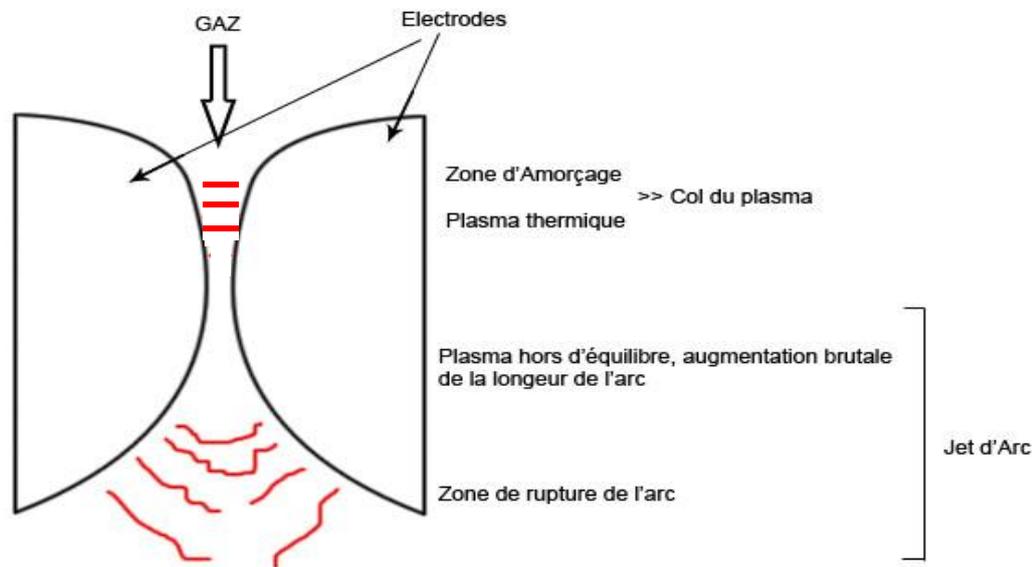
➤ **La décharge à barrière diélectrique**

Ce dispositif permet de limiter le transfert de masse existant dans une décharge couronne simple, par une séparation matérielle entre anode et cathode, à la manière d'un compartiment séparé, et de le réaliser en matériau diélectrique, constituant ainsi un réacteur à décharge barrière diélectrique (Nzali et al, 2010).

➤ **La décharge d'arc électrique glissant ou « glidarc ».**

Proposée et développée par l'équipe du Professeur Czernichowski à l'Université d'Orléans en 1988 (Joshi et al, 1995), cette décharge glissante apparaît entre deux électrodes divergentes. Il fonctionne à pression atmosphérique. La décharge glissante s'obtient en appliquant une différence de potentielle très élevée (5-10 kV) entre deux électrodes divergentes disposées symétriquement autour d'un jet gazeux d'air humide. Un arc s'amorce au minimum d'écartement des électrodes et glisse le long de celles-ci en s'allongeant sous l'effet du flux gazeux avant qu'il n'éclate en panache et qu'un nouvel arc ne se forme (voir figure 3). Ce panache est très riche en espèces fortement réactives qui, au contact d'une surface inerte ou

biologique, peuvent la modifier. Ce sont ces espèces réactives qui sont responsables en partie des propriétés chimiques et de l'effet du « Glidarc » (Khadija et al, 2015).



**Figure 3:** Plasma de type arc glissant (Khadija et al, 2015).

L'avantage de ce type de plasma est qu'il acquiert simultanément deux propriétés : celle d'un plasma thermique en équilibre et celle d'un plasma hors équilibre. Ces deux zones distinctes peuvent être délimitées dans l'espace par rapport au point d'amorçage électrique où on a en général un plasma thermique alors qu'à côté de la zone de rupture d'arc, le plasma est froid (figure 3).

### I.1.3.2. Plasmas chauds ou plasmas thermiques

Encore appelés « plasmas à équilibre thermodynamique local », ces plasmas sont obtenus à haute pression et se caractérisent par une température électronique voisine de celles des espèces lourdes ( $T_e \approx T_g$ ). Leur mise en œuvre demande de fortes puissances pouvant aller jusqu'à 50 MW. Ils sont caractérisés par un gaz dont la température est très élevée ( $T \geq 3000 \text{ °K}$ ) et une pression importante ( $P \geq 1 \text{ atm}$ ). L'agitation thermique y est de même ordre de grandeur que le seuil d'ionisation des espèces neutres. Cependant, malgré leur source d'énergie suffisante, ils ne sont pas adaptés pour des applications en plasma chimie où des traitements sélectifs de réactifs et une grande efficacité est requise. D'autres inconvénients des plasmas thermiques sont le chauffage excessif du milieu réactionnel, la nécessité d'utiliser des matériaux réfractaires coûteux, le coût énergétique élevé et l'usure rapide des électrodes (Doubla et al

2003). Ces plasmas sont générés le plus souvent au moyen de torches à plasmas employées en incinération et d'arcs électriques (Fanmoe et al, 2003).

### I.1.3.3. Plasmas tièdes : l'effluage électrique

A la pression atmosphérique, des plasmas intermédiaires, autrefois regroupés dans la classe des plasmas froids, sont obtenus avec une température macroscopique des gaz proche de l'ambiante. Comme ils opèrent dans des conditions modestes de laboratoire (pression atmosphérique et température ambiante), ces plasmas présentent un intérêt particulier pour des applications techniques, industrielles et chimiques avec une grande sélectivité. Dans ces plasmas, l'énergie des électrons est plus élevée que celle des espèces lourdes. Cependant, la pression atmosphérique caractérise les plasmas proches de l'équilibre thermique, alors que la température ambiante caractérise plutôt un plasma « froid » (Tsagou et al, 2008). Ce type de plasma est principalement constitué de l'effluage électrique (Kamgang et al, 2007)

## I.2. Quelques propriétés des plasmas

Au terme des définition ci-dessus mentionnées, les plasmas peuvent avoir des propriétés physiques et chimiques très particulières.

### I.2.1. Propriétés électriques principales

D'après la définition, le plasma est un milieu complexe composé d'espèces chargées (électrons  $e^-$ , cations  $C^{p+}$  et anions  $A^{q-}$ ) dont l'ensemble est électriquement neutre, ce qui implique la relation d'électro neutralité :

$$n_e + \sum_A qn(A^{q-}) = \sum_C pn(C^{p+}) \quad (1)$$

$n$  étant la densité électronique et  $n(A^{q-})$  et  $n(C^{p+})$ , les densités respectives des anions  $A^{q-}$  et des cations  $C^{p+}$ .

L'électro neutralité n'est réalisée qu'à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire sur une échelle supérieure ou égale à la longueur de Debye.

$$\lambda_d = \sum_i \sqrt{\varepsilon_0 \frac{kT_i}{n_i q_i^2}} \quad (2)$$

où  $n_i$  est la densité (en  $\text{cm}^{-3}$ ) de charge  $q_i$ ,  $T_i$  sa température (en Kelvin),  $k$  la constante de Boltzmann et  $\epsilon_0$  la constante diélectrique du vide.

Si les particules sont les électrons, cette expression devient :

$$\lambda_d (\text{cm}) = 6,9 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (3)$$

( $T_e$  en Kelvin est la température électronique et  $n_e$  la densité des électrons exprimée en  $\text{cm}^{-3}$ ). Plus la densité électronique est élevée, plus l'effet d'écran des électrons vis à vis d'une charge positive est important, et plus la longueur de Debye diminue.

Un plasma est aussi caractérisé par son degré d'ionisation défini par

$$\alpha = \frac{\sum_C p n(C^{P+})}{N + \sum_C p n(C^{P+})} \quad (4)$$

$N$  étant la densité des espèces neutres. Ce taux est très variable et compris entre  $10^{-10}$  et 1 selon la nature du gaz. Pour des plasmas thermiques, le taux d'ionisation des particules est élevé et voisin de 1 (Fanmoe et *al*, 2003).

### I.2.2. Propriétés physico-chimiques

L'existence simultanée des particules chargées et des espèces neutres le plus souvent dans des états excités confère au plasma des propriétés physico-chimiques particulières (Kamgang et *al*, 2008) :

- Il est conducteur électrique, c'est à dire que sous l'influence des champs appliqués, ils font apparaître des courants électriques ; pour un mouvement relatif du plasma par rapport aux champs magnétiques, il va apparaître une tension induite ;
- Il est conducteur thermique, c'est à dire qu'il y aura des courants de convection produits par les différences de température ;
- Il est dissipatif, c'est à dire qu'il réalise la conversion des différents types d'énergie en énergie thermique ;
- Il est anisotrope, avec des propriétés différentes selon les directions de l'espace ;

- Il est diamagnétique, autrement dit un champ magnétique est affaibli en présence du plasma.

#### ❖ **Les propriétés physiques**

- **La neutralité électrique** : les espèces chargées dans les plasmas sont les électrons, les cations et les anions ; et le milieu est électriquement neutre.
- **Le degré d'ionisation** : les plasmas froids sont faiblement ionisés, tandis que les plasmas chauds sont fortement ionisés.
- **La température électronique et la température macroscopique** : il est plus facile de donner de l'énergie aux électrons qu'aux espèces lourdes (ions et molécules), du fait que les électrons étant plus légers que les ions, ont moins d'inertie et sont plus réactifs, d'où la différence significative entre la température des électrons  $T_e$  et celle des espèces lourdes  $T_g$  ( $T_e \gg T_g$ ). Cependant cette différence diminue pour des valeurs de degré d'ionisation tendant vers l'unité (Takam et *al*, 2010).

Un équilibre thermodynamique total (ETT) suppose la micro réversibilité de tous les processus d'excitation et de désexcitation par collision qui se produisent dans le plasma. L'équilibre qui existe n'est qu'un processus. Et son inverse se produit dans le même milieu et tous deux sont égaux. On obtient un tel équilibre dans les plasmas optiquement épais pour toutes les radiations, de telle sorte qu'il rayonne comme un corps noir à une température  $T$  en suivant la loi de Planck (Burlica et *al*, 2006).

#### ❖ **Les propriétés chimiques**

Dans un plasma non thermique, ce sont les électrons qui sont responsables du transport et du transfert de l'énergie électrique. Ceci se réalise par des collisions qui prennent naissance grâce au champ électrique appliqué. Il existe deux types de collisions :

##### ➤ **Les collisions élastiques**

Le transfert d'énergie est faible lors d'une collision élastique ; il y a uniquement transfert d'énergie cinétique entre les différentes espèces entrant en collision. Il y a conservation de l'énergie totale du système et l'électron change de direction sans modification significative de sa vitesse.

### ➤ **Les collisions inélastiques**

Ces collisions sont responsables de l'apport de l'énergie au gaz et de son évolution vers l'état plasma et toutes les formes d'énergie sont échangées. Elles constituent le seul mode de transfert d'énergie efficace entre les électrons et les espèces lourdes et engendrent diverses réactions (dissociation, excitation, ionisation, transfert de charges etc.). Les nouvelles espèces formées au cours de ces réactions confèrent au plasma ses propriétés particulières (Massines et *al*, 2003).

### **I.2.3. Principales interactions en phase plasma**

Les différentes entités chimiques présentes dans le plasma peuvent induire, à l'interface solution-plasma, de nombreuses réactions qui ont été identifiées et classées dans les grandes familles de réactions. Le tableau ci-dessous présente les principaux types de réactions intervenant en phase plasma (Hnatiuc et *al*, 2002).

**Tableau I:** Principaux types de réactions intervenants en phase plasma (Hnatiuc et al, 2002).

| Réactions           |                      |   |
|---------------------|----------------------|---|
| Excitation          | Par particule lourde | $A + B \longrightarrow A^* + B$         |
|                     | Par photon           | $A + h\nu \longrightarrow A^*$          |
|                     | Par électron         | $A + e^- \longrightarrow A^* + e^-$     |
|                     | Par transfert        | $A + B^* \longrightarrow A^* + B$       |
| Désexcitation       |                      | $A^* \longrightarrow A + h\nu$          |
| Ionisation          | Par particule lourde | $A + B \longrightarrow A^+ + B + e^-$   |
|                     | Par photon           | $A + h\nu \longrightarrow A^+ + e^-$    |
|                     | Par attachement      | $A + e^- \longrightarrow A^-$           |
| Transfert de charge |                      | $A + B^+ \longrightarrow A^+ + B$       |
| Dissociation        | Par particule lourde | $A_2 + B \longrightarrow A + A + B$     |
|                     | Par photon           | $A_2 + h\nu \longrightarrow A + A$      |
|                     | Par attachement      | $A_2 + e^- \longrightarrow A + A + e^-$ |
| Recombinaison       | Entre atome          | $B + A + A \longrightarrow A_2 + B$     |
|                     | Electron/Ion         | $e^- + A^+ \longrightarrow A + h\nu$    |
|                     | Ion/Ion              | $A^- + B^+ \longrightarrow AB$          |
|                     | Entre radicaux       | $R\cdot + H\cdot \longrightarrow RH$    |
|                     | Ion/Molécule         | $A^+ + B \longrightarrow AB^+$          |

#### I.2.4. Composition chimique pour le plasma glidarc

Dans le plasma d'air humide de type glidarc, les espèces dérivent de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O. La complexité de la décharge dans l'air résulte d'une part, de l'évolution des espèces créées dans un plasma d'oxygène et d'azote, et d'autre part des mécanismes collisionnels se produisant au cours de la décharge (Nzali et al, 2010).

- **Le dioxygène (O<sub>2</sub>)**

La molécule d'oxygène possède plusieurs états excités dont l'état de plus faible énergie <sup>1</sup>Δ<sub>g</sub> (0,977 eV) appelé oxygène singulet a une durée de vie beaucoup plus longue (3900 s). Par des processus collisionnels, il peut transmettre son énergie aux autres états, et par là, induire diverses réactions pouvant se dérouler dans le plasma. Les processus majoritaires impliquent des dissociations indirectes qui font intervenir plusieurs étapes d'excitation vibrationnelle et (ou) électronique :



L'énergie d'ionisation de O<sub>2</sub> est de 12 eV, valeur supérieure à l'énergie des électrons (1 à 3 eV), ce qui ne permet pas une ionisation directe. L'ionisation passe par une série d'étapes d'excitations et donne naissance aux espèces O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, et O<sup>-</sup>.

- **Le diazote (N<sub>2</sub>)**

L'énergie de dissociation de l'azote est 9,8 eV ; la dissociation de l'azote dans un plasma d'air se fait principalement par plusieurs excitations vibrationnelles successives favorisées par des transferts d'énergie vibrationnelle lors des chocs entre les molécules. Cette dissociation s'opère selon le processus ci-dessous :



Par contre, l'ionisation de l'azote est faible à cause de son énergie d'ionisation élevée (15,5 eV). En présence d'oxygène, d'autres espèces telles que les oxydes d'azote NO<sub>x</sub> apparaissent.

- **La molécule d'eau (H<sub>2</sub>O)**

Cette molécule se dissocie et son énergie de dissociation est faible (5,11 eV).

La molécule d'eau possède de nombreux niveaux électroniques. Les processus majoritaires impliquent :



Toutes ces espèces créées par collisions au sein de la décharge électrique vont donner par synthèse naissance à d'autres espèces, ce qui rend complexes les réactions se déroulant en phase plasma (Gnokam et *al*, 2008).

### I.3. Propriétés induites par les espèces créées dans le plasma d'air humide

La composition et les propriétés chimiques des espèces créées dans de telles décharges ont été examinées par Benstaali et *al*, (2002) et la présence de radicaux actifs OH• et NO• établie ainsi que la population de chacune de ces espèces excitées majoritaires (Benstaali et *al*, 2001).

#### I.3.1. Propriétés oxydantes

Les propriétés oxydantes du plasma sont dues à la présence dans la décharge des espèces telles que : O<sub>3</sub>, O, OH•, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et NO•. Ainsi, OH est un oxydant très puissant susceptible de réagir avec un nombre considérable de composés organiques, inclus des composés récalcitrants tels que des tensio-actifs ou certains solvants utilisés dans des procédés particuliers (Moussa et *al*, 1999). Il est le principal responsable de la dégradation des composés organiques car d'après son potentiel d'oxydo-réduction élevée  $E^\circ(OH/H_2O) = 2,85 \text{ V/ENH}$  et est considéré comme entité chimique ayant le plus fort potentiel après le fluor  $E^\circ(F/HF) = 3,06 \text{ V/ENH}$  (Gnokam et *al*, 2008).

#### I.3.2. Propriétés acidifiantes

Le radical NO<sup>°</sup> est le précurseur des acides nitreux et nitriques formés par exposition à la décharge. Très schématiquement :  $NO \rightarrow NO_2 \rightarrow HONO \rightarrow HONO_2 \rightarrow HNO_3$ . Il en résulte une acidification importante du milieu liquide s'il n'est pas tamponné (Gnokam et *al*, 2008).

#### I.3.3. Propriétés complexantes

La présence du peroxyde d'hydrogène en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> est attestée en solution par son pouvoir complexant bien connu vis-à-vis du titane(IV) ou du vanadium(V). Par exemple, une solution

de trichlorure de titane (violette) évolue vers une solution orangée caractéristique du complexe  $\text{TiO}_2(\text{H}_2\text{O}_2)^{2+}$  sous l'exposition d'une décharge d'arc rampant. Cette modification illustre l'effet oxydant de la décharge puisque le titane(III) est oxydé en titane(IV), mais établit aussi la présence de peroxyde d'hydrogène dans la solution à la suite de l'exposition au plasma.

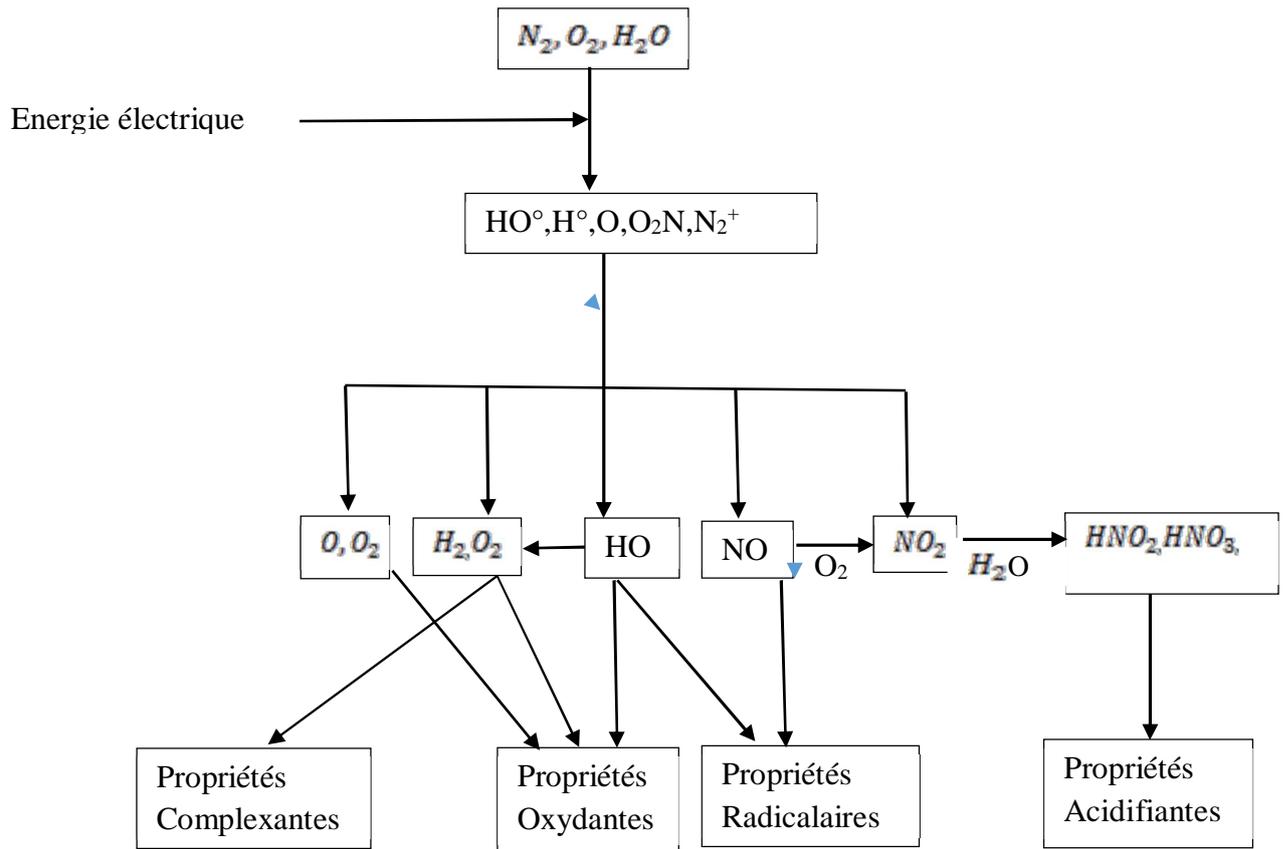
#### **I.3.4. Propriétés radicalaires**

Les radicaux formés par la décharge sont pour l'essentiel  $\text{HO}^\bullet$  et  $\text{NO}^\bullet$ . Le pouvoir oxydant du radical  $\text{OH}^\bullet$  a été examiné. Il peut aussi agir par ses propriétés électrophiles et se fixer sur des doubles liaisons. Par exemple, un phénol est transformé transitoirement en dihydroxybenzène (Hnatiuc et *al*, 2002).  $\text{NO}^\bullet$  est également réactif et donne des réactions de substitution (exemple : la thyroxine est transformée en nitrotyrosine).

Le tableau II et la figure 4 illustrent le récapitulatif des espèces et des propriétés chimiques d'une décharge électrique glissante dans l'air humide, et les principales réactions.

**Tableau II** : Espèces chimiques présentes dans le plasma d'air humide (Du et al 2008 ; Khelifa et al, 2006)

|   |   |
|---|---|
| Formation de l'ozone                                  | $O_{2(gaz)} + e^{-} \rightarrow O^{\circ} + O^{\circ} + e^{-}$  |
|   | $O_{2(gaz)} + O^{\circ} \rightarrow O_{3(gaz)}$                 |
|   | $O_{3(gaz)} \rightarrow O_{3(aq)}$                              |
| Formation des acides nitrés et des NOx                | $H_2O \rightarrow HO^{\circ} + H^{\circ}$                       |
|   | $N_{2(gaz)} + e^{-} \rightarrow N + N + e^{-}$                  |
|   | $N + HO^{\circ} \rightarrow NO + H$                             |
|   | $N + HO^{\circ} \rightarrow HNO_2 \rightarrow H^{+} + NO_2^{-}$ |
|   | $HNO_2 + HO^{\circ} \rightarrow NO_2 + H_2O$                    |
|   | $NO_2 + HO^{\circ} \rightarrow NO_2 + H_2O$                     |
| Formation des radicaux $OH^{\circ}$ et $HO_2^{\circ}$ | $H_2O \rightarrow HO^{\circ} + H^{\circ}$                       |
|   | $H^{\circ} + O_3 \rightarrow HO^{\circ} + O_2$                  |
|   | $HO^{\circ} + O_3 \rightarrow HO_2^{\circ} + O_2$               |
| Formation de l'eau oxygénée                           | $2H_2O \rightarrow H_2O_2 + 2H^{+} + 2e^{-}$                    |
|   | $HO_2^{\circ} + HO_2^{\circ} \rightarrow H_2O_2 + O_2$          |
|   | $OH^{\circ} + HO^{\circ} \rightarrow H_2O_2$                    |



**Figure 4:** Propriétés de la décharge électrique glissante dans l'air humide (Gnokam et al, 2008).

Les réactions entre le plasma et la cible se déroulent à l'interface plasma-cible. La cible peut être solide ou liquide. Nous travaillerons avec une cible liquide qui est de l'eau distillée en milieu aqueux. Les réactions que nous allons étudier auront lieu après l'arrêt de la décharge : ce phénomène est appelé post-décharge.

### I.3.5. Définition de la post-décharge

La post-décharge se définit comme étant l'ensemble des réactions qui se déroulent en solution après arrêt de la décharge, sans aucun apport supplémentaire d'énergie (Khelifa et al, 2006). Ce phénomène serait probablement dû à la présence d'espèces réactives ( $H_2O_2, NO_2^-, NO_3^-, etc$ ) induits par les radicaux  $^{\circ}OH$  et  $NO^{\circ}$  (Fouodjou et al, 2015). Ce phénomène implique donc la présence des espèces réactives à longue durée d'action. Il peut présenter des grands intérêts en termes d'applications environnementales et industrielles parce que la cible continue d'être traitée sans aucun apport d'énergie. Nous avons aussi deux conséquences de la décharge temporelle qui sont d'importance majeure (Gnokam et al, 2008) :

- Le fait que la réaction (oxydation) se poursuive alors que l'alimentation électrique soit inactivée : la production de réactif pendant la post-décharge n'émerge plus au cours du procédé, ce qui a pour effet direct d'accroître notablement sa compétitivité.

### **I.3.6. Eau activée par plasma Glidarc**

### **I.3.7. Sources des espèces générées dans l'eau activée par plasma Glidarc**

La synthèse de l'eau activée par plasma est précédée par l'application de décharges électriques dans l'air ou dans des mélanges azote-oxygène sur un volume d'eau (Bruggeman et *al*, 2016). Le traitement plasma de l'eau est typiquement stimulé par l'application de plasma froid sur la surface de l'eau ou sous l'eau en utilisant différentes sources de plasma (Ndiffo et *al*, 2020). Les types et la concentration des espèces réactives présentes dans l'eau activée par plasma dépendent des gaz et liquides utilisés pour générer le plasma (Lukes et *al*, 2014). En fonction de l'environnement chimique, de la tension excitée et du mode de génération, les espèces oxygénées réactives (ROS) et les espèces azotées réactives (désignées collectivement par RNS) peuvent être formées. Les configurations existantes de la littérature sont résumées dans le tableau II. Il est évident qu'outre les sources de plasma utilisées, le temps de traitement et les gaz utilisés, la distance entre les liquides et le panache de plasma, la nature des électrodes sont des questions importantes à ne pas négliger. Par exemple, l'utilisation d'oxygène, d'azote et d'eau comme molécules mères pour la production de l'eau activée par plasma, se traduira par la formation d'un certain nombre d'espèces primaires (y compris l'oxygène atomique, l'oxygène singulet, le super oxyde, l'ozone, les radicaux hydroxyles et excités et l'azote atomique) qui continueront ensuite à réagir pour former des espèces secondaires (y compris le peroxyde d'hydrogéné, le peroxydinitrite, l'oxyde nitrite, nitrates et ion nitrite) (Brisset et *al*, 2016). Le tableau III montre les réactions chimiques possibles se produisant pendant la génération de l'eau activée par plasma. Ce sont ces principales réactions chimiques qui entraînent la formation des ROS et de RNS. La chimie et les produits de réaction de l'eau activée par plasma généré au-dessus de la surface de l'eau sont différents de l'eau activée par plasma généré directement dans les liquides.

**Tableau III** : Quelques exemples de la littérature des systèmes plasma pouvant être utilisés pour la production d'eau activée par plasma (Brisset et al, 2016).

|   | Mode de fonctionnement  | Paramètres critiques  | Chimie   | Références   |
|---|---|---|--|--|
| <p>1- Plasma au contact avec les liquides</p> <p>Décharge sur l'eau et sur les surfaces hydratées</p> <p>Décharge avec de l'eau pulvérisée</p> <p>Décharge de gaz dans les bulles</p> | <p>Décharge plasma à arc glissant formée au-dessus de la solution liquide</p> <p>Augmentation de la surface causée par le jet de liquide</p> <p>Génération de la décharge dans les bulles</p> | <p>-Flux d'air</p> <p>-Ecart entre les électrodes pointes et le liquide</p> <p>-Temps de traitement</p> <p>-Types de gaz</p> <p>-Sources de tension</p>   | <p>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></p> <p>-Nitrite</p> <p>-Nitrates</p> <p>-Radicaux anioniques super oxyde</p> <p>-Oxygène singulet</p> <p>-Radicaux hydroxyles</p> <p>- Ozone</p> <p>-•OH, <sup>1</sup>O<sub>2</sub>, •O<sub>2</sub><sup>-</sup></p> | <p>(Kamgang et al, 2009) ; (Naitali et al 2010) ; (Ma et al, 2015) ; (Haghighat et al, 2017) ; (Puae et al, 2017).</p> |
| <p>2- Plasma directement dans l'eau</p>   | <p>Décharges électriques dans l'eau</p>   | <p>-Distance du plasma final et surface de l'eau</p> <p>-Gaz</p> <p>-Types d'électrodes (exemple : graphite, cuivre)</p> <p>-Tension de fonctionnement</p> <p>-Courant de décharge</p> <p>-Fréquence</p> <p>-Taille d'électrode</p> | <p>- Peroxyde d'hydrogène</p> <p>- Peroxyde - Nitrate - Nitrite</p> <p>- Anion super oxyde (O<sub>2</sub>)</p> <p>- Ozone</p> <p>- Radicaux d'oxyde nitrique</p> <p>- Radical hydroxyde</p>  | <p>(Naumova et al, 2011) ; (Park et al, 2013) ; (Shainsky et al, 2012); (Shen et al 2016) ; (Zhang et al, 2016).</p>   |

**Tableau IV** : Réactions chimiques ayant lieu pendant la génération de PAW entraînant la formation de ROS et RONS (Pârvulescu et al, 2012)

|   |      |
|---|------|
| $\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{H}\cdot + \text{e}^-$                                   | (14) |
| $\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}\cdot + 2 \text{e}^-$                                    | (15) |
| $\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}\cdot + \text{O}\cdot + \text{H}\cdot + \text{e}^-$                    | (16) |
| $\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}^+ + \text{O} + 2\text{e}^-$   | (17) |
| $\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}^- + \text{O}$   | (18) |
| $\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$  | (19) |
| $\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$   | (20) |
| $\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$  | (21) |
| $\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{N}$  | (22) |
| $\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$   | (23) |
| $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$   | (24) |
| $\text{NO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3$  | (25) |
| $\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{OH}\cdot$   | (26) |
| $3 \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HNO}_3 + \text{NO}$   | (27) |
| $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{ONOOH} + \text{H}_2\text{O}$                           | (28) |
| $\text{OH}\cdot + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$  | (29) |
| $\text{NO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$   | (30) |
| $\text{NO} + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{HNO}_2$   | (31) |
| $\text{HNO}_2 + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  | (32) |
| $\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}\cdot$  | (33) |
| $\text{NO}_3 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2$   | (34) |
| $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_5$  | (35) |
| $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3$   | (36) |
| $2 \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+$                               | (37) |
| $3\text{NO}_2^- + 3\text{H}^+ \rightarrow 2\text{NO} + \text{NO}_3^- + \text{H}_3\text{O}^+$                                | (38) |
| $\text{OH} + \text{NO}_2 \rightarrow [\text{O}=\text{N}-\text{OOH}] \rightarrow \text{O}=\text{N}-\text{OO}^- + \text{H}^+$ | (39) |

### I.3.8. Propriétés physiques et chimiques de l'eau activée par plasma

#### ➤ Le pH

C'est la mesure de la concentration en ions hydrogène d'une solution. Les réactions qui se produisent entre les espèces chimiques formées dans le plasma et l'eau entraînent l'acidification (Oehmigen et al, 2010) ont rapporté que l'acidification des liquides aqueux par réaction plasmatique entraîne la génération de peroxyde d'hydrogène, d'acide nitrique et d'acide peroxyntrique.

### ➤ **Potentiel d'oxydoréduction**

Le potentiel d'oxydoréduction mesure la capacité d'une solution à oxyder ou réduire une autre substance et dépend de la concentration des oxydants et de leurs forces. L'avantage de la mesure du potentiel d'oxydoréduction de l'eau est qu'il fournit une évaluation rapide et unique du potentiel de désinfection (Suslow et *al*, 2004). Parmi les espèces ROS formées dans l'eau activée par plasma, le peroxyde d'hydrogène participe principalement aux réactions d'oxydoréduction où il peut se comporter comme un oxydant ( $E^\circ=1,77$  V) ou comme réducteur ( $E^\circ= -0,7$  V) (Lukes et *al*, 2012).

### ➤ **Conductivité**

La conductivité est une mesure de la capacité de l'eau à faciliter la circulation du courant électrique à travers elle. La présence d'ions étrangers dans l'eau affecte grandement la conductivité. Les espèces réactives et les ions produits pendant le traitement au plasma se dissolvent facilement dans l'eau, ce qui altère évidemment la conductivité. La formation de ROS et de RNS lors de l'activation plasma de l'eau contribuera à une augmentation de la conductivité de l'eau activée par plasma.

### ➤ **Nitrates et Nitrites**

La détection des nitrites et des ions nitrates est la principale preuve de la formation des RNS et un intérêt considérable a été attiré par de nombreux chercheurs ces dernières années pour son activité antimicrobienne. (Shen et *al*, 2016) ont rapporté que les ions nitrates à vie longue dans l'eau activée par plasma se forment comme produits secondaires et prolongent l'activité antimicrobienne lors du stockage. (Lukes et *al*, 2014) ont étudié la formation de nitrate à partir de la réaction de post- décharge entre le nitrite et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Les auteurs ont proposé une réaction pour la formation de nitrate comme suit :



## **I.4. Applications du plasma en agriculture**

Les applications des plasmas sont nombreuses. De l'industrie de traitement de surface en passant par l'industrie de stérilisation, de dépollution des effluents et depuis peu de synthèse. De nos jours, cette technique a montré son efficacité en agriculture dans l'optimisation des rendements. Pour y arriver, on les utilise pour perfectionner la germination des graines, capturer

l'azote atmosphérique dans l'eau pour l'utiliser comme engrais chimique, stériliser les semences pendant l'entreposage, protéger les produits post-récoltes (Dobrin et al, 2013 ; Sera et al, 2021 ; Mildaziene et al, 2022). Le tableau V ci-dessous illustre les applications du plasma en agriculture.

**Tableau V :** Quelques exemples de la littérature sur les applications du plasma en agriculture (Misra et al, 2016).

| Graines  | Sources                                | Références                                    |
|--|--|---|
| Lentilles ( <i>Lens culinaris</i> ), haricots ( <i>Phaseolus vulgaris</i> ), blé ( <i>Triticum</i> , espèce C9),   | Cold radiofrequency air plasma         | (Bormashenko et al, 2012)                     |
| Avoine ( <i>Avena sativa</i> ) et blé ( <i>Triticum aestivum</i> )   | Low pressure cold plasma               | (Sera et al, 2010)                            |
| Chénopode blanc ( <i>Chenopodium album</i> agg.)   | Low pressure microwave discharge       | Sera et al, 2008 ; Sera et al, 2009)          |
| Blue lupine ( <i>Lupinus angustifolius</i> ), catgut ( <i>Galega virginiana</i> ), honey clover and soy ( <i>Melilotus albus</i> )   | 5.28 MHz capacitively coupled plasma   | (Filatova et al, 2010 ; Filatova et al, 2011) |
| Tomato ( <i>Lycopersicon esculentum</i> L. Mill. cv. zhongshu No. 6)   | Arc discharge plasma                   | (Yin et al, 2015)                             |
| Tomato ( <i>Lycopersicon esculentum</i> cv. PKM1)  | Ozone generator                        | (Sudhakar et al, 2011)                        |
| Pousse de radis ( <i>Raphanus sativus</i> var. longipinnatus)  | Atmospheric discharge plasma           | (Hayashi et al, 2015)                         |
| Blé ( <i>Triticum aestivum</i> )   | Atmospheric pressure surface discharge | (Dobrin et al, 2015)                          |
| Avoine ( <i>Avena savita</i> )   | Low pressure cold plasma               | (Dubinov et al, 2000)                         |
| Orge ( <i>Hordeum vulgare</i> ), radis ( <i>Raphanus sativus</i> ), cultivar de pois ( <i>Pisum sativum</i> cv. Little Marvel, <i>P. sativum</i> cv. Alaska), soja ( <i>Glycine max</i> (L.) Merr.), maïs ( <i>Zea mays</i> L.), et haricot ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.). | RF rotating plasma, low pressure       | (Volin et al, 2000)                           |
| Plante herbacée ( <i>Andrographis paniculata</i> )   | DBD plasma                             | (Tong et al, 2014)                            |
| Maïs ( <i>Zea mays</i> L.)   | Ozone generator                        | (Violleau et al, 2008)                        |
| Soja ( <i>Glycine max</i> L. Merr cv. Zhongdou 40)   | Low pressure RF plasma                 | (Ling et al, 2014)                            |
| Pois ( <i>Pisum sativum</i> L. var. Prophet)   | Diffuse coplanar surface DBD plasma    | (Stolarik et al, 2015)                        |
| Chénopode blanc ( <i>Chenopodium album</i> agg.)   | Surfatron discharge                    | (Stranak et al, 2007)                         |

## **I.5. Généralités sur le maïs**

### **I.5.1. Origine**

Le maïs est une plante herbacée annuelle appartenant à la famille des Poaceae. Elle a été domestiquée il y a environ 9000 ans à partir de la téosinte dans une région de moyenne altitude située au Sud de la ville de Mexico (Matsuoka et al, 2002 ; Van et al, 2010). Comparé à son ancêtre sauvage, le maïs cultivé aujourd'hui possède les caractéristiques du syndrome de domestication comme la perte de la dissémination spontanée des graines, une augmentation de la taille et du nombre de grains, la perte d'une enveloppe dure autour des grains, la synchronisation des dates de floraison mâles et femelles, une augmentation de la dominance apicale (Doebley et al, 2004). D'une façon générale, la domestication du maïs s'est accompagnée d'une perte de diversité estimée à environ à 20% (Wright et al, 2005). Après l'étape initiale de domestication, le maïs a connu une très large expansion géographique dans le continent Américain (Tenaillon et al, 2010). Cette rapide expansion géographique (en quelques milliers d'années à partir de -3000 jusqu'à vers l'an 1000) s'est accompagnée de l'adaptation du maïs, plante d'origine tropicale, à des climats tempérés. La date de floraison a joué un rôle majeur dans cette adaptation. La culture du maïs dans les climats tempérés a en effet été rendue possible en sélectionnant des variétés insensibles à la photopériode, précoces et capables d'accomplir leur cycle de développement sur une période de temps plus courte, avant l'arrivée de conditions climatiques défavorables (Rebourg et al, 2003). La première introduction du maïs en Europe, est due à Christophe Colomb au retour de son premier (4 mars 1493) ou deuxième (11 juin 1496) voyage en Amérique selon son propre témoignage. Le maïs aurait été introduit en Afrique au XVII<sup>ème</sup> siècle (Mémento de l'agriculture, 2002).

### **I.5.2. Botanique**

Le maïs une plante tropicale herbacée annuelle ayant pour nom scientifique *Zea mays* L. ; il appartient à la classe des monocotylédones, sous-classe des Commelinidaes, ordre des Cypéales, famille des Poaceae (ou Graminées) et la sous-famille des Panicoïdées. La taille de la tige de maïs est variable, de 0,4 m à 10 m ; pour les variétés couramment cultivées, la taille varie généralement de 1 à 3 m (FAO, 1980 ; Gibbon et al, 1985). La tige unique est formée de plusieurs entre-nœuds d'une vingtaine de centimètres, séparés par des nœuds. Au niveau de chaque nœud, de manière opposée, s'insèrent les feuilles à limbes allongées et à nervures parallèles. Le maïs est une espèce à pollinisation croisée, où les inflorescences femelles (épis)

et les inflorescences mâles (panicules) sont disposées à des endroits distincts sur la plante. Les épis, souvent à raison d'un épi par tige, sont formés d'un nombre variable de rangées de grains (de 12 à 16), qui fourniront de 300 à 1000 grains pesant entre 0,19 et 0,3 g. Le grain de maïs est formé d'un embryon, d'un tissu de réserve, l'albumen et d'une enveloppe fine et translucide, le péricarpe. L'albumen est constitué essentiellement de grains d'amidon ; c'est l'amidon corné qui donne sa couleur au grain de maïs, généralement jaune, mais aussi blanc, rouge ou noir. La figure 5 illustre la diversité de couleur, de forme et de taille que peuvent avoir les épis de maïs.

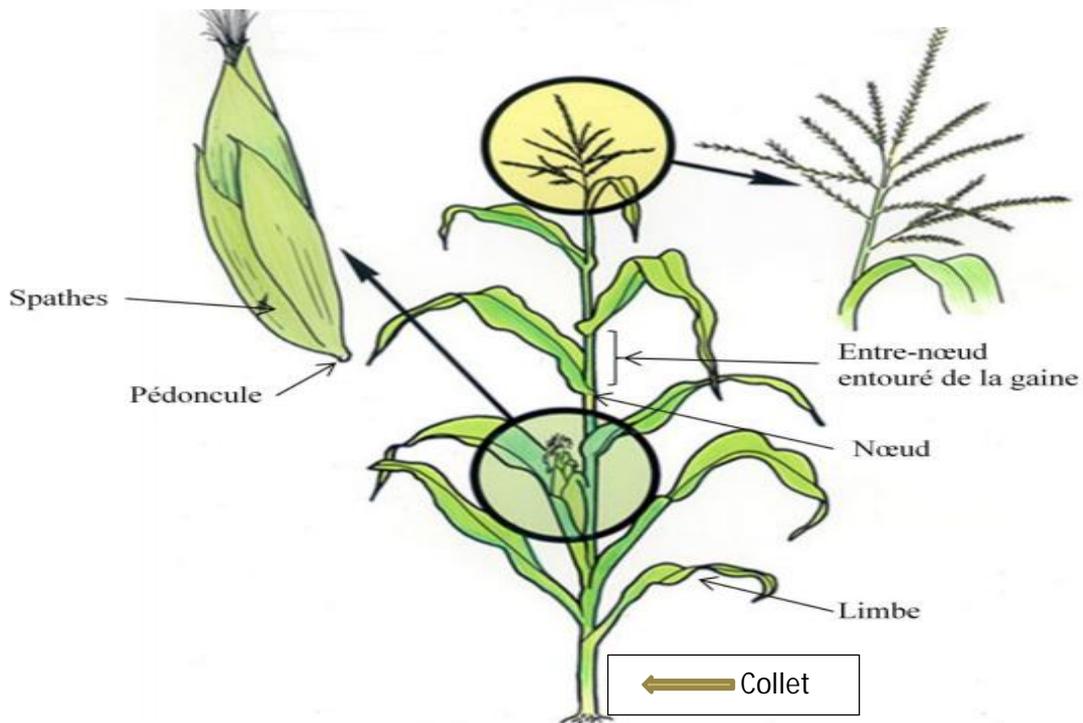


**Figure 5:** Photographie montrant la diversité des épis de maïs (Fabiola et *al*, 2006).

Le système racinaire du maïs est composé d'un grand nombre de racines adventives situées sur les nœuds à la base de la tige. Il est caractérisé par des racines traçantes (dites racines de surface), qui prélèvent l'eau et les nutriments nécessaires à la plante dans les couches les plus superficielles du sol (Gay et *al*, 1999). Ce type d'exploitation des ressources du sol fait que la plante est très exigeante en azote et en eau. Le maïs, comme la canne à sucre ou le sorgho, fait partie des plantes dites « en C4 ». Les plantes en C4 réalisent une photosynthèse plus efficace que les plantes dites « en C3 ». La production de matière sèche de ces plantes peut dépasser le double de la production des autres céréales comme le blé (Fabiola et *al*, 2006).

Epi ou inflorescence femelle

Panicule ou inflorescence mâle



**Figure 6:** Présentation de la morphologie aérienne d'un plant de *Zea mays* en fin de croissance (Cauderon et *al*, 2012).

### I.5.3. Différentes phases du cycle du maïs

Les stades « repères » de la croissance de la plante sont :

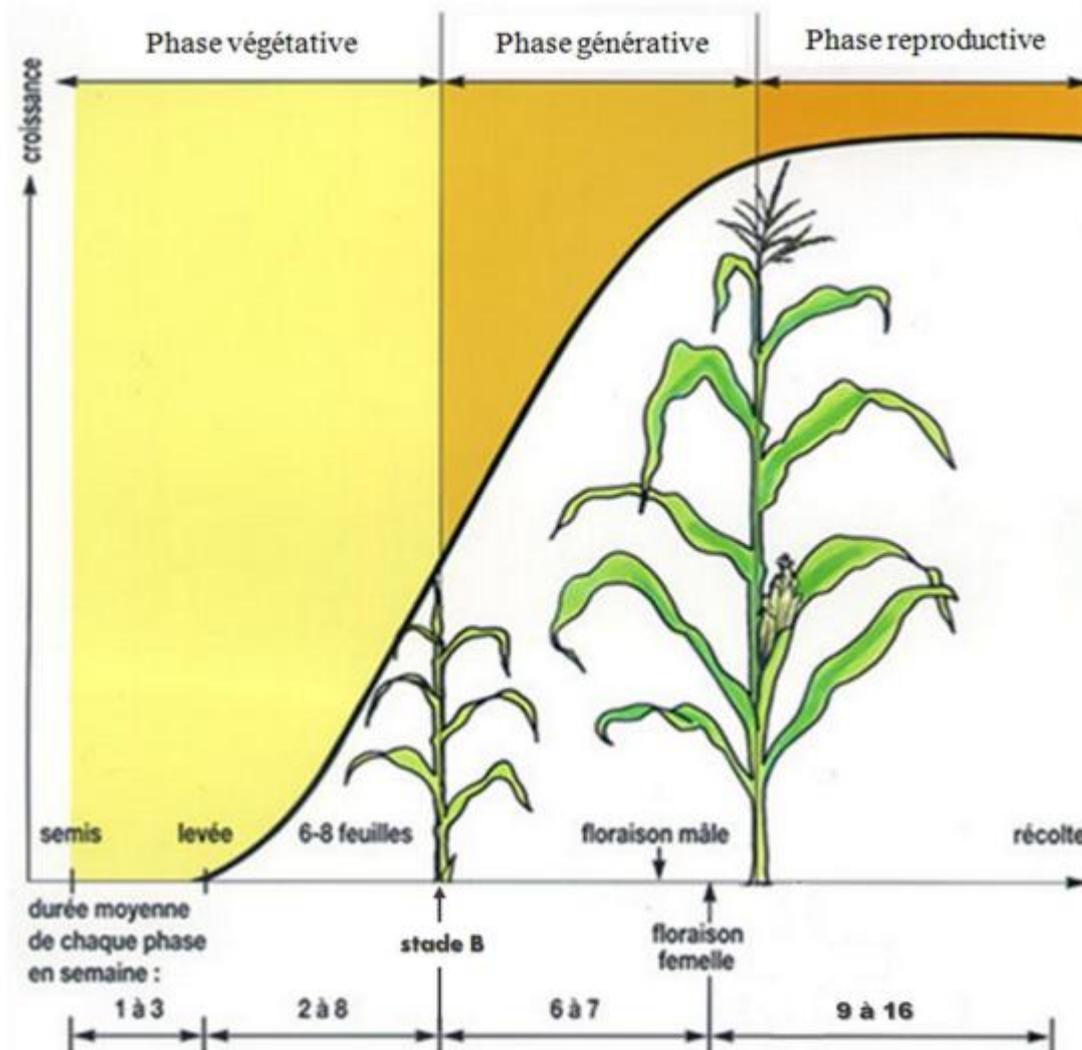
- Le stade de la levée : apparition de la première feuille ;
- Les stades foliaires et racinaires : nombre de feuilles déployées ou ramifications des racines ;
- Le stade B: initiation de la panicule à partir du bourgeon apical (cette phase n'est visible qu'après dissection de la plante) ;
- Initiation de l'épi : allongement du dôme d'un bourgeon axillaire. Cette phase est difficile à localiser : elle se produit lorsque 55 à 60 % des feuilles sont visibles ;
- Sortie de la panicule ;
- Floraison mâle : début de la libération du pollen ;
- Floraison femelle : soie hors des spathes et de la gaine foliaire des feuilles de l'épi ;
- Les repères post-floraison : il n'y a plus de formation de nouveaux organes.

Les stades de développement post-floraison sont donc établis à partir de la croissance des grains qui se divise en trois phases :

- Phase de latence : tous les grains ont un embryon formé mais n'ont pas accumulé d'amidon ;
- Phase de remplissage : les grains se remplissent d'amidon ;
- Phase de dessèchement ou déshydratation : les grains perdent de l'eau (diminution jusqu'à 40 % d'humidité). La maturité du grain est atteinte lorsque les cellules de la base du grain brunissent ; il y a apparition du point noir.

Le cycle de développement du maïs est découpé en 3 phases :

- La phase végétative : de la germination au stade B ;
- La phase générative : du stade B à la fécondation. Durant cette phase l'appareil végétatif et reproducteur croissent en même temps ;
- La phase reproductive : de la fécondation à la maturité.



**Figure 7 :** Les différentes phases du développement d'un plant de maïs (Cauderon et *al*, 2012).

#### **I.5.4. Exigences écologiques**

#### **I.5.5. Conditions climatiques**

Le maïs est une plante mondialement cultivée aujourd'hui du 50° degré de latitude Nord au 50° degré de latitude Sud et de 0 à 3000 mètres d'altitude (Kling et *al*, 1997). Le maïs est une plante des pays chauds. Il exige une grande humidité et de la chaleur à partir de l'ensemencement jusqu'à la floraison (Berger et *al*, 1962). La température optimale journalière de production de maïs se situe entre 20 °C et 24 °C (Rouanet et *al*, 2000). Il a besoin de 500 à 900 mm de pluie bien répartie pendant le cycle de culture pour un rendement optimal. La période particulièrement sensible au déficit hydrique se situe entre la floraison et la fin de formation des graines (Beernaert et *al*, 1992). Le volume, la répartition et l'efficacité de la

pluviosité sont d'importants facteurs. La sécheresse est le second facteur limitant d'ordre climatique (Berger et *al*, 1962). L'ensoleillement est le deuxième facteur prépondérant dans la production de maïs, le maïs est une plante exigeante en lumière de fait de son métabolisme photosynthétique en C4.

### **I.5.6. Conditions édaphiques**

Généralement le maïs est considéré comme un excellent exemple d'adaptation d'une culture aux conditions de sol. Quoique cultivé dans divers sols, il donne de meilleurs rendements dans les terres limoneuses chaudes, profondes, bien drainées et aérées, dans les terres de limons riches en matière organique et bien approvisionnées en substances nutritives assimilables. On peut le cultiver dans les sols modérément acides, mais le pH optimum se situe entre 6,0 et 7,0. Il réussit également dans les sols alcalins, pourvu que n'apparaisse aucune carence en oligoéléments (Berger et *al*, 1962).

### **I.5.7. Exigences nutritionnelles du maïs**

#### **I.5.7.1. Exigences du maïs en azote**

Pour le maïs, un fort rendement est souvent lié à la fumure azotée, mais uniquement si le niveau des autres intrants et la conduite de la culture sont corrects. En effet, la meilleure réponse à la fertilisation azotée, n'est obtenue que si la couverture des besoins en eau permet une pleine croissance de la culture. Dans de bonnes conditions cette réponse peut dépasser 30kg de grains pour chaque kilo d'azote apporté (FAO, 1987 ; Gros et *al*, 1976) ont évalué les besoins en azote du maïs à 50 kg/ha pour des variétés non améliorées et une pluviométrie incertaine. Ces besoins s'élèvent avec le potentiel de rendement jusqu'à 250 ou 300 kg/ha si l'on peut s'attendre à des rendements de 12 t/ha ou plus. L'absorption de l'azote par le maïs est lente en début de croissance, mais s'accélère rapidement pour atteindre un maximum à l'apparition des fleurs mâles, l'absorption pouvant alors dépasser 4 kg/ha/jour (FAO, 1987). La carence en azote se traduit sur le maïs par un port rabougri et un faible développement des plantes. On note une perte de couleurs (symptômes communs à toutes les carences) et un jaunissement des feuilles du sommet à la base (chlorose de l'apex). Les vieilles feuilles brunissent, et on observe une sénescence prématurée des feuilles les plus basses (confondue souvent avec un manque d'eau) alors que celles se trouvant en haut de la plante restent vertes. En cas de carence aiguë, la floraison est fortement réduite (FAO, 1987).

### **I.5.7.2. Exigence du maïs en phosphore**

Le plein effet des engrais azotés et des autres intrants ne peut être obtenu sans la présence de phosphore en quantité convenable. Les doses à apporter varient, selon la teneur en phosphore du sol et le niveau de récolte escompté, dans une fourchette de 30 à 100 kg/ha. Si l'objectif principal est le maintien de la teneur en phosphore du sol, il faut noter que le maïs prélève environ 8 kg de  $P_2O_5$ /tonne de grains (FAO, 1987). Faibles en début de végétation, les besoins en phosphore du maïs tout comme pour l'azote se manifestent surtout au moment de la floraison et de la formation des grains. Au cours de cette période critique la plante absorbe les 2/3 de ses besoins en phosphore (Gros et *al*, 1976). La carence en phosphore se manifeste sur le maïs par le ralentissement de la croissance de la plante. Les feuilles âgées sont d'une couleur foncée, vert-bleu caractéristique. La croissance racinaire est réduite. Dans les cas graves, les feuilles deviennent pourpres (étiolement). On a un retard de la maturité, une mauvaise formation des graines ou leur absence totale (FAO, 1987).

### **I.5.7.3. Exigence du maïs en Potassium**

Le maïs absorbe de grandes quantités de potassium dont seulement une faible proportion, environ 5 kg/tonne de grains, est exporté par la récolte. Bien que le maïs puisse, dans la plupart des cas, tirer du sol des quantités de potassium appréciable, il importe de s'assurer que les disponibilités totales sont suffisantes. La fumure potassique est d'autant plus nécessaire si l'on force sur la fumure azotée en tablant sur des rendements élevés. Les doses doivent être de 30 à 100 kg/ha de  $K_2O$ , en fonction de l'analyse du sol et du rendement attendu (FAO, 1987). L'absorption du potassium est régulièrement répartie sur toute la période de croissance végétative (Gros et *al*, 1976). La carence en potassium se manifeste sur le maïs par un ralentissement de la croissance de la plante. Les plantes sont chétives et les feuilles montrent une altération de couleur sur les bords, suivie de brûlures et de brunissement des extrémités des feuilles les plus âgées. Il y a verse des plantes et les graines sont ratatinées (FAO, 1987).

### **I.5.8. Culture du maïs**

La culture du maïs exige la lumière, des températures et des précipitations adéquates. Les températures moyennes journalières varient entre 20 et 35 °C avec un optimum entre 25-30 °C (Westphal et *al*, 1985). Dans les régions tempérées, le maïs tolère une température minimale de 10 °C et exige un minimum de 18 °C pour la floraison (Anonyme, 2014). Les besoins en précipitations sont de l'ordre de 480 à 800 mm bien réparties selon les besoins de la

plante au cours du cycle végétatif (FAO, 1980). Le maïs est une plante exigeante, très sensible aux variations de fertilités du sol. Il répond bien aux apports d'engrais et notamment d'Azote (NCRE, 1992 ; Gibbon et *al*, 1985). Les sols profonds à structure fine bien aérés, bien drainés et une capacité élevée de rétention d'eau sont préférables (FAO, 1983).

Le seuil de tolérance du pH du sol pour la culture du maïs se situe entre 5,0 et 8,0 avec un optimum entre 6,0-7,0 (Westphal et *al*, 1985).

Au Cameroun, le maïs se cultive dans toutes les zones agro-écologiques suites aux progrès réalisés par les programmes des sélections variétales. Parmi ces zones agro-écologiques du Cameroun ainsi que les variétés adaptées au sol acides (NCRE, 1992 ; The et *al*, 2006b ; IRAD, 2009).

La culture du maïs nécessite un bon choix de terrain, un labour à plat, en billons ou bien en buttes (IRAD, 1998). Dans le cas où le producteur veut semer sans labour « zéro labour », un bon désherbage manuel ou chimique est suffisant comme préparation de terrain (NCRE, 1992). La profondeur de semis varie de 4 à 6 cm et les dates de semis sont déterminées par les conditions écologiques (IRAD, 1998). Le traitement des semences avec un fongicide et un insecticide permet une protection de la plante contre les maladies (Tagne et *al*, 1999). Les besoins en semences dépendent de la densité de peuplement souhaitée et du poids de 1000 graines qui varie entre 150 et 300 g selon la variété. Le poids des semences par hectare est de 15 à 25 kg (FAO, 1980 ; IRAD, 1998 ; Westphal et *al*, 1985).

Le maïs est sensible aux propriétés physiques du sol. Il s'agit des conditions d'acidité et du labour. L'acidité du sol limite l'utilisation efficaces de près de 30% de la surface mondiale des terres arables (The et *al*, 2006b). L'augmentation du rendement dû au seul labour peut atteindre 25%. Selon les régions, la culture se fait à plat, en billons ou bien sur les buttes. Le semis du maïs se fait dès l'établissement des pluies après la préparation du terrain. Il se fait généralement entre 0,25 m à 0,5 m entre les poquets, et 0,70 à 0,90 m entre les lignes (IRAD, 2009). La valeur optimale de la densité varie en fonction de la variétés utilisée, des conditions d'alimentation hydrique et du niveau de fertilité du sol.

Les sarclages se font généralement deux fois au cours d'un cycle de culture : les premières deux semaines après le semis et les secondes quatre semaines après le semis (IRAD, 2009). Le second sarclage correspond beaucoup plus au buttage qui donne aux plants la capacité de résister aux vents violents. Le sarclage se fait aussi à l'aide des herbicides sélectifs (IRAD,

2009). Dans les zones de forêt humide au Cameroun, les essais sur la technique du « zéro Labour » ont montré que la culture du maïs peut se faire juste après nettoyage manuel ou à l'aide des herbicides du terrain. Le maïs réagit mieux aux fortes fumures. La fumure est appliquée selon la fertilité du sol, le précédent cultural, la pluviométrie et le rendement visé en grain. Cette fertilisation se fait avec des engrais minéraux et organiques. Les apports minéraux souvent conseillés sont de 40 à 50 Kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> à l'hectare, 20 à 150 Kg de N à l'hectare et 100 Kg de K<sub>2</sub>O à l'hectare.

La récolte du maïs commence quand le processus d'accumulation des réserves nutritives dans les grains est terminé. Il s'agit de la maturité physiologique. A ce stade, la teneur en eau est d'environ 37 à 38 %. Il s'agit donc de la récolte de maïs frais utilisé dans la préparation de différents mets et la mise en boîte de conserve.

A ce stade le maïs nécessite un pré séchage sur pied dans le champ avant la récolte. La récolte du maïs se fait manuellement ou au moyen d'un système mécanisé. Après la récolte le séchage se poursuit soit dans les cribs ou sous la forme de maïs égrené (IRAD, 1998). Après le séchage, il est stocké en épis ou en grain, à une teneur d'eau de 13 % (IRAD, 1998). L'humidité relative de l'air est un facteur important pour le stockage. Elle ne doit pas dépasser 70 à 75 %. La culture du maïs autant que le stockage nécessite une protection contre les ennemis que sont les maladies et les insectes.

#### **I.5.9. Contraintes de production du maïs**

La culture du maïs a connu beaucoup de progrès. Cependant elle se heurte à de nombreuses contraintes, parmi celles-ci, on peut citer la sécheresse, la baisse de la fertilité du sol, les maladies et les ravageurs.

#### **I.5.10. Problèmes de sécheresse**

Le maïs exige une température minimale de 10 °C pour la croissance et un minimum de 18 °C à la floraison. La pluviométrie doit se situer entre 480 et 800 mm bien répartie. Dans les zones écologiques où ces conditions ne sont pas réunies, la culture connaît des difficultés. Les effets des changements climatiques à long terme influencent les dates de semis, le cycle de la culture et les rendements (Lansigan et al, 2000). A court terme ces mêmes effets influencent les rendements (Fakorede et al, 1985).

Plusieurs stratégies ont été exploitées pour contourner cette contrainte. Parmi celles-ci on peut citer la sélection variétale durable. Ernst et *al*, (1994) ont appliqué le système modifié de sélection compréhensive tandis que Menz et Hallaeur, (1994), Menkir et Kling, (1999) ont utilisé la sélection récurrente réciproque pour développer des variétés composites adaptées à Iowa et des variétés précoces et extra- précoces qui constituent des solutions à la sécheresse.

#### **I.5.11. Baisse de fertilité du sol**

La baisse de fertilité du sol est une contrainte majeure à la production du maïs. Celle-ci s'exprime avec une acuité dans les pays tropicaux sous-développés pour qui le maïs est une culture de subsistance et d'espoir pour réduire la pauvreté. La baisse de la fertilité conduit à une baisse de rendement. Les producteurs sont obligés de recourir à la fertilisation minérale, la fertilisation organique, aux rotations, aux associations bénéfiques et aux variétés à faible exigences en azote.

Plusieurs fertilisations minérales ont été recommandées au Cameroun et ailleurs (IRAD, 1998 ; IRAD 2009). Il s'agit particulièrement des amendements en azote, phosphore et potassium. Badu-Apraku et *al*, (2003) ont étudié une gestion de la fertilisation phosphorée pour la culture du maïs dans la zone de savane. Ces auteurs ont conclu que l'application fractionnée du phosphore n'a pas d'impact significatif sur le rendement du maïs.

La fertilisation minérale peut se faire en association avec l'engrais vert constitué de feuillages et des autres produits végétaux. Les études de Tarfa et *al*, (2003), ont démontré que les feuilles de Parkia et de Neem (*Azadirachta indica*) peuvent être utilisées pour substituer 50% de la dose recommandée d'engrais minérale (NPK) sans réduire de manière significative le rendement grain de maïs. La rotation maïs légumineuse comme moyen de lutte contre la baisse de fertilité du sol a été recommandée par Naab et *al*, (2001).

Les progrès scientifiques ont aussi démontré que les symbioses mycorhizien et les symbioses du rhizobium contribuent positivement à la lutte contre la baisse de la fertilité du sol. La mise à profit des propriétés symbiotiques des mycorhizes et celles des rhizobiums permet d'accroître les rendements de la culture du maïs (Ngonkeu et *al*, 2003 ; Kannaiyan et *al*, 2003 ; Nwaga et *al*, 2000 ; Nwaga et *al*, 2007).

### **I.5.12. Acidité du sol**

Les sols acides constituent une contrainte importante à la culture du maïs. Ils couvrent près de 30 % de la surface mondiale des terres arabes. Dans les tropiques, l'Afrique a 880 millions d'hectares de terres acides soit 29 % des terres cultivables du continent (The et al, 2001). Les sols acides causent des pertes de rendements de maïs très importantes (Granados et al, 1998 ; The et al, 2006b). L'acidité du sol est fréquemment liée à la toxicité causée par l'Aluminium, le magnésium, le manganèse et le fer. Elle est aussi causée par des déficiences en Phosphore, Calcium, Magnésium et Molybdène.

Les pertes conséquentes s'expliquent par le fait que les plantes cultivées sur sols acides (pH<5) sont régulièrement exposées aux multiples stress minéraux (Foy et al, 1992 ; Marschner et al, 1991). Les sols carencés en Phosphore, Calcium, Magnésium, Potassium et en Zinc s'accompagnent des fortes toxicités Aluminium, Manganèse et Fer. La toxicité Aluminium reste le facteur limitant et le plus drastique (Foy et al, 1992). En plus de la pauvreté en Phosphore qui caractérise les sols acides comme conséquence majeure de la toxicité en Aluminium, Manganèse et Fer. Sanchez et al, (1994), ont noté que dans le sol des quantités importantes d'hydroxyde d'Aluminium de Manganèse et de Fer adsorbent le Phosphore introduit qui devient indisponible pour les plantes.

La lutte contre les effets néfastes de l'acidité du sol sur la culture du maïs utilise plusieurs approches à savoir la correction de l'acidité par les amendements calciques ou par l'application des matières organiques (The et al, 2006b). Selon les conclusions de The et al, (2006b) ces méthodes ne sont pas moins chères et restent inaccessibles aux producteurs paysans des pays en voie de développement.

### **I.5.13. Striga**

Le striga est une plante parasite. Cette plante infeste environ 73 millions d'hectares dévoué à l'agriculture en Afrique (Traoré et al, 1995). Le genre Striga, communément appelé plante sorcière a environ 35 espèces (Raynal-Roques et al, 1991). Parmi ces espèces, 33 sont présentes en Afrique ou le Striga hermontica (Del.) Benth (Scrophulariaceae) est la plus largement distribuée. Les estimations des pertes dues au striga sont environ 40 % du rendement de la culture, ce qui représente une perte annuelle de céréales d'une valeur de 2,9 à 7 milliards de dollars américain (Mboob et al, 1986 ; Saueborn et al, 1991). Les impacts négatifs du striga ont plusieurs implications sociologiques parmi lesquelles les migrations des paysans à la

recherche des zones indemnes de striga, la rotation obligatoire, l'abandon ou le changement régulier des techniques culturales (Riches et al, 1986).

Au Cameroun le Striga se retrouve dans la zone de savane sèche au Nord et à l'Extrême Nord. Dans cette zone, la plante parasite appelée striga s'attaque principalement au maïs et au sorgho.

Il est reconnu qu'aucune méthode à elle seule ne peut résoudre le problème du striga (Ogborn et al, 1984 ; Stewart et al, 1990 ; Parker et al, 1993). La lutte contre le striga utilise plusieurs méthodes qui sont parfois mis ensemble pour avoir une approche intégrée (Lagoke et al, 1995 ; Akanvou et al, 2003). Le désherbage manuel est la première méthode utilisée par les paysans pour réduire l'enherbement causé par le striga dans le champ (Lagoke et al, 1991). Cependant cette pratique stimule la prolifération du striga à cause de l'apparition de nouvelles pousses parfois plus nombreuses. L'utilisation des herbicides de post levée a été démontrée aussi comme un moyen de lutte contre le striga

#### **I.5.14. Maladies et les ravageurs du maïs**

##### **I.5.14.1. Maladies du maïs**

Une maladie du maïs est une perturbation physiologique de la plante qui provient de l'action d'un agent pathogène. Cette perturbation résulte de l'action de nuisance de l'agent pathogène et aboutit à des changements sur la plante qui sont les symptômes. Celles-ci peuvent être visibles à l'œil nu ou à l'aide des outils de diagnostic que sont la microscopie, la sérologie et les analyses moléculaires. Les maladies constituent l'une des contraintes principales à la production du maïs. Ces maladies réduisent non seulement les rendements, mais affectent aussi la qualité des grains. Les pertes mondiales de maïs dues aux maladies représentent 9 à 11 % de production (Shurlef et al, 1992 ; Oerke et al, 1994). Les pertes de rendements ont été estimées à environ 3 % en Europe (Cramer et al, 1967), 10-12 % en Inde (Payak et al, 1968), 5 % au Canada (Oerke et al, 1994) et 15-50 % au Cameroun (Delassus et al, 1968 ; Ayuk et al, 1982 ; Ngoko et al, 1994).

##### **I.5.14.2. Maladies fongiques**

Les maladies fongiques du maïs regroupent les brûlures de feuilles, les pourritures des racines des tiges, des épis et des graines, les mildious, les charbons et la rouille. Parmi les brûlures de feuilles, on retrouve : l'helminthosporiose causée par les champignons du genre

*Helminthosporium* qui a plusieurs espèces comme *l'helminthosporium turcicum*, *l'Helminthosporium rostratum* et *l'helminthosporium carborum* (Shurlef et al, 1992). Les autres agents des brûlures intègrent le *Bipolaris maydis*, le *Diplodia macrospora* et le *stenocarpella maydis* (*Diplodia maydis*) (Mac Gree et al, 1990 ; White et al, 2000).

#### **I.5.14.3. Maladies bactériennes**

Les bactérioses du maïs sont à l'origine des flétrissements et des taches foliaires. Parmi les bactéries qui affectent le maïs, on peut citer *Pantoea stewarti* (*Erwnia stervartu*), *Erwinia chrysantheni*, *Pseudomonas syringae*, *Pseudomonas andropogonis*, *Pseudomonas avenae* et *Corynebacterium nebraskense* (Shurlef et al, 1992 ; White et al, 2000).

Parmi ces bactéries, le *pantoea sterwati* cause la pourriture bactérienne la plus importante du maïs. Les symptômes de cette maladie apparaissent après la formation de la panicule sous la forme de longues striées verte ou jaune pâles, ayant des bords ondulés qui suivent généralement les nervures des feuilles. Ces striés se dessèchent rapidement et brunissent (White et al, 2000).

#### **I.5.14.4. Viroses du maïs**

Plusieurs types de viroses attaquent le maïs dans le monde (Shurlef et al, 1992). Marchand et al, (1994) ont signalé trois principales viroses en région tropicale : (1) la striure causée par le « maize streak virus » (MSV) transmise par les insectes du genre *Cicadulina* ; (2) Le stripe causé par le « maize stripe virus » (MS<sub>t</sub>V) et transmis par *Perigrinus maydis* ; (3) la mosaïque causée par le « maize mosaic virus » (MMV) transmise par *Perigrinus maydis*. Thottappilly et al, (1993) et Traoré et al, (1995) ont fait une évaluation des maladies virales du maïs an Afrique tropicales tandis que Traoré et al, (1997) se sont focalisé sur l'Afrique Occidentales et Centrale.

#### **I.5.14.5. Ravageurs du maïs**

La production de maïs est limitée par les dégâts des ravageurs. Ces ravageurs sont responsables d'une réduction de la production en grains. Parmi ces ravageurs, on peut citer les criquets puants (*Zonocerus variegatus*) les chenilles défoliatrices et principalement les lépidoptères foreurs parmi lesquelles les noctuelles *Busseola fusca* (Fuller), le *Sesamia calamistic* (Hups), les pyrales *Eldama saccharina* (walker) et *Massidia nigrivenella* (Ragonoot), (Hill et al, 1975 ; Aroga et al, 1987 ; Aroga et al, 1997). Les larves vivent à l'intérieur des tiges

ou des épis (Coulong et *al*, 1994). Les dégâts des foreurs de tige sur le maïs sont généralement de deux types : pendant la phase végétative, les larves en se nourrissant creusent des galeries circulaires autour des nœuds des tiges de jeunes pousses de maïs. La présence de ces galeries dans les entre-nœuds favorise la casse des tiges. Pendant la phase de fructification des plants, les larves déjà âgées s'attaquent aux épis et y creusent des galeries. la présence des orifices dans la tige ralentit la croissance du plant et perturbe la formation des graines aussi bien que la maturation de l'épi.

## **I.6. Insecticides de synthèse et produits biologiques pour le traitement des semences de maïs.**

### **I.6.1. Insecticides de synthèse pour le traitement des semences de maïs.**

Pour limiter les pertes post-récoltes, les insecticides de synthèse sont aujourd'hui les outils populaires de contrôle des ravageurs (Ngamo et *al*, 2007a). Les insecticides conventionnels sont des composés ou des préparations destinées à éliminer ou à limiter le développement des formes de vie et herbes nuisibles à l'Homme et à ses ressources. Leur application se fait soit par contact, soit par fumigation ou par pulvérisation (Nukenine et *al*, 2010). Le traitement par contact consiste à recouvrir les graines, l'emballage et les locaux de stockage d'une quantité d'insecticides qui agissent sur les déprédateurs dont l'effet est plus ou moins rapide et longue (Benayad et *al*, 2008). Les insecticides de contact recommandés sont uniquement utilisés : cas du malathion ou pirimiphos de méthyle (De Groot et *al*, 2004). La fumigation quant à elle consiste à traiter les graines d'un gaz toxique appelé fumigant. Il pénètre dans les graines, détruit les œufs, larves et nymphes qui s'y développent (Benayad et *al*, 2008). On distingue plusieurs groupes d'insecticides de synthèse parmi lesquels :

- Hydrocarbures chlorés ou organochlorés : Ce sont des composés assez complexes, stables et de faible volatilité, sont persistants à cause des résidus qu'ils laissent dans les denrées ou la nature. Ce sont les dérivés biphényles (le DDT, le dicofol, le métoxychlore) ;
- Hydrocarbures phosphorés ou organophosphorés : représentés par les esters organiques d'acide phosphorique ou de ces dérivés (parathion, bromosphos et malathion) ;
- Carbamates : composés stables à base d'acide carbamique (arbaryl, carbofurant) ;
- Pyréthroides représentés par la decaméthrine, la perméthrine et la resméthrine etc.

Toutefois, tous ne sont pas autorisés pour le traitement des denrées alimentaires. Les organophosphorés (malathion, pirimiphos, chlorpyriphos-éthyl) et les pyréthroides de synthèse

(bioesméthrine, deltaméthrine) sont les groupes autorisés. La deltaméthrine est autorisée dans la lutte contre *Helicoverpa armigera* ; le chlorpyrifos-éthyl contre les termites du manguiier (Guèye et al, 2011). Le malathion est l'insecticide homologué pour le contrôle des insectes dans des denrées stockées au Cameroun à l'instar de *S. zeamais*.

Au-delà de leur pouvoir protecteur, les substances chimiques de synthèse ont des limites dont l'impact sur l'environnement et sur les Hommes nécessitent une attention particulière. Ils entraînent la résistance chez les insectes, laissent des résidus toxiques (Kudachi et al, 2009 ; Zahra et al, 2011). La résistance est la capacité de l'insecte à survivre et à se reproduire en présence des doses élevées qui initialement limitent son développement. Ils entraînent la disparition des auxiliaires comme les parasitoïdes, les prédateurs des ravageurs des denrées stockées (Farid et al, 2006 ; Nguemtchouin et al, 2012), et surtout celle des pollinisateurs responsables de l'augmentation du rendement agricole. Ces substances de synthèse sévissent même dans les points de la biosphère qui n'ont subi aucun traitement insecticide, leur dégradation est extrêmement rare et la cinétique de disparition est presque nulle (Benayad et al, 2008). Au regard des nuisances, malgré les succès enregistrés, plusieurs autres formes de lutte contre les insectes ont été développées (Guèye et al, 2011).

## **I.6.2. Produits biologiques pour le traitement des semences de maïs.**

La lutte biologique interdit le recours aux substances de synthèse, elle s'effectue à l'aide de méthodes de contrôle naturels (utilisation d'autres organismes vivants pour combattre les organismes nuisibles aux plantes cultivées), mécaniques et de pratiques culturales. Si les pratiques de gestion biologique ne suffisent pas à prévenir la présence ou combattre les organismes nuisibles et les maladies, il est possible d'appliquer des substances biologiques ou botaniques ou d'autres substances permises dans les systèmes de production biologique (Guèye et al, 2011). La lutte biologique vise à préserver l'environnement et la diversité au sein de l'écosystème afin de garantir un bon état de santé (sols, plantes, animaux, Hommes).

### **I.6.2.1. Plantes aromatiques**

L'usage des plantes dans la conservation des récoltes a été pratiqué avant l'apparition des insecticides de synthèse pour leur effet répulsif, de contact ou fumigant (Guèye et al, 2011). Au Cameroun, 29 plantes appartenant à 17 familles dont les plus importantes sont les Poaceae avec 5 espèces, Labiaceae avec 5 espèces, Asteraceae avec 4 espèces, Annonaceae, Rutaceae et Fabaceae avec chacune 2 espèces sont utilisées par les paysans pour protéger les graines

entreposés (Ngamo et al, 2007a). Elles sont introduites dans les greniers avec les graines comme insectifuges ou pour tuer les insectes déjà présents dans les greniers (Ngamo et al, 2007a). La plupart de ces plantes sont annuelles, la plante entière ou leurs feuilles sont collectées et séchées. La plante peut être pérenne, mais c'est pendant la période de remplissage des greniers que les parties cibles sont récoltées pour être utilisées sous forme de poudre ou intacte (Ngamo et al, 2007a).

#### **I.6.2.2. Utilisation de la cendre**

Les poudres à action abrasive à l'image de la cendre ont été traditionnellement utilisées dans la conservation des récoltes (Guèye et al, 2011). Akob et al, (2007) ont montré que la cendre des feuilles de *Eucalyptus grandis* au bout de six mois protège le maïs contre *S. zeamais* à la dose de 20 g/2 kg, une réduction de la première fratrie avec un seul émergent et une perte en poids des graines de l'ordre 2,4 %. Ces poudres inertes ne laissent pas de résidus toxiques, ne laissent pas la possibilité de résistance aux insectes et sont faciles à manipuler. Ils entraînent la mort de l'insecte par dessiccation (Upadhyay et al, 2011). Cependant, l'efficacité des poudres inertes est meilleure aux fortes températures et aux basses humidités, dépendant de la denrée traitée et de l'insecte en question ( Vayias et al, 2009; Mutambuki et al, 2013).

#### **I.6.2.3. Poudres des plantes insecticides**

Les plantes connaissent de plus en plus leur utilisation dans le contrôle des insectes sous les tropiques où certaines espèces sont aussi utilisées en médecine (Ileke et al, 2011). L'usage des poudres des plantes pour la protection des graines contre les insectes a été pratiqué dans la Grèce antique (Ileke et al, 2012b). Leur valorisation réduit l'utilisation des substances de synthèse par les paysans et aide les producteurs locaux à mettre sur le marché les graines propres à la consommation (Ngamo et al, 2007a). Les poudres de *Azadirachta indica* et de *Alstonia boonei* ont causé 100 % de mortalité de *S. zeamais* aux doses de 5 ; 12,5 et 25 % pour 20 g de graines de blé pendant 72 heures d'exposition (Ileke et al, 2011). Parmi les quatre poudres de plantes insecticides testées, celle de *P. glandulosus* s'est révélée plus efficace avec 100 % de mortalité après 16 jours d'exposition à la dose de 40 g/Kg (Regnault-Roger et al, 1993). Cette poudre, après 14 jours d'exposition à 40 g/kg a supprimé l'émergence de la première fratrie de *S. zeamais* à 94,9 % (Nukenine et al,2011).

#### **I.6.2.4. Huiles essentielles**

Les huiles essentielles sont des métabolites secondaires que les plantes synthétisent pour se défendre contre les ravageurs phytophages et que l'on peut extraire pour divers usages. Seulement 12 des 29 plantes aromatiques utilisées dans la protection des graines au Nord-Cameroun peuvent produire des huiles essentielles (Ngamo et *al*, 2007a). Les huiles essentielles sont utilisées dès l'antiquité pour leurs propriétés médicinales. De part leurs principaux constituants aux propriétés répulsives et dissuasives, elles sont utilisées depuis longtemps pour protéger les graines entreposés (Regnault et *al*, 1993). Ces huiles contiennent un nombre considérable de familles biochimiques incluant les alcools, les phénols, les esters, les oxydes, les coumarines, les sesquiterpènes, les terpénols, les cétones, les aldéhydes, etc (Hamdani et *al*, 2012). Les huiles essentielles ne sont pas à confondre aux huiles végétales. Les huiles essentielles sont obtenues par expression (réservée aux agrumes) ou par distillation à la vapeur d'eau et ne possèdent pas d'acide gras, ni d'autre corps gras. Elles sont volatiles, réfringentes, hydrophobes et lipophiles, solubles dans les solvants des lipides (acétone, hexane, chloroforme) et dans l'huile, mais peu ou pas solubles dans l'eau (Benayad et *al*, 2008 ; Fanny et *al*, 2008). Une huile végétale est obtenue par pression et est constituée majoritairement de corps gras (Fanny et *al*, 2008).

En somme, cette partie du travail consacrée à la revue de la littérature nous a permis d'une part de présenter les plasmas ainsi que leurs applications en agriculture et d'autre part un état des lieux sur la culture du maïs, les agents pathogènes ainsi que les méthodes de conservation. Il ressort de ce travail que les plasmas ont de nombreuses applications dans l'agriculture. Le chapitre suivant abordera la description du matériel et des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail.

# CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES EXPERIMENTALES

Le but de ce chapitre est de présenter le matériel, les techniques analytiques ainsi que les protocoles expérimentaux utilisés.

Nous présentons en premier lieu, le matériel utilisé, le réacteur à plasma utilisé, les méthodes de caractérisation et d'analyses. Chemin faisant, nous présentons au passage les techniques de caractérisation des graines telles que, la spectroscopie IR, la microscopie électronique à balayage. Nous donnons également un aperçu de la mesure des paramètres physico-chimique (pH, STD, Conductivité,  $[\text{NO}_3^-]$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2]$ ), les variables de croissance telles que la longueur des racines, tiges, l'absorption d'eau par les graines de maïs, le diamètre au collet ainsi que le rendement.

En deuxième lieu, nous décrivons les protocoles expérimentaux utilisés pour le traitement des graines aux plasmas ainsi que les tests physiologiques (teneur en chlorophylle) et de pathogénicité qui consiste à analyser l'apparition des pathogènes sur les semences lorsqu'elles sont placées dans certaines conditions biologiques.

## **II.1. Matériel utilisé**

Dans cette partie, nous justifions le choix de la variété de maïs ATP-SR-Y (Acid Tolerance Population Streak Resistant Yellow) utilisé. Nous énumérons également les différents réactifs utilisés et présentons sommairement le réacteur glidarc.

### **II.1.1. Matériel Végétal**

Des semences de maïs (*Zea mays*) ont été produites à la Station Polyvalente de Recherche Agricole de Dschang (SPRAD). Les activités de suivi de la parcelle (des semis jusqu'à la récolte) se sont déroulées durant le mois de Mai en Septembre 2020. Pour les expériences, seules des semences saines sans dommage visible ni infection ont été sélectionnées et stockées dans des conteneurs en verre suivant les conditions de laboratoire (18-22 °C, 8-12 % d'humidité). Il s'agissait d'une variété composite ATP-SR-Y, la variété a été choisie en raison de son appréciation par les producteurs et son adaptabilité dans la zone agro-écologique de la forêt humide avec des précipitations monomodales (Zone III). La composition chimique des principales parties du grain sec est présentée dans le Tableau VI. Le péricarpe (la partie la plus externe de la graine de maïs) est caractérisé par une teneur élevée en fibres brutes (environ 86,7 %), principalement constituées d'hémicellulose (67 %), de cellulose (23 %) et de lignine (1 %) (Burge et al, 1989). Son épaisseur est d'environ 110  $\mu\text{m}$  (Waston et al, 1987).

**Tableau VI** : Composition chimique massique approximative (%) des principales parties du maïs (Burge et al, 1989) ; Waston et al, 1987).

| Composant chimique | Pericarpe | Endosperme | Germe |
|--------------------|-----------|------------|-------|
| Proteine           | 3,7       | 8,0        | 18,4  |
| Lipides            | 1,0       | 0,8        | 33,2  |
| Fibres brute       | 86,7      | 2,7        | 8,8   |
| Centres            | 0,8       | 0,3        | 10,5  |
| Amidon             | 7,3       | 87,6       | 8,3   |
| Sucre              | 0,3       | 0,6        | 10,8  |

### II.1.2. Caractéristique de la variété de maïs

La graine de maïs est formée d'un germe (embryon et cotylédon), d'un albumen et d'un péricarpe ou enveloppe fine et translucide. L'albumen est constitué essentiellement de graines d'amidon. Le contenu calorique moyen de tout repas à base de maïs est estimé à 3578 calories par kilogramme (FAO, 1993). Les caractéristiques de la variété sont présentées dans le Tableau VII et dans la figure 8.

**Tableau VII** : Caractéristiques de la variété couramment cultivée dans la Région de l'Ouest Cameroun (IRAD, 2012).

| Variétés | Couleur | Cycle de culture (JAS) | Type de semence   | Rendement (t/ha) |
|----------|---------|------------------------|-------------------|------------------|
| ATP-SR-Y | Jaune   | 115                    | Variété composite | 4-5              |



**Figure 8** : Photographie de la variété de maïs couramment cultivée dans la Région de l'Ouest Cameroun.

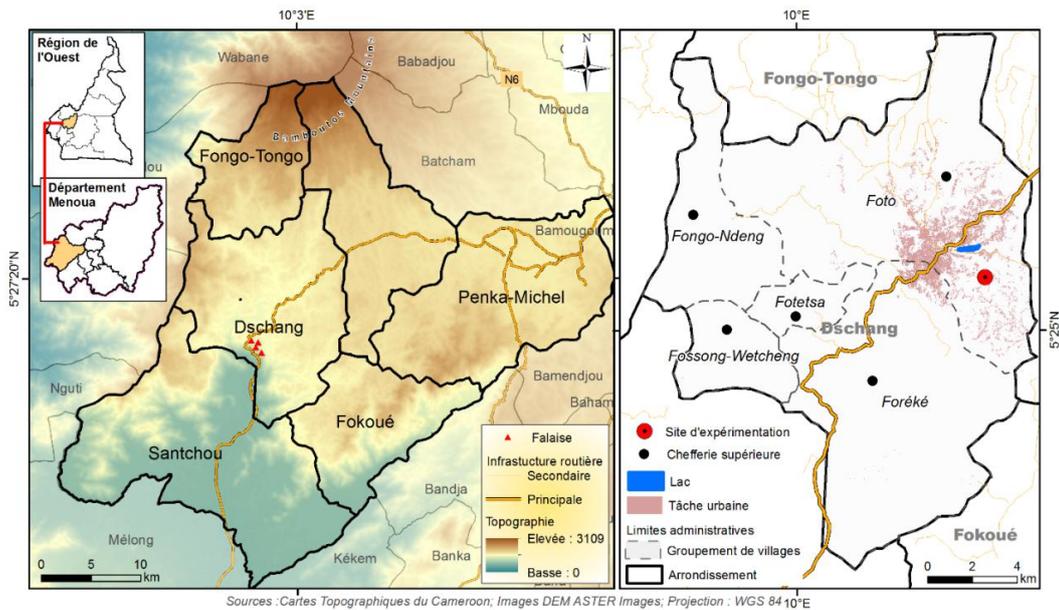
### **II.1.3. Description de la zone d'étude**

En langue locale, « Dschang » veut dire « Palabre », né de la colonisation allemande en 1903. Dschang est une ville historique, sous l'autorité allemande de 1884 à 1916, sous contrôle britannique de 1919 à 1920, et sous administration française jusqu'à l'accession du Cameroun à l'indépendance (1960). Son renouveau actuel est lié à l'implantation de l'université en 1993. Le recensement de la population annonce un chiffre de 83 000 habitants (INS, 2002).

#### **II.1.3.1. Localisation**

La ville de Dschang est située dans la région de l'Ouest du Cameroun, plus précisément dans le département de la Menoua dont elle est le chef lieu. Elle est comprise entre 5°25'-5°30' de Latitude Nord et 10°-10°5' de Longitude Est. Situé aux limites occidentales de la province de l'Ouest, Dschang est à environ 60 km de Bafoussam (45 mn), 300 km de Douala (4 heures) et environ 400 km de Yaoundé (5 heures). Cette ville est bâtie sur le versant Sud-est des Monts Bamboutos (2740 mètres), véritable barrière naturelle à l'Ouest. Elle s'ouvre au Sud-ouest par la rivière de la Menoua qui coule vers la plaine des Mbos. Enfin, à l'Est, elle est fermée par le massif du Bani qui culmine à plus de 1920 mètres.

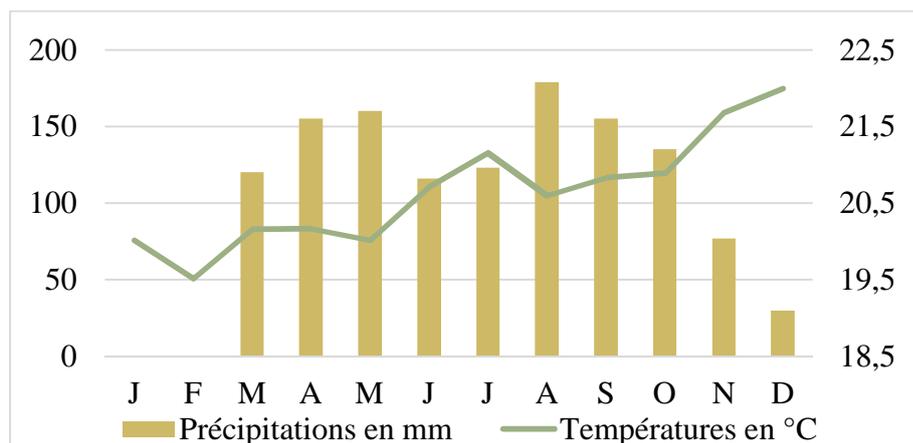
L'essai expérimental a été conduit dans l'enceinte de la Station Polyvalente de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement de Dschang, dont la localisation et les coordonnées géographiques sont indiqués ci-dessous.



**Figure 9** : Carte de localisation du site d'étude.

### II.1.3.2. Précipitations

L'étude s'est déroulée sur une parcelle qui subit un travail intense sans repos durant toute l'année et dont sa fertilité devient décroissante malgré l'utilisation des engrais. L'essai expérimental a été conduit dans l'enceinte de la Station Polyvalente de Recherche Agricole de Dschang (SPRAD) durant la période de Mai à Septembre 2020 (figure 10). Les précipitations ont oscillé entre 160 mm à 155 mm entre mai et septembre, avec un pic de 180 mm au mois d'août. La température moyenne était autour de 21 °C.

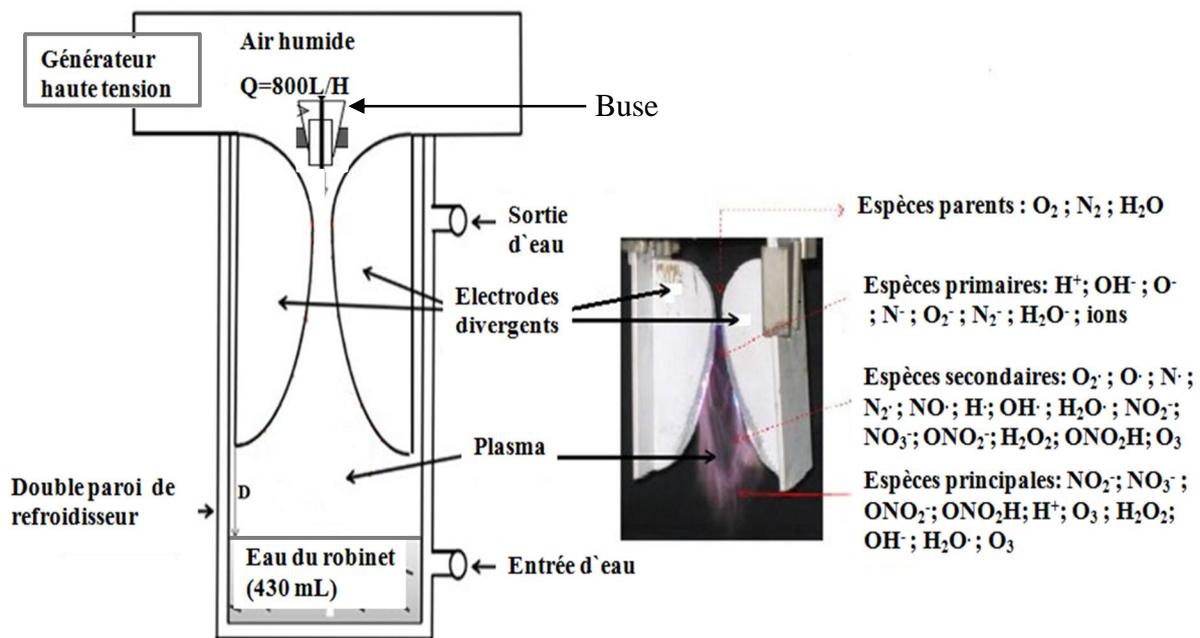


**Figure 10**: Diagramme ombrothermique durant l'essai (SPRAD, 2020).

### II.1.4. Réacteur glidarc

Il a été développé pour la première fois par le professeur Czernichowski de l'Université d'Orléans et s'obtient en appliquant une ddp alternative ou continue entre deux ou plusieurs

électrodes de profil continûment divergent (Czernichowski et al, 2001). Les électrodes sont disposées symétriquement autour d'un jet gazeux. Un arc électrique prend naissance au minimum d'écartement des électrodes et glisse le long de ces dernières générant ainsi des espèces excitées et des radicaux libres qui confèrent au plasma des propriétés chimiques particulières. Ce panache de plasma trempé lèche une cible et ses espèces réagissent à l'interface cible-plasma. Nous avons au cours de ce travail utilisé le réacteur semi-ouvert (réacteur de première génération) figure 11.



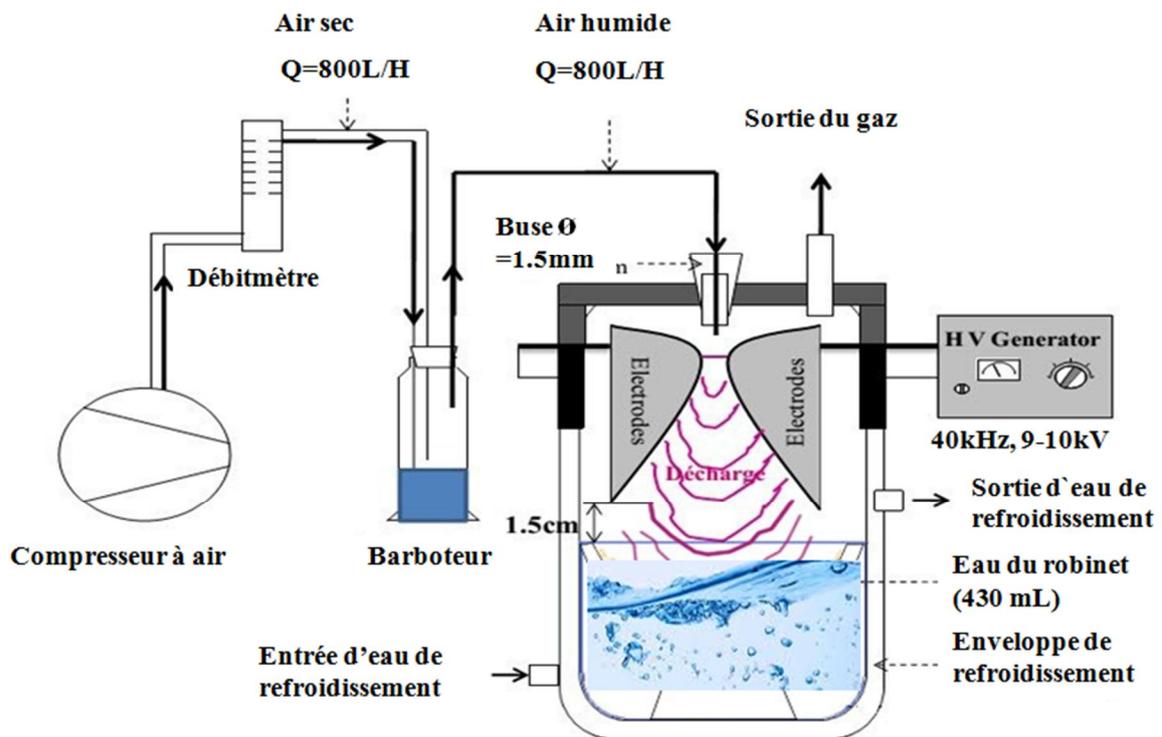
**Figure 11:** Schéma du réacteur de première génération, DDP = 10 kV, I=160 mA distance inter-électrode  $d = 2.5$  cm.

### II.1.5. Traitement des semences de maïs au plasma glidarc

Deux types de traitements ont été effectués : le traitement direct c'est-à-dire l'eau du robinet est exposée directement aux espèces du plasma dans le réacteur à plasma glidarc durant toute la durée du traitement (eau activée par plasma) ceci dans le but de produire des engrais azotés et les traitements indirects (post-décharge spatiale), ici la cible est placée dans un autre réacteur (réacteur secondaire) différent de celui où les espèces du plasma sont générées (réacteur primaire).

### II.1.6. Dispositif à plasma glidarc et procédure de traitement direct

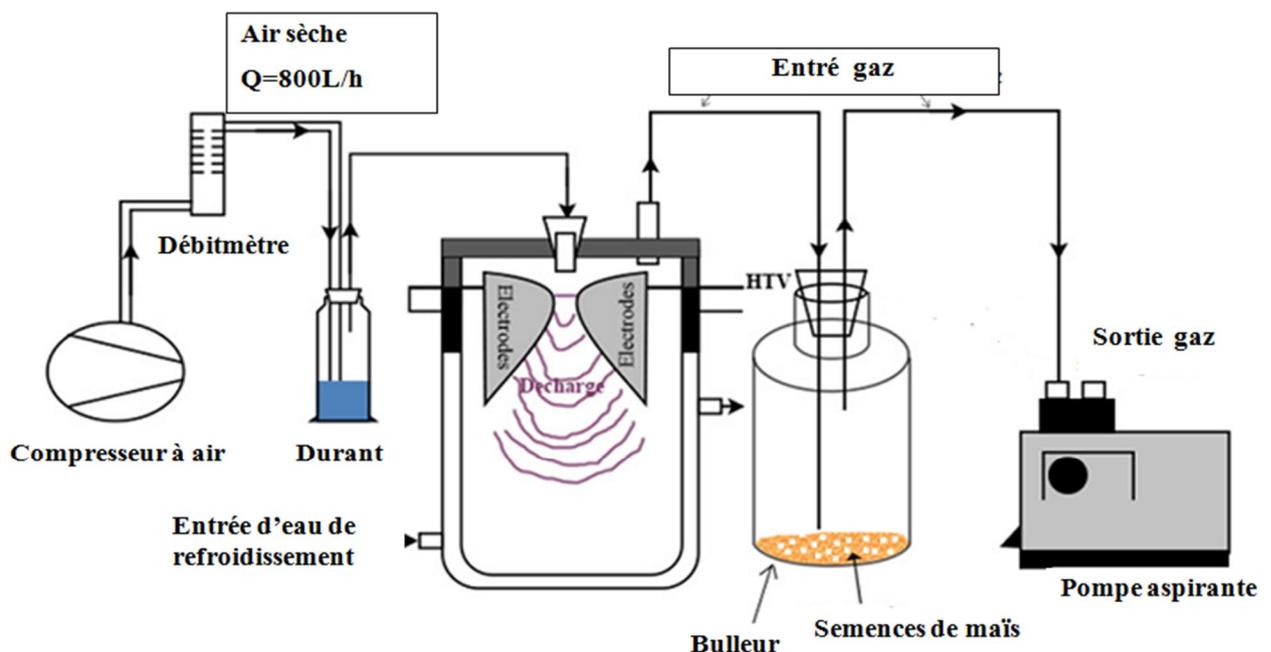
L'appareil expérimental utilisé est un cylindre contenant 430 mL d'eau du robinet, un réacteur en verre équipé d'une enveloppe de refroidissement à eau et un agitateur magnétique (Figure 12). Le dispositif de décharge coulissant maintenu par le couvercle comporte deux électrodes divergentes en aluminium, disposées symétriquement autour d'une buse à air humide selon le père fondateur Czernichowski et *al*, (1994). L'air humide est obtenu en faisant bouillonner le flux d'air fourni par un compresseur à travers une bouteille Durand remplie d'eau. Le débit de gaz est contrôlé par un débitmètre réglé à  $Q=800$  L/H. L'énergie est fournie par un générateur HV de 40 KHz, 9-10 kV. À cette fin, 430 mL d'eau du robinet ont été exposés au plasma pendant 300 et 900 secondes. Lorsque la décharge est arrêtée, La solution traitée est retirée du réacteur et les paramètres physico-chimiques sont évalués aussitôt. 360 mL d'eau traitées sont retirés de cette solution pour arroser les plantes à raison de 12 mL d'eau traitées par plants et ce deux fois par semaines aux mêmes heures jusqu'à 50 % de floraison mâle.



**Figure 12:** Schéma simplifié d'un réacteur à plasma glissant pour la production des engrais azotés (post décharge temporelle).

### II.1.7. Dispositif à plasma glidarc et procédure de traitement indirect

Le traitement au plasma a été effectué dans un réacteur glidarc schématisé à la figure 13. La description d'un réacteur à plasma glidarc commun peut être trouvée ailleurs (Tadom et al, 2018). Le réacteur de base utilisé dans cette thèse est constitué de deux électrodes divergentes en aluminium disposées dans un gaz à la pression atmosphérique et connectées à un transformateur HT SELFI. Le transformateur fournit une différence de potentiel d'environ 9-10 kV en conditions ouvertes pour un espacement des électrodes de 3 mm (600 V ; 160 mA en conditions de travail, ce qui fournit environ 100 W à la décharge). Les échantillons à traiter sont placés dans un réacteur en verre cylindrique de 500 mL équipé d'une enveloppe de refroidissement à eau (mode direct) ou dans la zone post-décharge spatiale (mode indirect).



**Figure 13** : Dispositif à plasma glidarc et procédure de traitement des semences de maïs (post décharge spatiale)

Les conditions de fonctionnement comprennent l'air humide comme gaz porteur à un débit de  $800 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , obtenu en faisant bouillonner le flux d'air fourni par un compresseur à travers un ballon Durand rempli d'eau. Les échantillons ont été traités en mode post-décharge spatiale : le gaz plasma provenant du réacteur est acheminé dans le barboteur contenant l'échantillon à traiter (Tamo et al, 2016). En laissant vide le cylindre de verre et en y associant un barboteur, un tuyau et un flexible de type pompe aspirante KNF NEUBERGER marque N86KT.18 avec une pression maximale de 2,5 bars, 50 graines de maïs sont introduites et répandues dans le

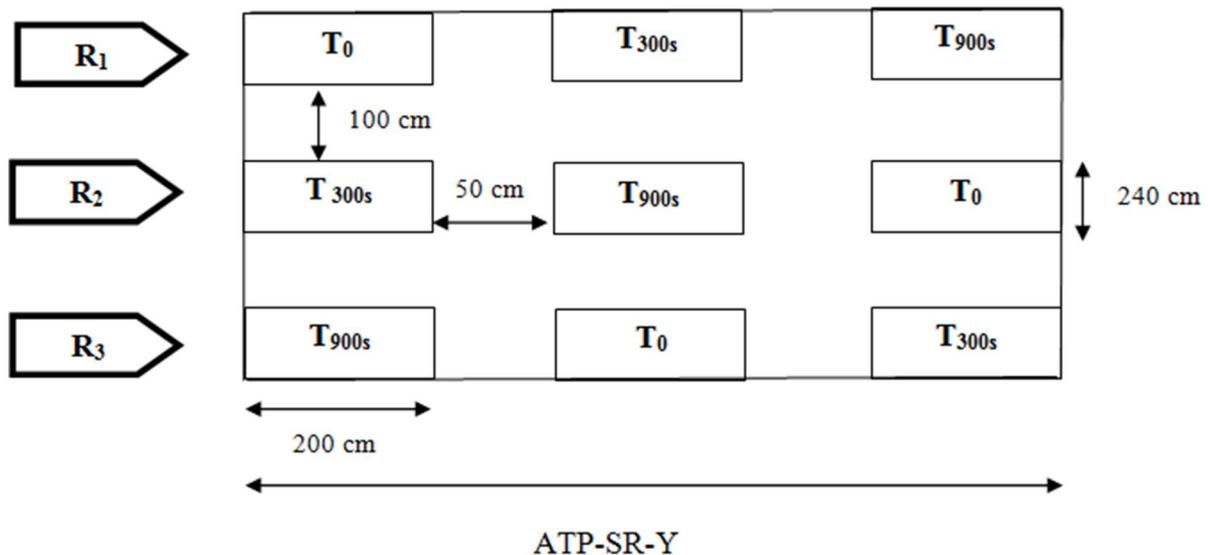
barboteur dans une expérience typique. Les gaz formés dans la phase plasma sont acheminés dans le barboteur (57 cm<sup>2</sup> de surface inférieure) à l'aide d'un tuyau en téflon de petit diamètre (environ 1 cm de diamètre et 1 m de longueur) et de la pompe d'aspiration. Le traitement en mode post-décharge spatiale a été préféré au mode direct (échantillon dans la première chambre en contact avec le panache de plasma) afin d'éviter tout effet thermique (bien que la variation de température soit également très modérée dans la première chambre) d'une part, et d'autre part pour tirer parti des espèces primaires et secondaires du plasma formé. En effet, nous avons précédemment montré, lors du traitement d'échantillons d'argile kaolinitique par le plasma Glidarc à air humide, que leur fonctionnalisation était plus prononcée pour les échantillons en post-décharge spatiale (Tamo et *al*, 2016 ; Sop-Tamo et *al*, 2018). Pour illustrer les effets du traitement, les graines ont été exposées pendant des durées de 300 et 900secondes.

## **II.2. Méthodes**

Cette section se subdivise en deux parties. La première concernela culture du maïs des semis jusqu'à la récolte en passant par le sarclo-buttage, la seconde est en rapport avec les méthodes de caractérisation, d'analyse et du rendement à l'hectare.

### **II.2.1. Dispositif expérimental de l'essai en champs**

Le dispositif expérimental utilisé pour la mise en place de l'essai sur la parcelle était le dispositif en bloc complètement randomisé avec trois répétitions. Le premier facteur est le temps d'exposition de l'eau du robinet au Plasma : le témoin T<sub>0</sub>, le traitement à T<sub>300s</sub>, le traitement à T<sub>900s</sub>. Le deuxième facteur est concentration des ions nitrate en solution après arrêt du réacteur. Neuf unités expérimentales ont été confectionné (Figure 14).



R1, R2, R3 = Répétition, T<sub>0</sub>, T<sub>300s</sub>, T<sub>900s</sub> = Temps de traitement par plasma

**Figure 14 :** Dispositif expérimental en bloc complet randomisé

Les graines de maïs ont été semées dans des poquets à raison de 2 à 3 graines par poquet. Les graines sont enterrées à 4-5 cm sur une superficie de 64,4 m<sup>2</sup> (mètres carrés). Le démariage des plantules a été effectué 15 jours après germination en vue de ne laisser que deux plantules par poquet. La distance entre les lignes est de 80 cm, et sur la ligne la distance entre les plants est de 40 cm. Au total nous avons 270 plants, soit 30 plants par unités expérimentales. Les activités de fertilisation par l'eau activée se sont déroulées deux fois par semaines aux mêmes heures jusqu'à 50% de floraison mâle. Un désherbage régulier a été effectué pendant la phase végétative de la culture pour assurer la protection des jeunes plantules contre les attaques des insectes. Deux séries de mesures de paramètres ont été réalisées : une en phase végétative et l'autre à la récolte (Figure 15).



**Figure 15** : Dispositif expérimental sur une superficie de 64,4 m<sup>2</sup> (mètres carrés)

## **II.2.2. Méthodes de caractérisation, d'analyse et de traitement au plasma glidarc**

### **II.2.3. Spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (FTIR)**

La spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (IRTF) est une classe de spectroscopie qui traite de la région infrarouge du spectre électromagnétique. Elle a été employée dans ce travail pour déterminer, identifier ou confirmer les groupes fonctionnels présents sur les pulpes des graines de maïs traitées et celle non traitées.

#### **Principe**

La spectroscopie infrarouge exploite le fait que les molécules possèdent des fréquences spécifiques pour lesquelles elles tournent ou vibrent en correspondance avec des niveaux d'énergie discrets (modes vibratoires). Le principe IR est basé sur le principe que les vibrations moléculaires se produisent dans la région IR du spectre électrochimique et des groupes fonctionnels ont des fréquences de vibration caractéristiques. Elles consistent à mettre en contact d'un cristal (ZnSe, Ge, Si, Diamant), l'échantillon à analyser. Le faisceau IR se propage dans le cristal ; si l'indice de réfraction du cristal est supérieur à celui de l'échantillon, alors le faisceau subit des réflexions totales au-delà d'un certain angle d'incidence à l'interface échantillon/cristal à l'exception d'une onde dite onde évanescente qui émerge du cristal et est

absorbée par l'échantillon. C'est cette onde qui est responsable du spectre IR observé. L'appareil utilisé dans ce travail est de marque BRUKER alpha-p disponible au Laboratoire de Chimie Physique et Analytique Appliquée de l'Université de Yaoundé I et le solvant est l'éthanol pur. La gamme de nombre d'onde balayé varie de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Ce faisant, un faisceau de lumière infrarouge à travers un crystal de diamant de façon à ce qu'il se réfléchisse au moins une fois dans la surface interne du crystal en contact avec l'échantillon. La correction des lignes de base des spectres obtenus a été effectuée en utilisant l'algorithme ATR incorporé dans un package de logiciel IRTF nommé OPUS. Un modèle linéaire a été choisi. Toutes les analyses IR ont été effectuées à température ambiante et ont été répétées 6 mois après ; question de vérifier la durabilité des modifications due au plasma.

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) a été utilisée pour caractériser la présence de groupes chimiques spécifiques sur la pulpe des graines de maïs avant et après le traitement au plasma. L'analyse FTIR a été réalisée en mode transmission sur poudre (07 scans) sur le spectre deux de Perkin Elmer Instruments (UK) fonctionnant dans la gamme de longueurs d'onde de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  avec une résolution de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

#### **II.2.4. Microscopie Électronique à Balayage (MEB)**

Elle a été effectuée à l'aide d'un microscope Electronique à Balayage qui est un instrument scientifique permettant de réaliser des images de la surface d'objets en 3 dimensions avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre (milliardième de mètre). La résolution d'un instrument de grossissement est définie par la taille minimale détectable par l'œil humain sur l'image produite par cet instrument. Ceci signifie qu'une image produite par un MEB permet de différencier distinctement 2 points séparés de moins d'un nanomètre.

#### **Fonctionnement de la MEB**

La MEB n'utilise plus la lumière comme vecteur pour « voir » mais un faisceau d'électrons comme son nom le laisse suggérer car la longueur d'onde des faisceaux d'électron est beaucoup plus petite que celle des photons. De plus, le rayon d'un faisceau d'électron peut avoisiner le nanomètre. La SEM a une résolution qui se situe entre 0,4 et 20 nanomètres (soit 500 fois plus que le meilleur microscope optique réalisable).

## **Principe et préparation de l'échantillon**

Les échantillons ont été métallisés, c'est-à-dire recouverts d'une fine couche de carbone, cette couche métallique du fait de son épaisseur va empêcher la détection de détails très petits. Le principe général est le suivant : l'échantillon à observer est balayé par un faisceau électronique et les électrons secondaires de très faible énergie qui sont produits suite au bombardement de l'échantillon sont détectés. Ces électrons secondaires sont amplifiés, puis interprétés pour reconstruire une image en fonction de l'intensité du courant électrique produit. La MEB réalise donc une topographie de l'échantillon à analyser, c'est pourquoi elle fournit des images en noir et blanc où chaque nuance de gris est le résultat de l'intensité du courant détecté. Une MEB est constituée des éléments suivants : - Un canon à électron qui envoie un faisceau d'électrons (source d'électrons primaires). - Une lentille magnétique qui focalise les électrons comme peut le faire une lentille optique avec la lumière de manière à obtenir un faisceau très fin et focalisé. - Des bobines de balayage permettant de balayer la surface de l'échantillon à observer avec le faisceau d'électrons. Ces bobines sont positionnées perpendiculairement de manière à faire parcourir des lignes au faisceau de la même manière que dans une télévision. - Une pompe à vide permettant de faire le vide dans l'enceinte où se trouve l'échantillon. En effet, pour obtenir une mesure précise, il est important de faire le vide dans l'enceinte (environ  $10^{-3}$  Pascal). - Un détecteur permettant de détecter les électrons secondaires. Un détecteur d'Everhart Thornley est généralement utilisé. Les électrons secondaires sont « captés » grâce à un champ électrique positif d'environ 500 Volts de manière à diriger les électrons vers un scintillateur convertissant ces derniers en photons. Les photons ainsi produits sont envoyés vers un photomultiplicateur via une fibre optique pour retransformer les photons en un nombre important d'électrons qui sera mesurable par un dispositif électronique classique. Ce type de détecteur est utilisé pour faire de l'imagerie en électron secondaire mais il existe d'autres techniques d'imagerie comme l'imagerie en diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) ou l'imagerie en courant d'échantillon (EBIC).

## **Les applications**

Afin d'évaluer les éventuels changements de morphologie après le traitement au plasma, une imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée sur trois séries de graines : les graines sans traitement (contrôle), les graines traitées par plasma pendant 300 s, et les graines traitées par plasma pendant 900 s. La production des images MEB du péricarpe en utilisant un appareil de marque Philips FEI XL  $\gamma$ 0 FEG (« Field Emission Gun ») équipé d'un

canon à émission de champ. Les échantillons non recouverts de métal ont été exposés à des électrons ayant une tension d'accélération de 3 et 5 kV.

### II.2.5. Test d'absorption d'eau

Cent graines de maïs traitées au plasma (300 et 900 s) et non traitées (0 s) ont été stockées dans des bocaux en verre avec de l'eau distillée et laissées imbiber à une température de laboratoire de 25°C pendant 36 heures. Les graines ont été séchées et pesées toute les 6 heures. Une balance électronique analytique (SARTORIUS 1264MP, Allemagne) d'une précision de 0,1 mg a été utilisée à cet effet. La quantité d'eau absorbée a été déterminée à partir de l'augmentation réelle du poids des graines. L'absorption d'eau (WA, %) peut être exprimée par l'équation suivante :

$$WA = \frac{(FW - DW)}{DW} \times 100 \quad (41)$$

Avec WA : L'absorption d'eau, FW : Le poids frais des échantillons stockés dans l'eau distillée, DW : Le poids des échantillons secs.

### II.2.6. Test de pathogénicité

Le test de pathogénicité consiste à analyser l'apparition de pathogènes sur les semences lorsqu'elles sont placées dans certaines conditions biologiques. À cette fin, l'analyse des agents pathogènes a été effectuée selon le protocole décrit par Zhu *et al*, (2001), Djeugap *et al*, (2006). Au total, 200 graines en 4 répétitions de 50 graines ont été désinfectées avec une solution hypochlorite de sodium NaClO 5 % pendant 5 minutes, puis traitées à différents temps de traitement par plasma (300 et 900 s). Après le traitement par plasma 50 graines, pour chaque temps de traitement (0, 300, 900 s) ont été divisées en 5 répétitions de 10 graines. Les 10 graines ont été semées dans une chambre humide constituée d'une boîte de Pétri en verre de 9 cm de diamètre, tout en étant protégées de toute contamination ultérieure (milieu stérile). Les boîtes de Pétri contenaient du papier buvard trempé dans de l'eau distillée stérilisée. Après 5 jours d'incubation à 22 °C, des agents pathogènes se sont développés tout autour des graines. Le traitement de contrôle a été effectué sur 50 graines non traitées de la même manière que celle décrite ci-dessus. A la fin de la période d'incubation, les graines sont observées une par une pour l'analyse de la croissance des champignons à leur surface. Le degré d'infection total (ID, %) peut alors être calculé par l'équation suivante :

$$ID = \frac{SI}{ST} \times 100 \quad (42)$$

Avec ID : degré d'infection, SI : nombre de graines infectées, ST : nombre total de graines.

### II.2.7. Test de germination

Le dispositif expérimental utilisé pour mettre en place notre essai en laboratoire était le dispositif en bloc entièrement randomisé avec quatre répétitions. Les graines ont été placées dans des boîtes de Pétri stériles (diamètre de 20 cm) contenant du papier buvard humidifié avec de l'eau distillée stérile dans des conditions de laboratoire (25 °C, 8-12 % d'humidité). Pendant la période de germination, 5 mL d'eau distillée stérile ont été ajoutés aux boîtes de Pétri toutes les 6 heures afin de maintenir l'environnement toujours humide. Quatre cents graines ont été semées à raison de quatre répétitions de 100 graines par traitement. Le substrat utilisé est du papier buvard et la méthode utilisée est le dessus du papier (TP). Sept (7) jours plus tard, le taux de germination (GR, %) a été calculé par l'équation suivante les règles (ISTA, 2018) sur les essais des semences :

$$GR = \frac{SG}{ST} \times 100 \quad (43)$$

Avec

GR : taux de germination, SG : nombre de graines germées, ST : nombre total de graines.

NB : la graine était considérée comme germée lorsque la longueur de la panicule était de 1 cm)

Le test de croissance précoce des graines a été déterminé en mesurant la longueur de la pousse et la longueur de la racine. La longueur des racines et des pousses a été observée quotidiennement. Cependant, il était difficile de déterminer la longueur des racines au début de la croissance, les racines étant très fragiles à redresser pour une mesure correcte. Par conséquent, la longueur des racines et des pousses n'a été mesurée qu'après le 10<sup>ème</sup> jour de culture.

### II.2.8. Analyse de la couleur des graines

Les changements de couleur sur les graines de maïs ont été observé à l'œil nu.

### II.2.9. pH-métrie

Les mesures de pH ont été effectués à partir d'un multimètre à affichage numérique de marque HANNA HI 9811-5 pH/°C/EC/TDS, METER (annexe 1). Avant toute mesure, on étalonne préalablement le pH-mètre à l'aide de solutions tampons ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{H}_2\text{NaPO}_4$ , pH= 6,85 et/ou  $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ , pH= 4,01).

### II.2.10. Conductivité et sels totaux dissous

Le multimètre HANNA tel que décrit plus haut peut effectuer plusieurs types de mesures. La mesure de ces deux paramètres au sein de différentes solutions ont également été prises par cet appareil.

### II.2.11. Détermination de la concentration des ions nitrates

La concentration des nitrates dans chaque solution a été déterminée à l'aide d'un kit de dosage colorimétrique (annexe 1) : Nitrate test, elle se fait semi-quantitativement par comparaison visuelle de la zone réactionnelle de la bandelette-test avec les zones d'une échelle colorimétrique. En plus sur chaque bandelette il y'a une deuxième zone réactionnelle (zone d'alerte) qui se colore en présence des ions nitrites. Le mode opératoire est le suivant :

- Plonger les deux zones réactionnelles de la bandelette-test 1seconde dans l'échantillon préparé.
- Secouer la bandelette pour en éliminer l'excédent de liquide et, après 1 minute, identifier la zone colorée de l'étiquette se rapprochant le plus de la zone réactionnelle  $\text{NO}_3^-$ .
- Lire le résultat correspondant en mg/l de  $\text{NO}_3^-$  ou en  $\text{NO}_3\text{-N}$ .
- Faire ensuite une conversion pour avoir la valeur exacte.

#### Conversion

Teneur **cherchée** = teneur **donnée** × facteur de conversion

|                                |                                 |       |
|--------------------------------|---------------------------------|-------|
| mg/L de $\text{NO}_3\text{-N}$ | mg/L de $\text{NO}_3^-$         | 0.226 |
| mg /L de $\text{NO}_3^-$       | mg/L de $\text{NO}_3\text{- N}$ | 4.43  |

### II.2.12. Détermination de la concentration du Peroxyde d'hydrogène

Le peroxyde d'hydrogène a été dosé par la méthode colorimétrique au titane selon la réaction suivante :  $\text{Ti}^{4+} + \text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{TiO}_4 + 4\text{H}^+$  (Eisenberg et *al*, 1943 ; Hong et *al*, 2009)

Il se forme un complexe jaune de formule  $[\text{TiOH}_2\text{O}_2]^{2+}$  dont le maximum d'absorption est située à 410 nm. La méthode consiste à introduire dans des fioles jaugées de 25 mL

-2 mL d'une solution de  $\text{TiCl}_4$  préparée dans  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2N (10 mL de  $\text{TiCl}_4$  dans 1 L de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2N),

-2 mL d'une solution d'acide sulfurique (36 N),

- VE mL de prise d'essai jusqu'au trait de jauge.

L'absorbance est mesurée à 410 nm dans une cuve de 1 cm d'épaisseur après stabilisation de la coloration ( $\approx 20$  minutes). A partir du coefficient d'absorption molaire du complexe ( $\epsilon = 695 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), déterminé par étalonnage, les concentrations en  $\text{H}_2\text{O}_2$  dans les échantillons sont calculées à l'aide de la relation suivante :

$$[\text{H}_2\text{O}_2] (\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}) = \text{Abs} \times \text{VT} \epsilon \times \text{VE} \times l \quad (44)$$

Abs : Absorbance de l'échantillon après soustraction de la valeur du blanc,

VT : Volume total de la fiole jaugée (mL),

VE : Volume de la prise d'essai (mL),

l : épaisseur de la cuve,

$\epsilon$  : coefficient d'absorption molaire.

### II.2.13. Détermination de la hauteur des plants

La hauteur des plants a été mesurée à l'aide d'un décimètre et à partir du collet. Les données de trente (30) plants en 3 répétitions ont été collectées. La hauteur moyenne a été calculée à partir de la hauteur des dix plants échantillonnés dans chaque unité expérimentale.

#### **II.2.14. Détermination de la largeur des feuilles**

Elle s'est effectuée toujours à l'aide d'un décimètre sur les trente (30) plants et sur chaque feuille allant d'un bout à l'autre. La moyenne a été obtenue à partir de la largeur des dix plants échantillonnés au sein chaque unité expérimentale.

#### **II.2.15. Détermination du diamètre au collet**

Le diamètre au collet a été mesuré un mois après semis sur chaque plant à l'aide d'un pied à coulisse à affichage numérique de marque Electronic Digital CAUPER (annexe 1). Le diamètre moyen de la tige au niveau du collet a été obtenu à partir des diamètres au collet des dix plants échantillonnés dans l'unité expérimentale.

#### **II.2.16. Détermination de la teneur en chlorophylle des feuilles**

La teneur en chlorophylle des feuilles a été prise à l'aide d'un chlorophylle-mètre à affichage numérique de marque SPAD-502 (annexe 1). Les valeurs ont été mesurées sur trente (30) feuilles choisis de manière aléatoire le 30<sup>ème</sup> jour après semis.

#### **II.2.17. Rendement**

Pendant la phase de récolte qui marque la fin de l'essai, les plants ont été récoltés, les plantes ont été sélectionnées de façon aléatoire sur chaque parcelle élémentaire et dans chaque bloc, soit un total de trente (30) plantes par traitement ont été despathés, séchés à l'étuve à une température de 30 °C pendant une semaine, ensuite les épis ont été pesées à l'aide d'une balance de marque Sartorius A.C de précision 0.0001g pour déterminer le poids frais par plante. Les plants ont été séchées à l'étuve et pesées à nouveau afin d'obtenir le poids sec. Ainsi, le rendement en kilogramme de maïs par hectare (Rd) s'est calculé en sous-parcelles traitées et sous-parcelles témoin par la formule suivante (N'Goran et al, 2000 ; Sveenjak et al, 2006).

$$Rd(t/ha) = \frac{PGEp \times 10000m^2}{0,8 \times 0,4m^2} \quad (45)$$

PGEp= poids des grains secs de maïs par pied pesés à l'aide de la balance sartorius de précision 0,001g

$$0,8 \times 0,4m^2 = US$$

## **II.3. Analyses de sol du site expérimental**

### **II.3.1. Méthodes d'analyse des substrats**

Les analyses physico-chimiques des substrats ont été réalisées dans le laboratoire des sciences du sol et de l'environnement de l'Université de Dschang selon la méthode internationale de Pauwels et *al*, (1992). Les variables analysées au laboratoire sont les suivantes : la granulométrie (argile, limon, et sable), le pH, la matière organique (MO), le carbone organique (CO), les bases échangeables, l'acidité échangeable ( $H^+ + Al^{3+}$ ), la capacité d'échange cationique (CEC), l'azote total (N), la conductivité électrique et le phosphore échangeable (P).

### **II.3.2. Granulométrie**

#### **Principe**

La distribution pondérale des différentes fractions texturales (sables, limons, argiles) a été déterminée par une analyse mécanique. La procédure consistait en premier lieu à éliminer la matière organique du sol par oxydation avec l'eau oxygénée ( $H_2O_2$  35% p/p), sous l'effet d'un chauffage doux (à la plaque chauffante). Cette opération était suivie par la destruction des potentiels calcaires et la désagrégation des ciments (sesquioxydes amorphes) par l'acide chlorhydrique (HCl 0,2 N) porté à ébullition dans le mélange puis retourné dans l'éprouvette graduée de 1000 mL. Après agitation à l'aide d'une tige cylindrique, la fraction limon + argile a été prélevée à 10 cm à l'aide d'une pipette graduée de 20 mL après 50 secondes. La fraction argileuse a été prélevée aussi à 10 cm après 2 heures de temps. Après différents calculs, le pourcentage de la fraction sableuse a été déduit du pourcentage de limon et de l'argile. Les classes texturales ont été trouvées par l'usage du Triangle textural de la FAO, une fois les proportions des différentes fractions texturales calculées.

### **II.3.3. Acidité**

#### **Principe**

Le pH du sol a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre (de marque Pen-type pH meter). Deux types de pH ont été mesurés (pH- $H_2O$  et pH-KCl). Le pH- $H_2O$  (acidité actuelle) a été mesuré 24 heures après avoir mélangé 10 g de chaque échantillon de sol dans 25 mL d'eau distillée. Le pH-KCl (acidité potentielle ou totale) a été mesuré 10 minutes après avoir introduit 10 g de

chaque échantillon de sol dans 25 mL de solution de KCl 1N et agité. L'acidité actuelle a été appréciée suivant le Tableau VIII ci-dessous.

**Tableau VIII** : Appréciation de l'acidité du sol (Beernaert et al, 1992).

| Niveau             | Valeur du pH des substrats |
|--------------------|----------------------------|
| Très acide         | < 4,0                      |
| Acide              | 4,0 -5,3                   |
| Modérément acide   | 5,3 - 6,0                  |
| Légèrement acide   | 6,0 – 7,0                  |
| Modérément alcalin | 7,0 – 8,5                  |
| Alcalin            | > 8,5                      |

### II.3.4. La matière organique et le carbone organique

#### Principe

Le dosage de la matière organique a été réalisé par la méthode de Walkley et Black (1934). Cette méthode est basée sur l'oxydation du carbone organique par le dichromate de potassium ( $K_2Cr_2O_7$ ) en milieu acide ( $H_2SO_4$ ). Le titrage de retour de l'excès de  $K_2Cr_2O_7$  par le sulfate ferreux ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) permet de calculer la quantité de dichromate qui a été neutralisée par le carbone organique (CO). Le point d'équivalence est indiqué par le virage de la diphénylamine  $[(C_6H_5)_2NH]$  du violet au vert. La relation empirique ci-dessous permet de déterminer la MO en fonction du CO :

$$MO = CO \times 1,724 \quad (46)$$

Le taux et la qualité de la matière organique défini par le rapport C / N ont été appréciés suivant les Tableaux IX et X.

**Tableau IX** : Appréciation du taux de la matière organique (Beernaert et al, 1992).

| Niveau      | Valeur du taux de la M O |
|-------------|--------------------------|
| Très faible | < 1,0                    |
| Faible      | 1,0 -2,0                 |
| Moyen       | 2,0 – 4,2                |
| Elevé       | 4,2 – 6,0                |
| Très élevé  | > 6,0                    |

**Tableau X** : Appréciation de la qualité de la matière organique (Beernaert et al, 1992).

| Qualité     | Valeur (C / N) |
|-------------|----------------|
| Très pauvre | >20            |
| Pauvre      | 14 – 20        |
| Bonne       | 10 – 14        |
| Très bonne  | < 10           |

### II.3.5. Azote total

#### Principe

La détermination de l'azote total a été faite par la méthode de Kjeldahl et *al*, (1992). Elle consiste en la minéralisation complète de l'azote organique par traitement à chaud avec un mélange d'acide sulfurique concentré et d'acide salicylique. La minéralisation est accélérée par l'emploi d'un catalyseur (cuivre sulfate + sélénium) et par l'augmentation de la température d'ébullition en ajoutant du potassium sulfate. La minéralisation est suivie d'une distillation par entraînement à la vapeur de l'azote sous forme de  $\text{NH}_3$  ; après alcalinisation de l'extrait minéralisé avec de la soude (NaOH). Le distillat est capté dans l'acide borique ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) et ensuite titré avec l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique dilué (0,01N). 2 g de terre fine sont considérés à cet effet comme prise d'essai. L'appréciation du taux d'azote total est indiquée par le Tableau XI.

**Tableau XI** : Appréciation du taux d'azote total (N) (Euroconsult et al, 1989).

| Niveau      | Valeur de N (%) |
|-------------|-----------------|
| Très faible | < 0,050         |
| Faible      | 0,050 – 0,125   |
| Moyen       | 0,125 – 0,225   |
| Elevé       | 0,225 – 0,300   |
| Très élevé  | > 0.300         |

### II.3.6. Bases échangeables et capacité d'échange cationique

#### Principe

La méthode utilisée permet d'extraire les bases échangeables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) et de déterminer la CEC à pH 7. Elle se décline en trois étapes :

- L'extraction des bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) à l'acétate d'ammonium ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) à pH7 ; grâce aux ions  $\text{NH}_4^+$  qui saturent le complexe et libèrent les cations basiques ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) qui seront ensuite dosés ;
- Lavage de la terre à l'alcool (Ethanol à 95%) afin d'éliminer la solution saturante de  $\text{NH}_4^+$  remplissant les porosités ;
- Et en fin dosage de  $\text{NH}_4^+$  après désorption quantitative par le  $\text{K}^+$ .

Les bases extraites dans la première étape ont été dosées par complexométrie avec l'EDTA (Ethylène Diamine Tétra- Acide acétique), pour le cas du calcium et du magnésium ; alors que le potassium et le sodium ont été dosés par la Spectrophotométrie à flamme. La solution de  $\text{NH}_4^+$  obtenue à l'étape 2 par lavage à l'alcool est traitée au KCl 1 M. L'ammonium est ensuite dosé par distillation Kjeldahl et titrage avec de l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,01N) ou l'acide Chlorhydrique (HCl 0,01 N). La teneur du sol en bases échangeables a été appréciée suivant le Tableau XII.

**Tableau XII** : Norme d'appréciation de la teneur du sol en bases échangeables (Euroconsult et al, 1989).

| Niveau      | $\text{Ca}^{2+}$<br>(méq/100g) | $\text{Mg}^{2+}$<br>(méq/100g) | $\text{K}^+$<br>(méq/100g) | $\text{Na}^+$<br>(méq/100g) |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Très élevé  | > 20,0                         | > 8,0                          | > 1,2                      | > 2,0                       |
| Elevé       | 10,0 – 20,0                    | 3,0 – 8,0                      | 0,6 -1,2                   | 0,7 – 2,0                   |
| Moyen       | 5,0 – 10,0                     | 1,5 – 3,0                      | 0,3 – 0,6                  | 0,3 – 0,7                   |
| Très faible | < 2,0                          | < 0,5                          | < 0,1                      | < 0,1                       |

### II.3.7. Phosphore assimilable par la méthode de Bray II

#### Principe

Déterminé par la méthode Bray II et *al*, (1945). Celle-ci combine l'extraction du phosphore en milieu acide (HCl 0,1 N) à la complexation par le fluorure d'ammonium (NH<sub>4</sub>F 0,03 N) et de l'aluminium lié au phosphore. Le dosage du phosphore extrait a été ensuite effectué par spectrophotométrie avec le bleu de molybdène à l'aide d'un Spectrophotomètre d'Absorption Moléculaire ou colorimètre de marque (searchtech). La longueur d'onde utilisée est de 665 nm

Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode Bray II. Celle-ci combine l'extraction du phosphore en milieu acide (HCl 0,1 N) à la complexation par le fluorure d'ammonium (NH<sub>4</sub>F 0,03 N) de l'aluminium lié au phosphore. Le dosage du phosphore extrait a été ensuite effectué par spectrophotométrie avec le bleu de molybdène à l'aide d'un Spectrophotomètre d'Absorption Moléculaire ou colorimètre de marque (searchtech). La longueur d'onde utilisée est de 665 nm. Sa teneur en phosphore assimilable a été appréciée suivant le Tableau XIII.

**Tableau XIII** : Appréciation de la teneur en phosphore assimilable (Bray II et al, 1945).

| Niveau      | Valeur (ppm) |
|-------------|--------------|
| Très faible | < 7,0        |
| Faible      | 7,0 – 16,0   |
| Moyen       | 16,0 – 46,0  |
| Elevé       | > 46         |

#### Analyse statistique

Toutes ces données sont basées sur la moyenne de quatre répétitions utilisant le logiciel Microsoft Excel version 2013. L'analyse des variances a été effectuée à l'aide de l'ANOVA et les différences ont été considérées comme significatives pour  $P < 0,05$ . Les écarts types ont été

calculés. Dans les figures, l'écart des valeurs est représenté par des barres d'erreur représentant les écarts types des moyennes.

## **Conclusion**

Le but de ce chapitre était de présenter les différentes méthodes d'analyse et les procédures de préparation des échantillons. Il a également été décrit la technique de traitement par plasma d'air humide. Il ressort qu'en dépit de la mise en œuvre facile de la décharge électrique glissante, la préparation des solutions à traiter reste très délicate car elle conditionne les résultats analytiques. Le chapitre suivant présente les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les interprétations afférentes.

# CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

## **Introduction**

Dans ce chapitre, il est question de présenter et de discuter les différents résultats obtenus pour toutes les expériences menées dans le cadre de cette thèse. En premier ressort, on étudiera les paramètres physico-chimiques du sol, puis l'influence du traitement plasma de type glidarc en mode post décharge temporelle sur les paramètres physico-chimiques d'une part et d'autre part sur certains paramètres de croissances sans toutefois oublier le rendement. En second ressort il sera question pour nous d'étudier l'influence du traitement plasma de type glidarc en mode post décharge spatiale (transfert des gaz) sur l'inhibition des champignons des semences de maïs.

### **III.1. Résultats des analyses de sol du site expérimental**

Les échantillons de sol ont été collectés et analysés en laboratoire, il ressort de cette analyse une appréciation des caractéristiques chimiques de ce sol. Selon la classification proposée par Beernaert et al, (1993) ce sol a une teneur riche en matière organique, et en bases échangeables telles que le magnésium et le potassium, c'est un sol légèrement acide. Les caractéristiques de ce sol après analyse au laboratoire sont présentées dans le Tableau XIV.

**Tableau XIV** : Caractéristiques chimiques du sol avant la mise en place de l'essai.

| <b>Texture</b>                                  |       |
|---|-------|
| Sable (%)                                       | 54    |
| Limon (%)                                       | 25    |
| Argile (%)                                      | 42    |
| <b>Réaction du sol</b>                          |       |
| pH eau  | 5,7   |
| pH Kcl  | 4,6   |
| <b>Matièreorganique</b>                         |       |
| CO (%)  | 5,20  |
| Mo (%)  | 8,98  |
| N total   | 1,37  |
| C   | 20,55 |
| C/N   | 15    |
| <b>Cations échangeables (méq/100g)</b>          |       |
| Ca <sup>2+</sup>                                | 4,88  |
| Mg <sup>2+</sup>                                | 3,54  |
| K <sup>+</sup>                                  | 1,91  |
| Na <sup>2+</sup>                                | 0,50  |
| Sommes des bases                                | 10,83 |
| <b>Capacité d'échange cationique (méq/100g)</b> |       |
| CEC pH  | 35,25 |
| CEC <sub>effective</sub>                        | 11,49 |
| Saturation en base (%)                          | 32    |
| <b>Phosphore assimilable (mg/kg)</b>            |       |
| P Bray II                                       | 12    |

Sur le plan textural, ce sol présente une texture limoneuse sablonneuse selon le triangle de la FAO, (2006) ; cette texture est très appropriée pour la culture des céréales car le maïs aime les sols bien aérés, bien drainés, profonds, meubles, frais et assez légers. L'indice de stabilité de sol qui est de 11,37 % indique un sol à structure stable. Cette bonne stabilité structurale

traduit la bonne cohésion interne des agrégats du sol ; ce qui le rend moins vulnérable à l'action des eaux de pluies, donc moins sensible aux érosions ( $ISS > 9 \%$ ) (Lab et al, 1994).

Sur le plan chimique, le pH de ce sol à une valeur moyenne de 5,7 ce qui traduit un sol modérément acide qui exerce un effet direct sur l'activité microbienne du sol (Beernaert et al, 1992). La teneur en matière organique (Mo) est très élevée avec une valeur de  $Mo = 8,89\%$  ; la matière organique et l'activité biologique ont une influence majeure sur les propriétés physico-chimiques du sol. Au vu du rapport C/N qui a une valeur de 15 ce qui traduit une faible minéralisation de l'azote d'où la valeur de l'azote total (1,37) dans ce sol est élevé. On peut conclure que l'azote n'est pas bien minéralisé ceci peut aussi être dû à une faible activité microbienne. Ce sol présente une valeur 12 mg/kg de phosphore assimilable par la plante cette valeur est faible (Euroconsult et al, 1989). Les résultats nous présentent une capacité d'échange cationiques (CEC) avec une valeur de 11,49 meq/100 g c'est une valeur modérée. La capacité d'échange cationique est la capacité du sol de retenir et d'échanger des éléments nutritifs facilement disponibles pour les plantes. Nous avons ici des éléments nutritifs importants dans le sol et la somme des bases qui a une valeur de 10,83 témoigne les valeurs modérées en éléments nutritifs tout ceci traduit une bonne fertilité chimique. Au total, sur le plan agronomique, ce sol présente une bonne fertilité physique et chimique. Les quelques limitations qu'on peut noter sont la faible minéralisation de l'azote avec un rapport C/N élevé, sa faible valeur en phosphore.

Pour la culture du maïs, ce sol est idéal et a des caractéristiques idoines pour la culture des céréales car le pH du sol est compris entre 5,5-6,5 (Westphal et al, 1985). Il faudrait accélérer la décomposition de l'azote, le sol étant bien riche en N, P, K et matière organique. Compte tenu de la densité du semis, nous pouvons associer les espèces oxydantes générées par le plasma ( $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $H_2O_2$ ...) qui viendront avec les éléments directement assimilables par la plante et accélérera la germination, la croissance et le rendement des cultures (Ji et al, 2016). L'analyse de sol est essentielle pour une bonne culture mais elle n'est pas la seule à prendre en compte pour un rendement optimal ; pour une bonne culture il nous faut une bonne semence, et un bon suivi.

### **III.2. Effets de l'eau activée sur les paramètres physico-chimiques.**

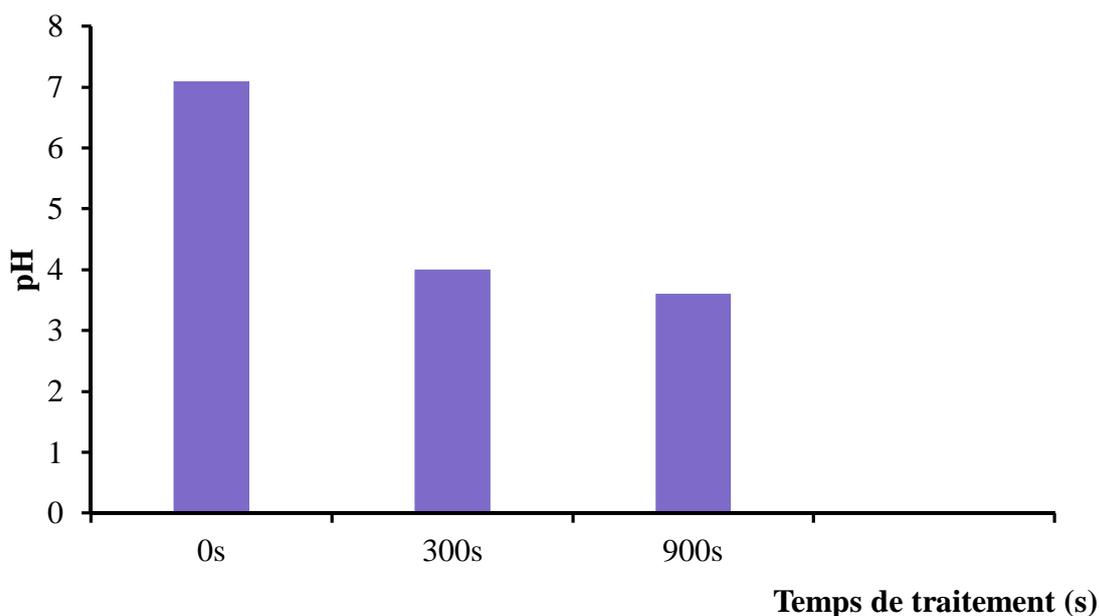
#### **III.2.1. Potentiel d'hydrogène (pH)**

L'eau est un facteur essentiel pour la culture du maïs. Les résultats obtenus à partir des analyses physico-chimiques sont résumés dans le Tableau XV et la Figure 16. Ce tableau

montre qu'après quelques minutes ( $t^* = 300\text{s}$ ) d'exposition au plasma d'air humide, le pH de l'eau du robinet diminue de 7,1 à 4 et continue ensuite à diminuer progressivement au cours du temps pour atteindre une valeur de 3,6 après 900 s de traitement. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par Benstaali et *al.*, (1998), qui expliquent la diminution progressive du pH au cours du traitement par plasma par l'augmentation du temps de traitement, ce qui favorise davantage la production d'espèces actives qui diffusent dans la solution aqueuse. En effet, la présence des radicaux  $\text{NO}^\circ$  dans la décharge en contact avec l'air conduit à la formation de  $\text{NO}_x$  qui peuvent s'hydrolyser en acides nitreux, nitrique et peroxonitrique en solution (Hoang et *al.*, 2009).

**Tableau XV :** Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau du robinet avant et après traitement au plasma Glidarc.

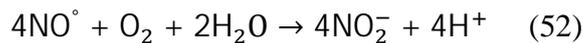
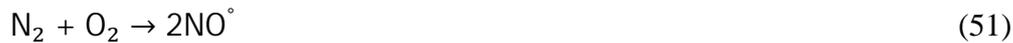
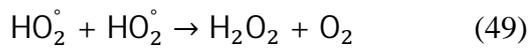
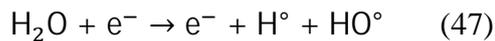
| Paramètres | pH  | Conductivité à 25 °C<br>( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) | STD à 25 °C<br>(mg/L) | $\text{NO}_3^-$<br>(mg/L) | $\text{NO}_3^- \text{-N}$<br>(mg/L) | $\text{H}_2\text{O}_2$<br>(mmol/L) |
|------------|-----|---|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0 s        | 7,1 | 70  | 30                    | 0                         | 0                                   | 0                                  |
| 300 s      | 4   | 315   | 180                   | 443                       | 5,2                                 | 0.1                                |
| 900 s      | 3,6 | 526   | 320                   | 1075                      | 12,7                                | 0.028                              |



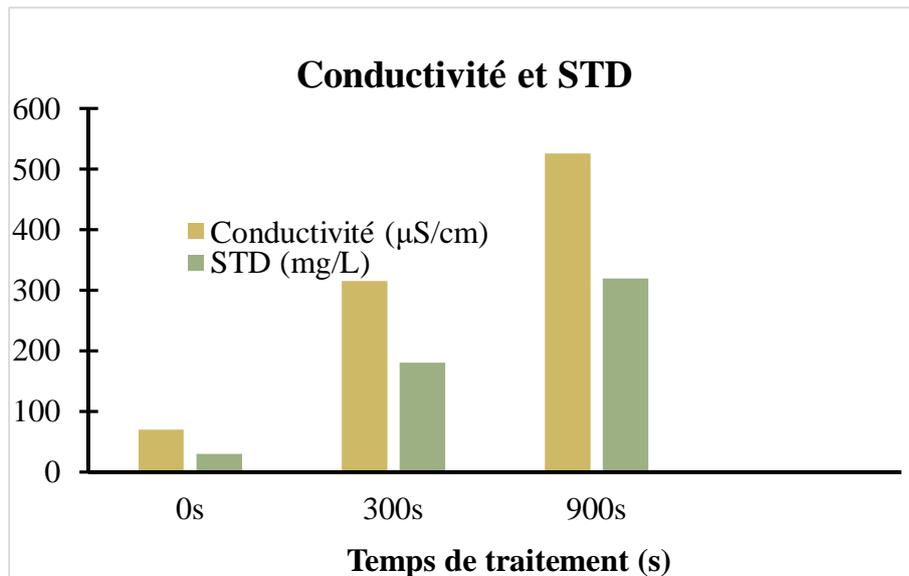
**Figure 16 :** Evolution du pH en fonction du temps de traitement

### III.2.2. Conductivité et Solides Totaux Dissous (STD)

D'après le Tableau XV et la Figure 17, la conductivité et les solides totaux dissous dans l'eau du robinet augmentent en fonction du temps de traitement pour atteindre les valeurs de 315  $\mu\text{s/cm}$  et 180 mg/L après 300 s exposition à la décharge électrique. De même Laurita et al, (2015) ont observé une augmentation de la conductivité de 1435  $\mu\text{s/cm}$  à partir 1,5  $\mu\text{s/cm}$  après 10 minutes d'activation en utilisant le plasma d'air DBD. Les variations relatives de ces deux paramètres peuvent être expliquées d'une part par la variation du pH. En effet, la diminution du pH s'accompagne d'une augmentation de la conductivité et des solides totaux dissous, ces deux paramètres étant étroitement liés. D'autre part, l'étude de l'effet des radiations ionisantes en phase liquide (Buxton et al, 1987), de l'électrolyse de la décharge aux interfaces liquide-gaz (Hickling et al, 1971), et des collisions électroniques avec la vapeur d'eau dans les gaz humides (Dolan et al, 1993) suggère les réactions suivantes (Brisset et al, 2012). :



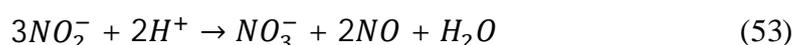
Ces réactions conduisent à la formation de  $^\circ\text{OH}$  et de  $\text{H}_3\text{O}^+$ . De plus, la grande mobilité de l'ion oxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$  dans l'eau contribue à l'augmentation de la conductivité due à ces cations par rapport aux autres cations de taille similaire (Kornyshev et al, 2003).



**Figure 17:** Evolution de la Conductivité et des STD en fonction du temps de traitement.

### III.2.3. Nitrates et quantité d'azote contenu dans les nitrates

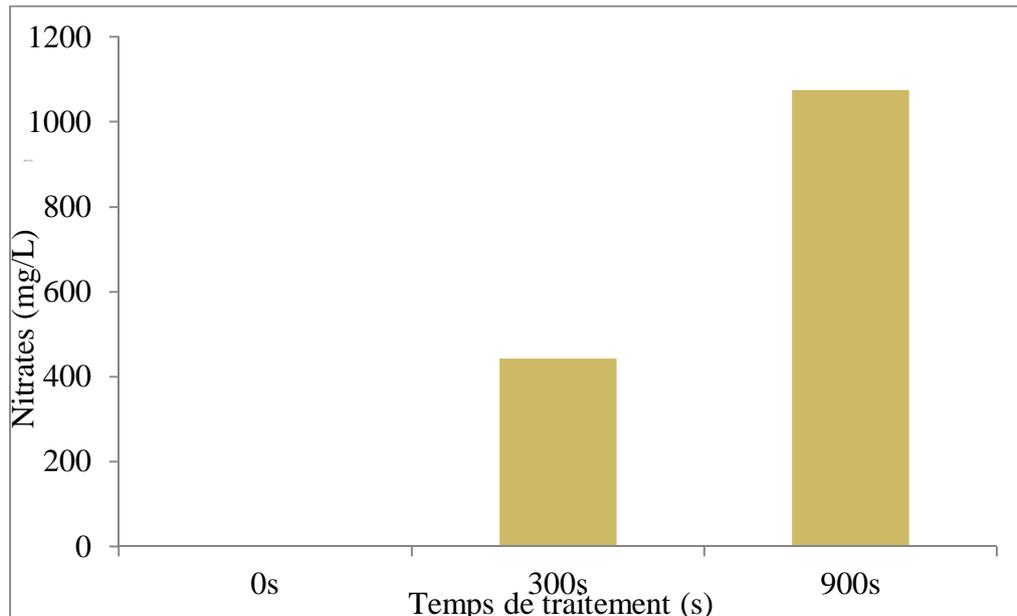
Nous savons que les plantes ont besoin d'au moins 16 éléments nutritifs essentiels pour accomplir leur cycle de croissance et parmi ceux-ci trois en quantités importantes : l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) (Moughli et *al*, 2000). Les plantes assimilent l'azote N indispensable à leur croissance, lorsque cet élément est combiné à l'oxygène sous forme d'ions  $NO_3^-$  puisés dans le sol (Abena et *al*, 2005). On peut voir dans les résultats du Tableau XV et sur la Figure 18 que la concentration des ions nitrates et la quantité d'azote contenu dans les nitrates évolue progressivement, augmentant avec le temps d'exposition au plasma. Ces nitrates produits dans l'eau sont dus aux propriétés acidifiantes du plasma et peuvent être utilisées en agriculture comme engrais pour fertiliser les plantes (Zhou et *al*, 2003 ; Zhou et *al*, 2011 ; Zhang et *al*, 2017). Ce phénomène a été observé par d'autres groupes de chercheurs tels que Dolan et *al*, (1993), Gervais et *al*, (2020), Katarína et *al*, (2018) et ont expliqué l'oxydation des ions nitrites en ions nitrates. Lukes et *al*, (2014) ont étudié la formation des nitrates à partir de la réaction post décharge entre les nitrites et le  $H_2O_2$  ; les auteurs ont proposé une réaction de formation des nitrates comme suit :



De même Park et *al*, (2013) ont aussi mené des expériences sur l'effet des ions nitrates formés dans le PAW pour la croissance des plantes (pastèque, zinnia, luzerne, haricots) et a abouti à une concentration de 56 mg/L après un traitement de 2 minutes. Ces résultats vont en

droite ligne avec ceux obtenus par Thapanut et *al*, (2017) qui ont obtenus des valeurs de 300, 450 et 700  $\mu\text{M}$  pour les temps de 5, 10 et 30 minutes respectivement.

En outre Sera et *al*, (2013) ont trouvé que la croissance de jeunes plants de pavot a significativement augmentée par des traitements plasma froid. Lyndsay et *al*, (2014) ont montré que les radis ont une croissance significative lorsqu'ils sont fertilisés avec de l'eau activée par plasma (PAW).



**Figure 18:**Évolution des ions nitrates en fonction du temps de traitement.

#### III.2.4. Peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

Le  $\text{H}_2\text{O}_2$  est le plus souvent cité par plusieurs auteurs (Doubla et *al*, 2008 ; Moussa et *al*, 2007 ; Brisset et *al*, 2008) comme étant une des espèces oxydantes présentes en solution au cours de la post-décharge. L'exposition d'eau du robinet à la décharge (exposition directe) a permis d'obtenir les résultats du Tableau XV et la Figure 19 représenté ci-dessous. Sur la base des valeurs obtenues à différentes concentrations de peroxyde d'hydrogène en solution, on constate que la concentration de  $\text{H}_2\text{O}_2$  diminue avec l'augmentation du temps d'exposition. Ces résultats ont été observés par Kamgang-Youbi et *al*, (2008) que les radicaux formés en amont dans la décharge ( $\text{HO}^\circ$  et  $\text{HO}_2^\circ$ ) responsables de la formation de  $\text{H}_2\text{O}_2$  ne se recombineraient pas suffisamment ou que ces radicaux participeraient de préférence à d'autres réactions. De même, Bisset et *al*, (2012) ont observé que la forte solubilité du peroxyde d'hydrogène dans l'eau contribuerait à le faire réagir spontanément en solution aqueuse dès sa formation en phase gazeuse dans la décharge. La forte diminution de sa teneur au cours du temps pourrait aussi être

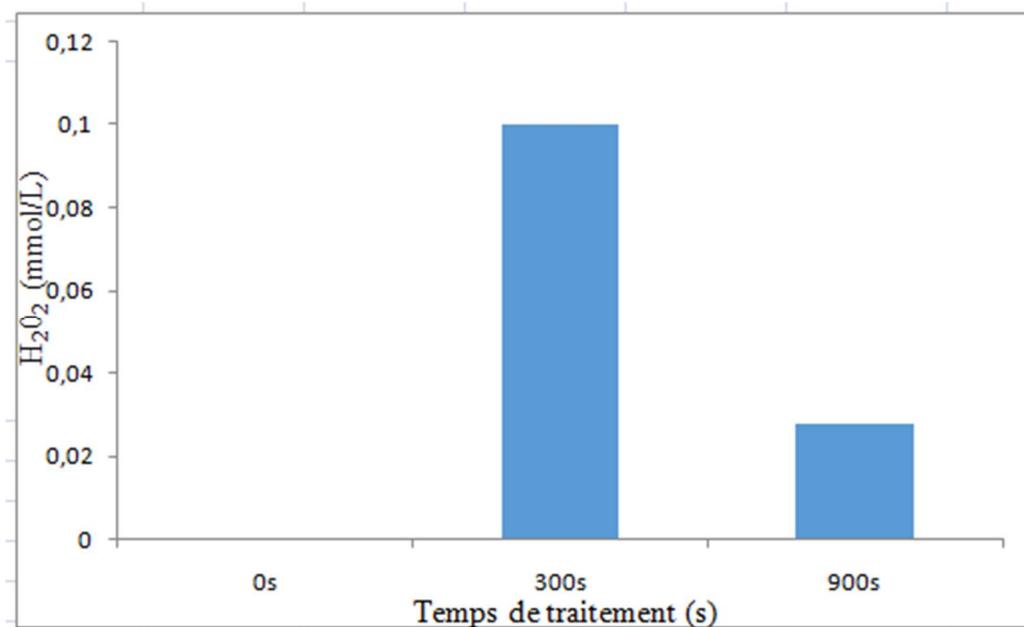
due à la formation de l'ion peroxydinitrite ( $E^\circ (\text{ONO}_2^- / \text{NO}_2) = 2,44\text{V}$ ) provenant de la réaction suivante (Pryor et *al*, 1995) :



De plus le milieu plasma étant acide, nous assisterons préférentiellement à l'hydrolyse acide ( $\text{pH} < 6,9$ ) de l'ion peroxydinitrite obtenu en solution, ce qui conduirait ainsi à la formation de l'acide peroxydinitrique qui possède également des propriétés oxydantes ( $E^\circ(\text{ONO}_2\text{H}/\text{NO}_2) = 2,05 \text{ V}$ ). Katsumura et *al*, (1998) ont pu établir une équation réversible reliant ces deux entités ainsi que les constantes cinétiques des réactions de formation et de dissociation de ONOOH.



$$K_{\text{formation}} = 1,6.10^4 \text{ s}^{-1} \text{ et } K_{\text{dissociation}} = 5.10^{10} \text{ s}^{-1}$$



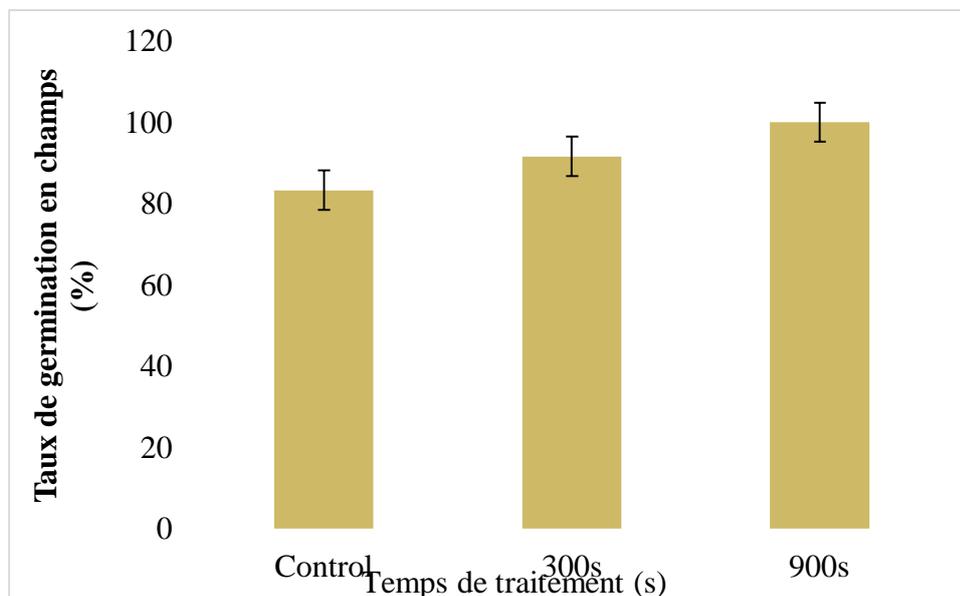
**Figure 19:** Evolution du peroxyde d'hydrogène en fonction du temps de traitement

Rahman et *al*, (2018) ont suggéré que le plasma induit la formation de  $\text{H}_2\text{O}_2$  qui se trouve dans les graines hydratées et est impliquée dans l'imbibition et la germination précoce. Ces auteurs ont comparé les mélanges Ar/O<sub>2</sub> et ont observé des concentrations plus élevées de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Ils ont conclu que les plantes traitées avec ce mélange présentaient de meilleurs paramètres de croissance en raison de l'augmentation de la concentration d' $\text{H}_2\text{O}_2$  et n'ont pas observé de changements dans le NO. Il est intéressant de noter que Kang et *al*, (2020) n'ont pas constaté d'effet et ont observé une grande variation dans la germination du riz. Los et *al*, (2020)

ont également observé de changements dans les niveaux de  $H_2O_2$  dans le blé, mais ont tout de même constaté une amélioration de la croissance. Cela suggère qu'il existe soit des différences dans le plasma qui n'entraînent pas nécessairement des changements dans le  $H_2O_2$  et nécessite une optimisation, soit que les graines réagissent différemment, et que cela n'est pas exclusivement dû à  $H_2O_2$  mais plutôt aux nitrites et aux nitrates. Ce dernier point a été fortement souligné par Billah et al, (2020) qui ont observé une augmentation de  $H_2O_2$  mais qui pensent que l'azote est le principal contributeur à l'augmentation de la croissance des graines. En revanche, Liu et al, (2016) ont comparé différents gaz utilisant des traitements directs et indirects au plasma pour produire des PAW et ont fait tremper une variété de graines. Ils ont été tentés de croire que les effets sont plus probablement dus aux espèces dérivées de l'oxygène. Il est intéressant de noter que le NO peut réguler à la baisse le signal pour  $H_2O_2$  et activer les gènes pour les enzymes antioxydantes comme l'ont souligné Iranbakhsh et al, (2017).

### III.3. Effets de l'eau activée par plasma sur les paramètres de biomasse en champs

#### III.3.1. Taux de germination en champs en fonction du temps de traitement



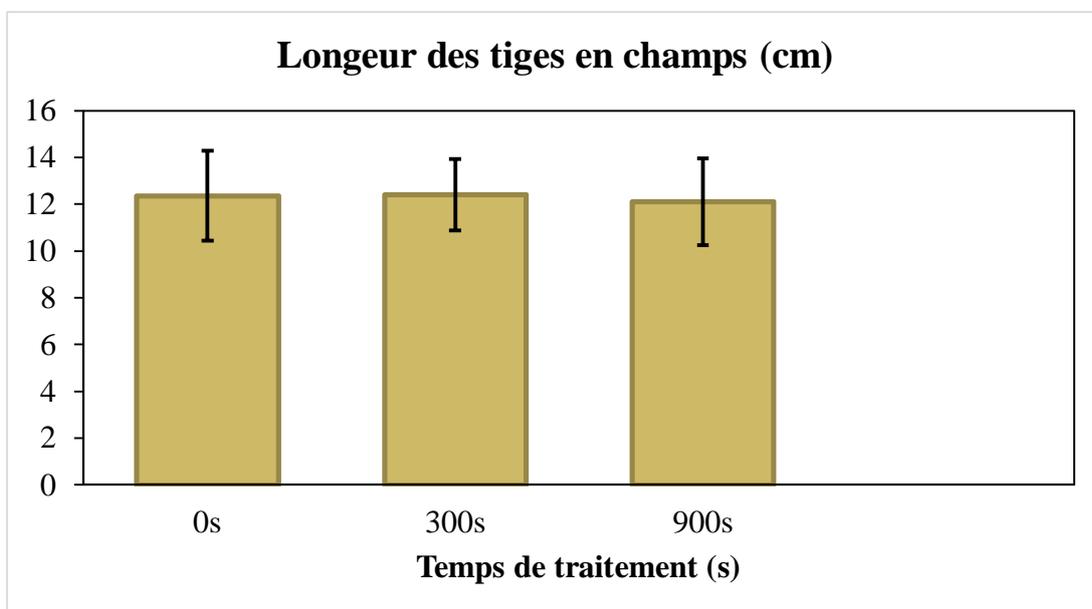
**Figure 20:** Taux de germination des graines en champs en fonction du temps de traitement.

La germination est le début du développement d'un nouvel individu végétal, à partir d'une graine placée dans des conditions favorables. Divers événements sont associés à la germination, depuis l'absorption initiale d'eau par les graines sèches jusqu'à l'émergence de la radicule à travers l'enveloppe de la graine. La Figure 20 ci-dessus représente le taux de germination le 10<sup>ème</sup> jour après semis en fonction de l'eau activée à différent temps de traitement

au plasma. La réponse la plus significative a été obtenue pour les graines arrosées à l'eau activées pendant 900 s avec un taux de germination de 100 %, supérieur à 83,3 % obtenu pour les semences non arrosées à l'eau activées. Aucune différence significative n'a été enregistrée pour les taux de germination des graines traitées de 300 s par rapport au contrôle. Ces résultats collaborent avec ceux obtenus par Naumova et *al*, (2011) sur les graines de seigle où le taux de germination des graines traitées au plasma pendant 5 minutes était de 50 % contrairement à celui du contrôle qui était de 35 %. Kučerová et *al*, (2021) ont aussi observés un pourcentage de germination plus élevé avec les graines de blé arrosées avec l'eau du robinet traitée au plasma ; à 0 min il a obtenu 96 % ; à 1 min 98,67 % ; à 2 min 99 %. Divers événements sont associés à la germination, depuis l'absorption initiale d'eau par les graines sèches jusqu'à l'émergence de la radicule à travers l'enveloppe de la graine. La germination des graines s'accompagne d'une production intensive d'espèces oxydantes, telles que l'anion superoxyde, le peroxyde d'hydrogène, le monoxyde d'azote et ses dérivés. La longueur des tiges peut être un indicateur d'une germination plus rapide (Henselová et *al*, 2012).

### III.3.2. Longueur de la tige en champs en fonction du temps de traitement.

L'activation de l'eau du robinet au plasma a également affecté la longueur moyenne de la tige (Figure 21) mesurée 30 jours après semis.



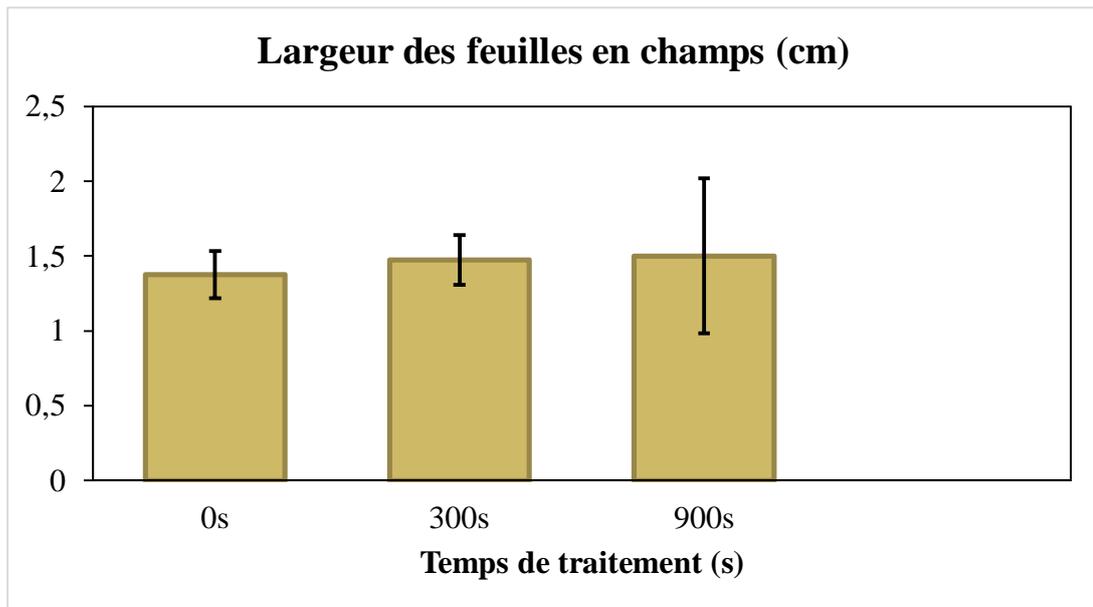
**Figure 21:** Variation de la longueur des tiges en champs en fonction du temps de traitement.

Le temps de traitement de 300 s a stimulé une valeur de 12,7 cm de longueur ce qui donne des résultats significativement différents de ceux des semences non arrosées à l'eau

activée (11,58 cm). Pour les semences arrosées pendant 900 s, une légère amélioration a été observée. Des résultats similaires ont aussi été obtenus par Ndiffo *et al*, (2020) sur les graines de maïs en utilisant le plasma d'air non thermique, ils ont observé une certaine amélioration de 1,08 et 1,10 fois par rapport au contrôle, respectivement pour les temps de traitement de 1 et 2 minutes après 4 semaines de croissance. Sarinont *et al*, (2017) ont aussi obtenus des résultats semblables en 2017 où les longueurs normalisées des semis de radis étaient de 1,25 ; 1,52 et 1,62 fois supérieures à celles du contrôle pour les temps de 3 min, 5 min et 10 min respectivement. De plus le plasma froid sous pression atmosphérique provenant d'une décharge de surface sur les graines de blé a été étudié par Dobrin *et al*, (2015). Ces auteurs ont observé que le traitement au plasma a eu peu d'effet sur le taux de germination, mais a influencé les paramètres de croissance. Une longueur de racine plus élevée a été obtenue par rapport aux échantillons non traités. Ces faits mènent à la conclusion que le plasma d'air pourrait modifier les propriétés de la plante, les phénomènes physiologiques et biochimiques dans les graines par l'action des espèces actives du plasma sur le tégument de la graine.

### **III.3.3. Largeur des feuilles aux champs en fonction du temps de traitement**

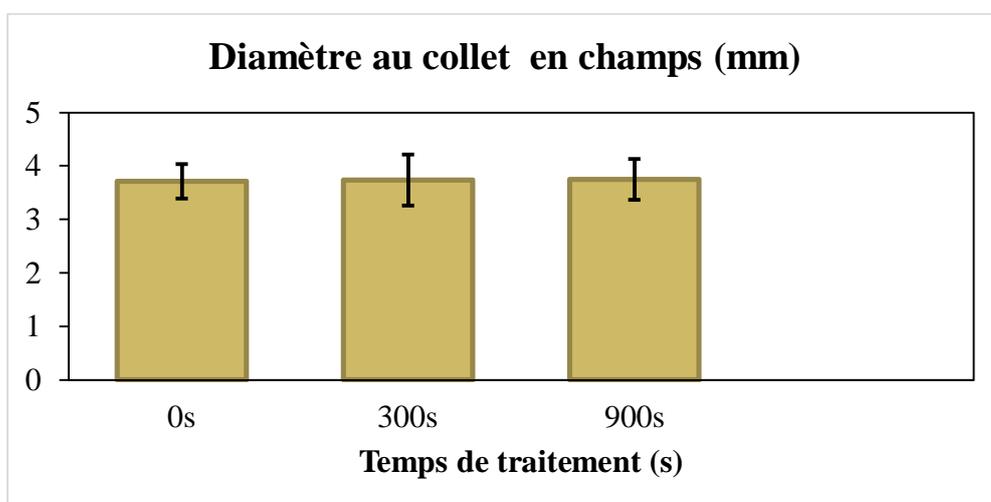
L'activation de l'eau du robinet au plasma a également affecté la largeur moyenne des feuilles (Figure 22) mesurée 30 jours après semis. Les feuilles les plus larges sont celles ayant été arrosées pendant 900 s (1,76 cm) à l'eau activée par plasma contrairement au témoin 0 s (1,54 cm). Aucune différence significative n'a été observée pour les semences arrosées à 300 s (1,61 cm) par rapport au contrôle. Les résultats suggèrent une interaction entre la modification de la structure des graines démontrée par le plasma froid dans l'induction d'une germination rapide et les activités hormonales associées à la signalisation et au développement des plantes (Stolarik *et al*, 2017). De plus l'effet stimulant du plasma augmente la concentration d'azote dans les feuilles, ce qui favorise la croissance des semis (Sera *et al*, 2021).



**Figure 22:** Variation de la largeur des feuilles en champs en fonction du temps de traitement.

### III.2.4. Diamètre au collet en champs en fonction du temps de traitement

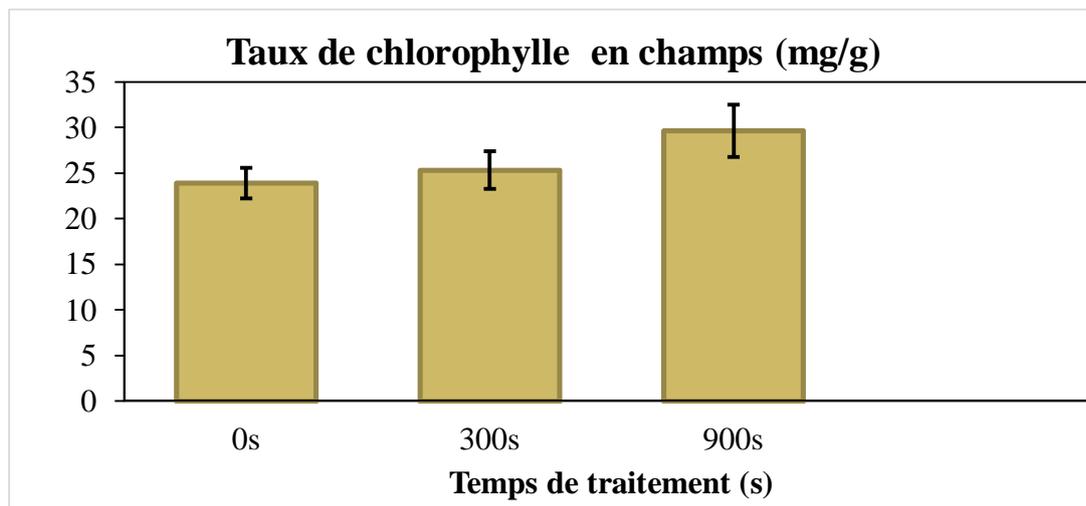
D'après la Figure 23, les diamètres au collet les plus gros sont ceux obtenus avec les plantes arrosées avec l'eau activée contrairement à celles arrosées avec l'eau du robinet, les valeurs sont de 3,75 mm ; 3,74 mm et 3,70 mm respectivement pour les temps de 900 s, 300 s et 0 s. Ce paramètre évolue avec le temps de traitement et pourrait encore être améliorée avec une période de culture plus longue. Cela suggère que l'effet stimulant de l'eau activée augmente la concentration d'azote dans les feuilles, favorisant ainsi la croissance des plantules et un meilleur diamètre au collet.



**Figure 23:** Variation du diamètre au collet en champs en fonction du temps de traitement

### III.3.5. Teneur en chlorophylle en champs

La teneur en chlorophylle est un facteur important pour déterminer le taux de photosynthèse et la production de matière sèche, elle a également une importance en agriculture en tant qu'indicateur de l'activité photosynthétique. La teneur en chlorophylle des plantes a été mesurée, et les résultats sont présentés à la Figure 24.



**Figure 24:** Variation du taux de chlorophylle en champs en fonction du temps de traitement

Les plantes arrosées avec l'eau activée par plasma ont montré une légère augmentation des valeurs, probablement due à l'augmentation de la concentration des RONS dans l'eau. On a obtenu les valeurs de 23,91 ; 25,32 ; 29,66 mg/g pour les temps de 0 s, 300 s, 900 s, respectivement. Ndiffo et *al*, (2020) ont obtenu des résultats similaires en utilisant le plasma d'air non thermique ; pour les graines de maïs arrosé pendant 1 min l'augmentation était de 1,11 fois par rapport au contrôle. Kučerová et *al*, (2021) ont aussi montré que le taux de chlorophylle des semences de blé augmente avec l'activité de l'eau activée par plasma et les concentrations croissantes de RONS ; par rapport au témoin, les plantes irriguées pendant 2 min ont montré une augmentation de 17 %. Cela suggère que les espèces ( $H_2O_2$ ,  $NO_2$  et  $NO_3^-$ ) générées par le traitement GAPAW augmentent le métabolisme total de la plante, modulent le processus de photosynthèse, affectent la synthèse de l'amidon et de la chlorophylle (Danilejko et *al*, 2021).

### III.3.6. Effet du traitement plasma sur le rendement du maïs en champs

La récolte du maïs s'est faite manuellement le 19 septembre 2020 (3 mois 19 jours après le semis). Pour estimer le rendement, 8 plans sont récoltés au hasard dans chaque unité

expérimentale au sein de chaque bloc, séchés, égrainés et ensachés épis par épis. Dans le but de rechercher le rendement moyen du maïs, la détermination du poids sec des graines de maïs par la pesée est effectuée. Le rendement en kilogramme de maïs par hectare (RdHa) s'est calculé en sous- parcelles traitées et sous-parcelles témoin par la formule proposée par N'Goran et al, (2000) ; Svecnjak et al, (2006). L'analyse de ces résultats nous ont permis d'obtenir les résultats du Tableau XVI.

**Tableau XVI** : Rendement moyen du maïs issu de la parcelle arrosée et non arrosée à l'eau activée par plasma.

| Traitement                 | Poids épis (g)            | Diamètre épis (cm)      | Hauteur épis (cm)       | Taux d'humidité (%)     | Nombres de graines        | Rendement (t/ha)       |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| T <sub>0</sub>             | 107,32±23,40 <sup>b</sup> | 14,91±1,08 <sup>b</sup> | 18,97±1,69 <sup>b</sup> | 8,57±1,54 <sup>b</sup>  | 309,10±50,06 <sup>b</sup> | 2,98±0,76 <sup>b</sup> |
| T <sub>900s</sub> (Plasma) | 137,59±27,45 <sup>a</sup> | 16,68±1,14 <sup>a</sup> | 22,42±2,38 <sup>a</sup> | 10,15±1,34 <sup>a</sup> | 403,60±64,59 <sup>a</sup> | 3,29±0,76 <sup>a</sup> |

Rendement moyen du maïs issu de la parcelle arrosée et non arrosée à l'eau activée par plasma ont été évaluée. Par rapport à ce chiffre, les rendements obtenus pour les graines arrosées par l'eau activée à 900 s sont de 3,29 t/ha valeur supérieur à celle des graines non arrosées (2,98 t/ha). L'obtention de ces valeurs de rendements sont probablement dus à la rareté des pluies pendant l'essai. En effet d'après M'barek et al, (1996) ; Riouet et al, (1993), l'eau a un rôle fondamental dans la vie des plantes, dans la mesure où elle conditionne leurs activités physiologiques et métaboliques. Elle est le vecteur des éléments nutritifs de la plante. Sa carence peut affecter la croissance, elle est, de ce fait, le principal facteur limitant sur la production dans les régions arides et semi-arides. Razafimahatratra et al, (2017), ont mentionné que les besoins mensuels en eau du maïs sont estimés 100 mm durant toute la période de sa végétation, le maïs étant une plante exigeante en eau, surtout en phase de : germination, croissance, floraison, fécondation et grossissement des grains. Mais la période la plus critique pour l'eau s'étend sur les 15 jours qui précèdent et les 15 jours qui suivent l'apparition des inflorescences mâles. De plus le traitement à l'eau activée par plasma a 900 s à eu une influence sur le poids des épis, diamètre des épis, hauteur des épis et le nombre des graines par rapport au contrôle. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Violleau et al, (2008) ; Sudhakar et al, (2011) qui ont démontré une amélioration par les traitements plasma du taux de germination et le rendement des graines. Ces phénomènes indiquent la pénétration des espèces actives du plasma à travers l'enveloppe poreuse de la graine, où elles réagissent avec les composants cellulaires (Sera et al, 2010). La régulation de la croissance

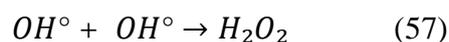
provient de la modification de l'activité antioxydante des cellules végétales induite par les espèces actives d'oxygène générées dans le plasma d'oxygène, ce qui conduit à la production d'un facteur de croissance dans les plantes (Hayashi et *al*, 2015). Toutefois notons aucune différence significative entre les graines arrosées par l'eau activée par plasma à 300 s par rapport au contrôle (donnée non présentée).

En somme la décharge électrique glissante générée dans l'air ambiant à la pression atmosphérique a induit des changements chimiques dans l'eau du robinet activée. Ces changements chimiques ont permis de mesurer les concentrations des espèces oxygénées et le pH. Nous nous sommes concentrés sur trois espèces à longue durée de vie souvent considérées comme importantes pour le développement des semis et la croissance des plantes : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et NO<sub>3</sub>. Les équations (56) - (69) montrent la formation de ces trois espèces dans l'eau (Bruggeman et *al*, 2016 ; Lukes et *al*, 2014 ; Lu et *al*, 2017).

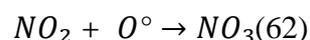
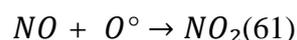
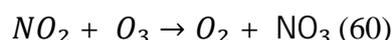
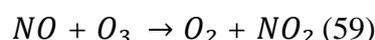
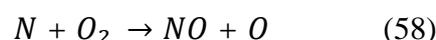
Les radicaux OH sont principalement formés par la dissociation par impact électronique des molécules de H<sub>2</sub>O dans les plasmas froids des gaz humides (équation 56).



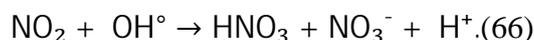
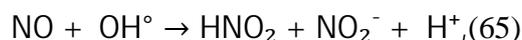
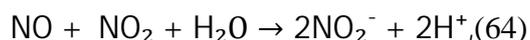
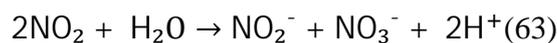
H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> est produit dans le plasma par la recombinaison de radicaux OH suivant l'équation 57 :



Les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les acides d'azote (HNO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>) se forment dans le plasma en phase gazeuse par le biais de l'équation (58) - (62)



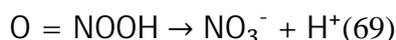
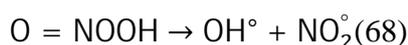
La dissolution de NO<sub>x</sub> et de HNO<sub>x</sub> dans l'eau entraîne la formation de NO<sub>2</sub> et de NO<sub>3</sub> et l'acidification de l'eau (Hensel et *al*, 2015 ; Machala et *al*, 2013 ; Bruggeman et *al*, 2016).



La formation de nitrates en milieu acide peut également se faire par la réaction des nitrites avec le peroxyde d'hydrogène pour former du peroxy-nitrite :



La réactivité et la stabilité du peroxy-nitrite dépendent fortement du pH. A pH < 6,8, ONOOH se désintègre fortement en radicaux OH et NO<sub>2</sub> (équation 68), mais il se transforme principalement en nitrates (équation 69).

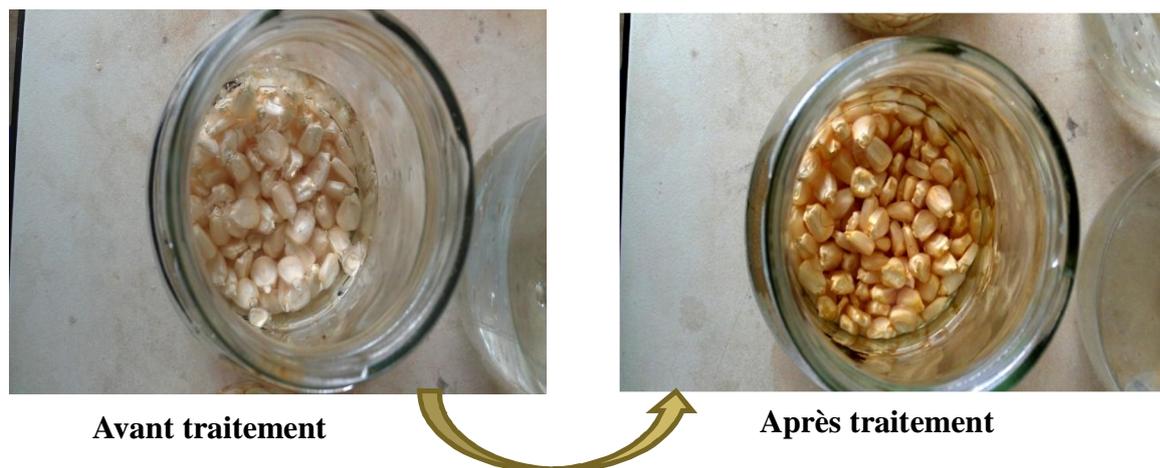


### **III.4. Caractérisation de la surface des graines de maïs traitées en post décharge spatiale**

#### **III.4.1. Changement de couleur à la surface de la graine après un traitement au plasma glidarc**

Les changements de couleur des aliments traités au plasma sont déterminés par plusieurs facteurs : les conditions de traitement au plasma ; les caractéristiques du produit (solide ou liquide) ; et la durée de stockage. La surface des semences de maïs n'a pas montré de changement visuel après 300 s de traitement au plasma glidarc, mais les changements entre les surfaces des semences non traitées et des semences traitées à 900 s étaient évidents (Figure 25). A première vue, la pulpe des graines traitées au plasma 900 s avait une couleur plus foncée que celle des graines non traitées. Des changements similaires de la couleur des carottes et des tomates après un traitement au plasma d'argon froid à l'aide d'un réseau d'aiguilles à plasma (3,95-12,83 kV, 60 Hz, 300-600 s de temps d'exposition) ont été signalés par Bermudez-Aguirre et al, (2013) de même, dans les mêmes conditions, un changement notable dans la couleur de la laitue a été pour des durées de traitement supérieures à 500 s. De plus Ramazzina et al, (2015) ont observé que des traitements par plasma à décharge barrière diélectrique (DBD) dans l'air des kiwis coupés présentaient un degré moindre d'assombrissement pendant le

stockage, par rapport aux échantillons non traités. Plus encore Tappi et *al*, (2014) ; Wang et *al*, (2012) ont observé une augmentation du brunissement de la carotte pendant le stockage après un traitement au plasma. Une perte de couleur dans les tranches de concombres et de carottes a été enregistrée. Ce résultat suggère que les espèces neutres de l'oxygène, en particulier l'oxygène atomique, induisent un changement structurel mineur ou une inhibition fonctionnelle de la membrane cellulaire, ce qui entraîne à l'oxydation des organites intracellulaires via la pénétration des ROS dans la cellule (Hashizume et *al*, 2013).

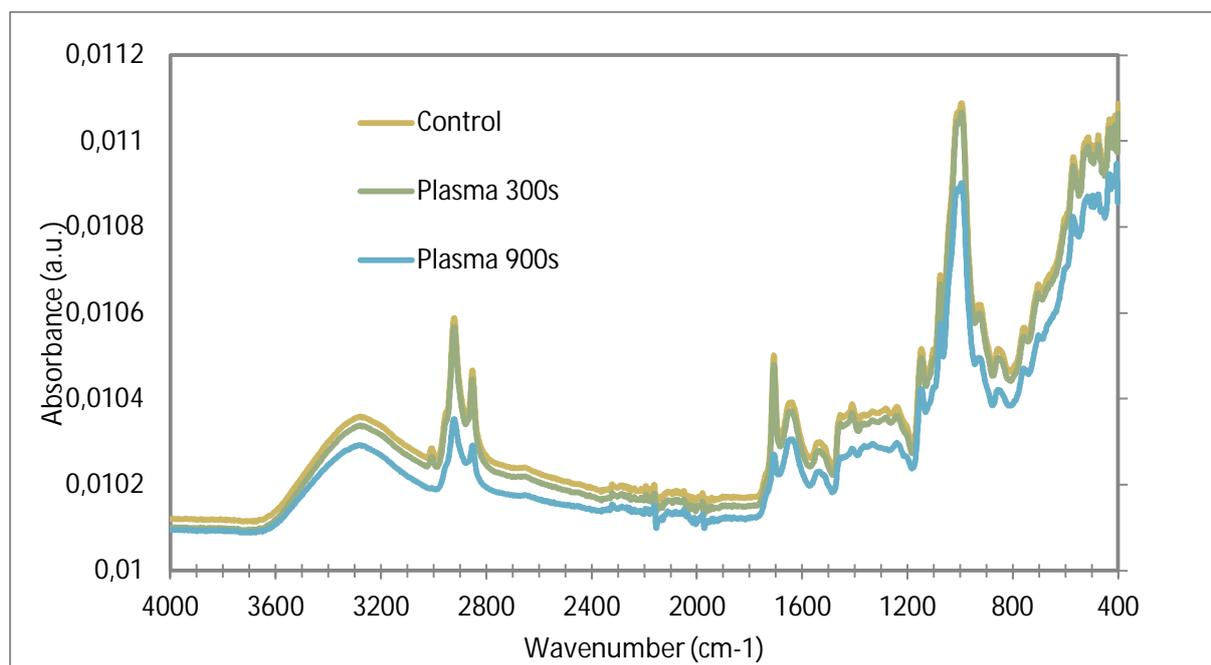


**Figure 25:** Changement de couleur à la surface de la graine après un traitement au plasma glidarc de 900 s.

#### III.4.2. Analyse IR des graines de maïs.

Les spectres FTIR-ATR normalisés des graines traitées ont été réalisés et comparés à celles des graines non traitées (Figure 26). Les trois spectres présentent pratiquement les mêmes bandes caractéristiques, mais avec des pics d'intensité parfois différente. Les liaisons typiques relatives à la composition chimique indiquée dans le Tableau VI sont présentes : hydrates de carbone, protéines et lipides. Les hydrates de carbone sont représentés par des liaisons C-O, C-C, et C-O-H ( $1200-800\text{ cm}^{-1}$ ) avec une liaison glycosidique typique à environ  $1000\text{ cm}^{-1}$  (Uarota et *al*, 2013 ; Kuhnen et *al*, 2010). L'étirement C-H entre  $2929$  et  $2858\text{ cm}^{-1}$  ainsi que les vibrations de déformation C-H à  $1464-1416$ ,  $1166$  et  $1337\text{ cm}^{-1}$  sont caractéristiques des lipides (Kuhnen et *al*, 2010). La diminution des pics d'étirement C-H et plus précisément la disparition de la bande avec un pic à environ  $2981\text{ cm}^{-1}$  pour les deux spectres des péricarpes des graines traitées indique que le traitement plasma modifie la surface en dégradant les lipides. Les espèces oxydantes du plasma telles que  $\text{HO}^\circ$  sont responsables de cette modification, car  $\text{HO}^\circ$  est connu pour être efficace pour l'oxydation des composés organiques (Brisset et *al*,

2008 ; Moussa *et al*, 2007). Les protéines sont représentées par des amides : vibration d'étirement N-H à environ  $3152\text{ cm}^{-1}$ , vibration d'étirement C = O à environ  $1740\text{ cm}^{-1}$ , vibration d'étirement C-N et déformation N-H dans la région de  $1549\text{-}1464\text{ cm}^{-1}$ . Dans la région de  $1549\text{-}1464\text{ cm}^{-1}$  et des bandes plus complexes résultant des liaisons N-H, C-N et C-C à environ  $1166\text{ cm}^{-1}$ . La forte bande autour de  $3518\text{-}2929\text{ cm}^{-1}$  est attribuée à l'étirement OH et des pics attribués à la déformation des liaisons O-H à  $1416$  et  $1660\text{ cm}^{-1}$  (Zahoranova *et al*, 2008). Les principales bandes dues aux groupes fonctionnels communs aux matériaux lignocellulosiques présents dans le péricarpe (la partie externe du grain) sont également représentées. Le double pic représenté aux alentours de  $2923$  et  $2800\text{ cm}^{-1}$  caractérise la vibration d'allongement asymétrique du CH et CH<sub>2</sub> (étirement symétrique) de la cellulose et de la lignine, le pic de la vibration de valence C=O des aldéhydes, des esters et des acides carboxyliques présents dans la lignine et l'hémicellulose apparaît autour de  $1731\text{ cm}^{-1}$ , et d'autres pics apparaissent en dessous de  $900\text{ cm}^{-1}$  sont caractéristiques du groupe C-H dans la cellulose. La diminution des groupes chimiques C=O ( $1731\text{ cm}^{-1}$ ) et C=C ( $1635\text{ cm}^{-1}$ ) pour les graines traitées par plasma indique la modification de la surface par les espèces réactives du plasma. Ces résultats sont également en accord avec ceux obtenus par Molina *et al*, (2021).

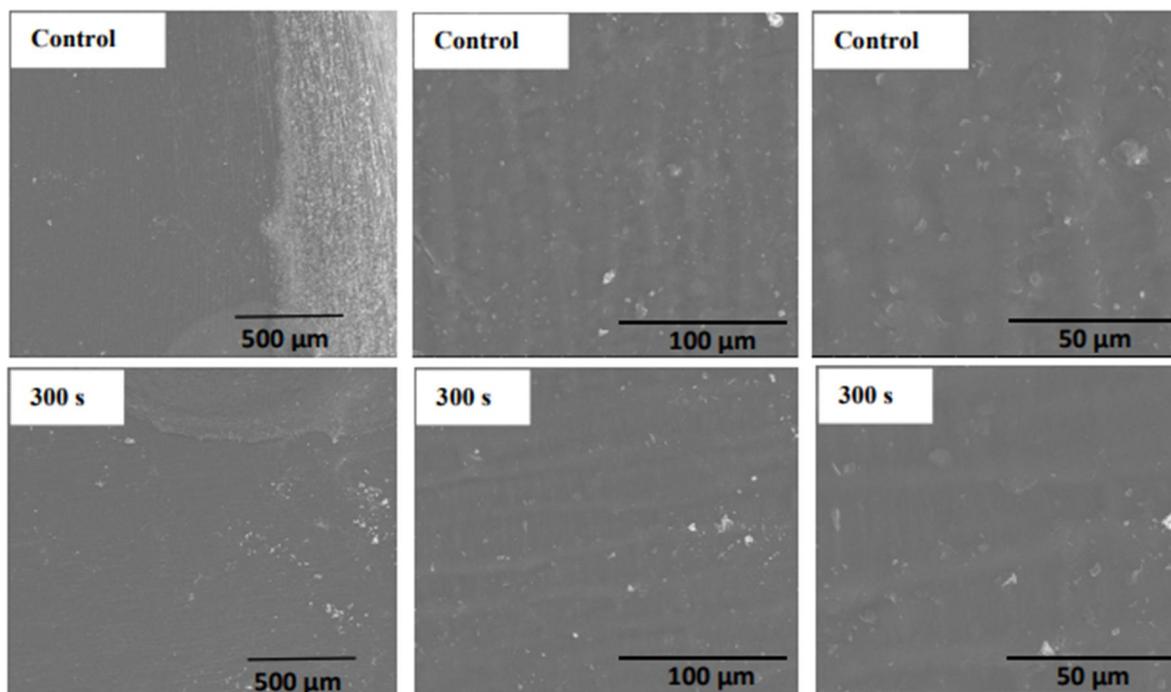


**Figure 26:** Analyse IRTF des graines de maïs

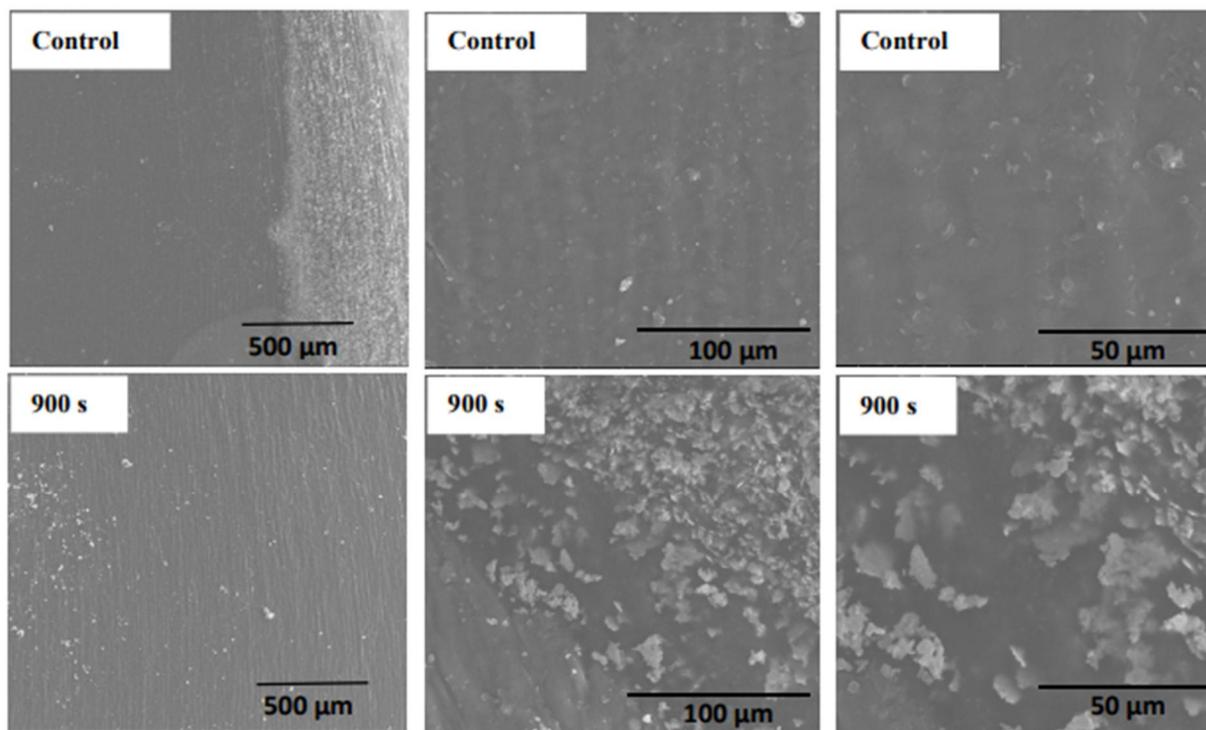
### III.4.3. Analyse de la MEB sur les graines de maïs

Les analyses MEB sont présentées à la Figure 27, 28, 29 et 30 avec différents grossissements. Les photographies prises au MEB ont montré que le traitement à 900 s a

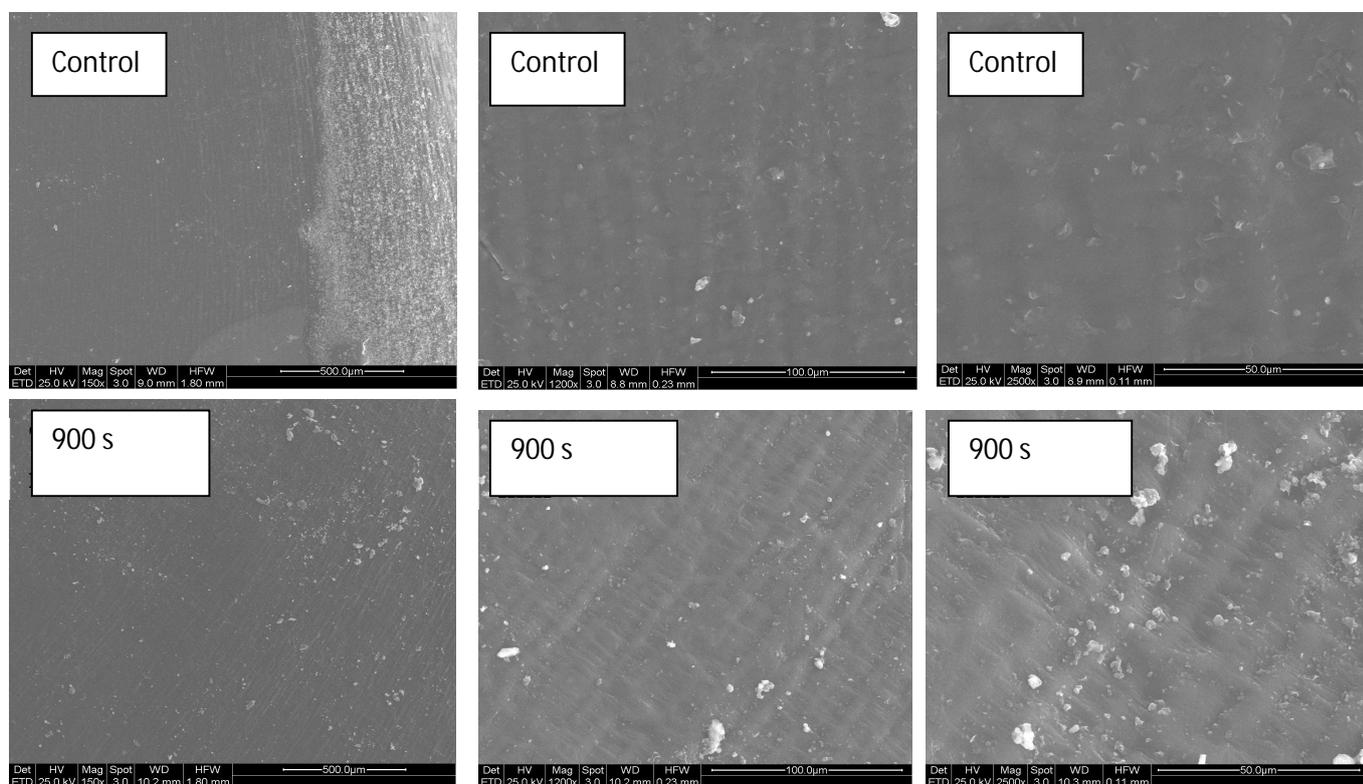
considérablement affecté la morphologie de l'amidon de maïs quel que soit le mode de traitement (Figure 28 et 29). Il semble qu'une certaine contamination de type débris ait été constatée sur les graines traitées au plasma. L'exposition des graines au plasma pendant 900 secondes a entraîné une gravure des surfaces, ce qui peut affecter les parties internes du germe, avec pour conséquence principale des trous d'eau et de grands canaux. Des changements similaires ont été observés par Chen et *al*, (2012), utilisant le plasma à basse pression pour modifier la microstructure et les propriétés de texture du riz brun. Leur étude a révélé une gravure de la surface du riz brun après le traitement au plasma pendant 18 minutes. En revanche, un traitement de 300 s n'a pas provoqué de dégradation de la surface des graines de maïs quel que soit le mode de traitement (Figure 27 et 30). La zone de traitement (loin de l'allumage de la décharge) et la durée plus courte (300 s) peuvent expliquer cette observation. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus par Zahoranová et *al*, (2018) sur des graines de maïs en utilisant le plasma DBD à atmosphère froide et par Šerá et *al*, (2010) sur une autre graine de céréale (graines de blé), car ces auteurs ont montré que les espèces réactives du plasma ne provoquaient aucune dégradation, érosion ou rayure de la surface pendant la courte durée du traitement.



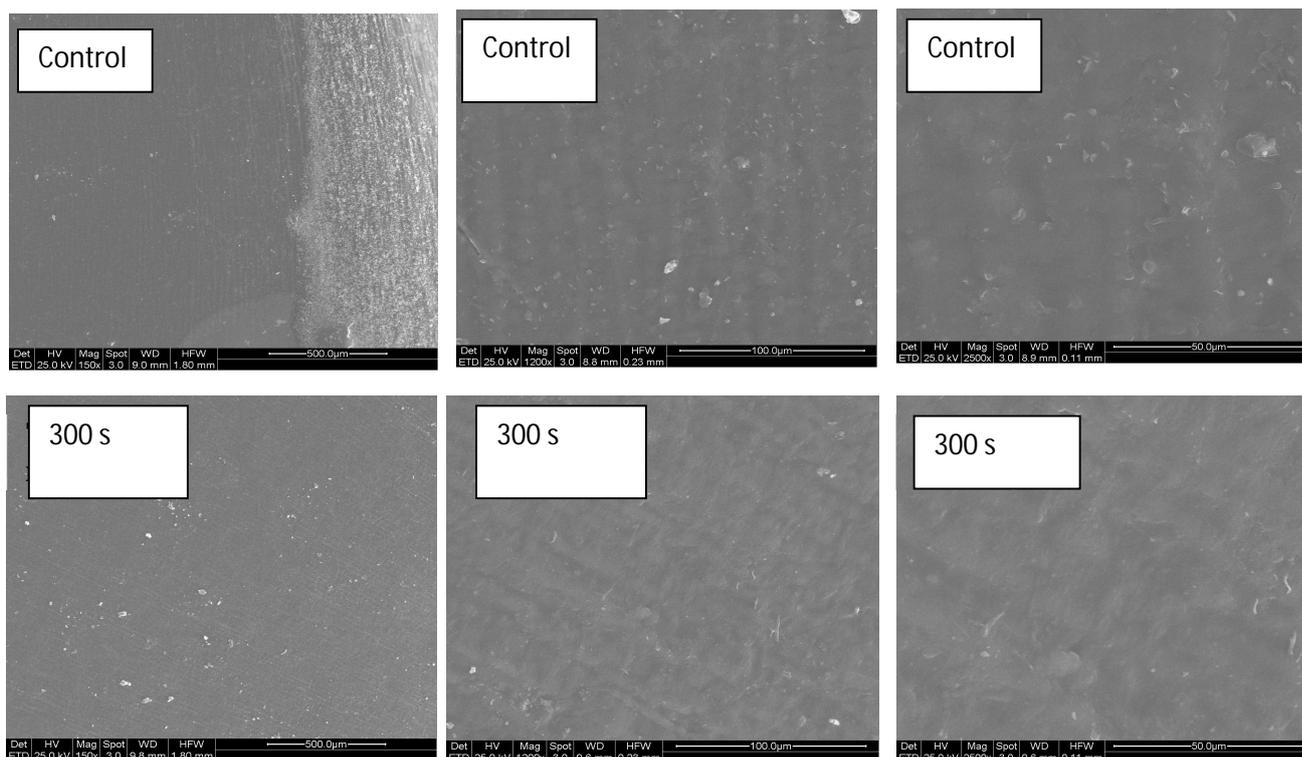
**Figure 27:** Images SEM des graines traitées pendant 300 s et des graines non traitées en mode post décharge spatiale



**Figure 28:** Images SEM des graines traitées pendant 900 s et des graines non traitées en mode post décharge spatiale



**Figure 29:** Images SEM des graines traitées pendant 900 s et des graines non traitées en mode post décharge temporelle

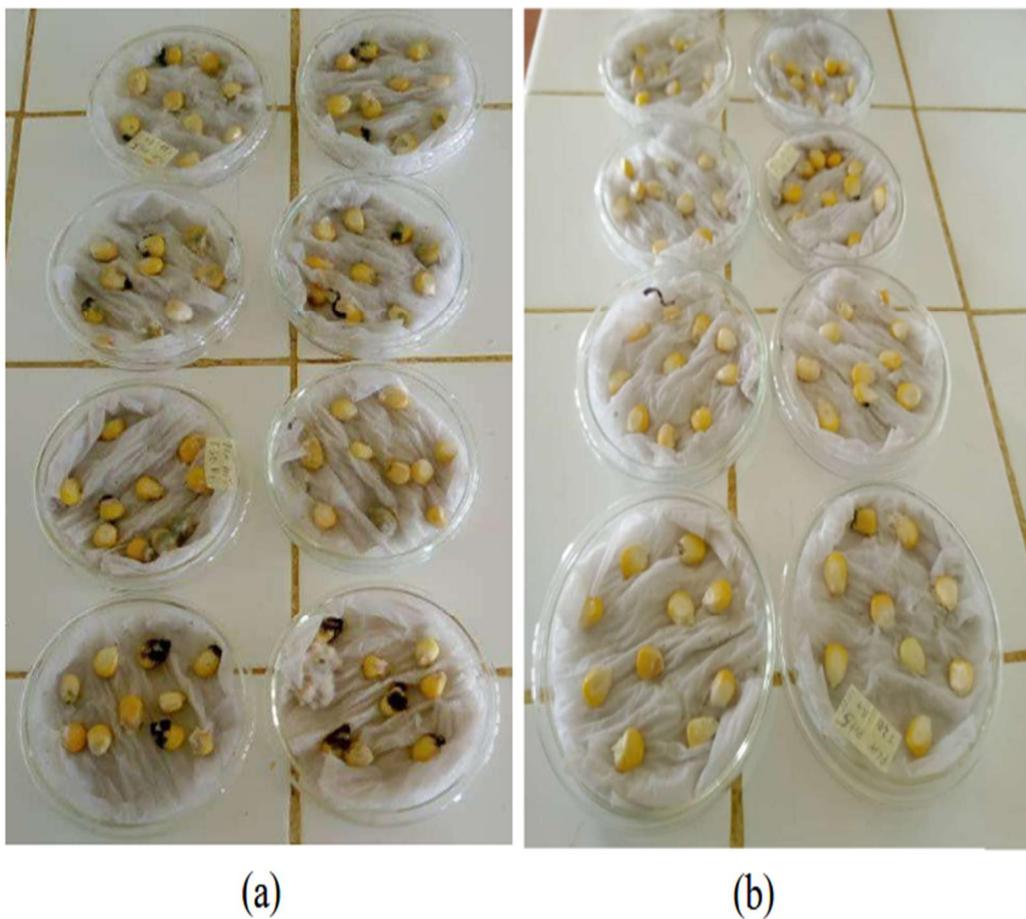


**Figure 30:** Images SEM des graines traitées pendant 300 s et des graines non traitées en mode post décharge temporelle

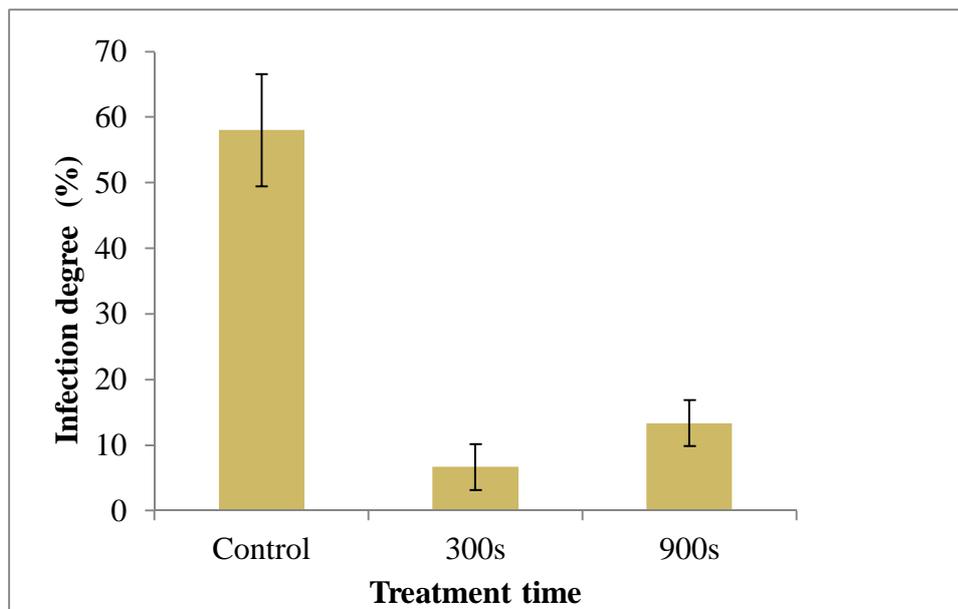
### III.5. Analyse des agents pathogènes sur les graines de maïs

Les champignons présents sur les semences de céréales peuvent affecter la qualité des récoltes et sont responsables de la détérioration des semences et des germes pendant le stockage. Les grains de maïs sont connus pour être de bons substrats pour la croissance de champignons tels qu'*Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* et les espèces de *Fusarium* (Niaz et *al*, 2009 ; Abe et *al*, 2015). Ces espèces peuvent infecter les grains alimentaires en produisant des toxines, qui provoquent des maladies chez l'homme ou les animaux utilisant les graines comme nourriture. La Figure 31 montre l'image de graines traitées au plasma pendant 300 s et de graines non traitées. Le même test de pathogénicité a été effectué sur les deux groupes d'échantillons. Les pathogènes apparaissent clairement sur les semences non traitées [Figure 31(a)]. Comme toutes les semences étaient saines avant le test, les semences non traitées sont donc attaquées, contrairement aux semences traitées au plasma, dont la plupart résistent à l'attaque de ces mêmes agents pathogènes [Figure 31(b)]. Ces résultats ont été quantifiés en calculant le degré d'infection. Le degré d'infection des semences non traitées est d'environ 58 % alors que celui des semences traitées 300 s et 900 s n'est que de 6,7 et 13,4 % respectivement (Figure 32). Le prétraitement des semences au plasma a permis une réduction significative ( $P < 0,05$ ) de la

charge fongique quelle que soit la durée du traitement. Cette caractéristique a également été démontrée par Braşoveanu et al, (2015) lors du traitement des semences de maïs avec un plasma à décharge lumineuse à basse pression pendant 2 à 20 min ou lors du traitement à l'air-DBD pendant 60 et 300 s dans le but de réduire l'apparition de pathogènes sur les semences de maïs (Zahoranova et al, 2018). Récemment, Filatova et al, (2020) a également montré l'efficacité du traitement des semences par plasma à basse pression et radiofréquence pour la suppression d'un certain nombre de maladies fongiques des cultures de maïs. Ils ont démontré que le niveau d'infection des plants de maïs par les semences traitées était trois fois inférieur à celui du contrôle.



**Figure 31:** Images du développement des pathogènes sur les graines non traitées (a) comparées aux graines traitées au plasma 300 s (b).



**Figure 32:** Degré d'infection des graines non traitées et des graines traitées au plasma pendant 300 et 900 s.

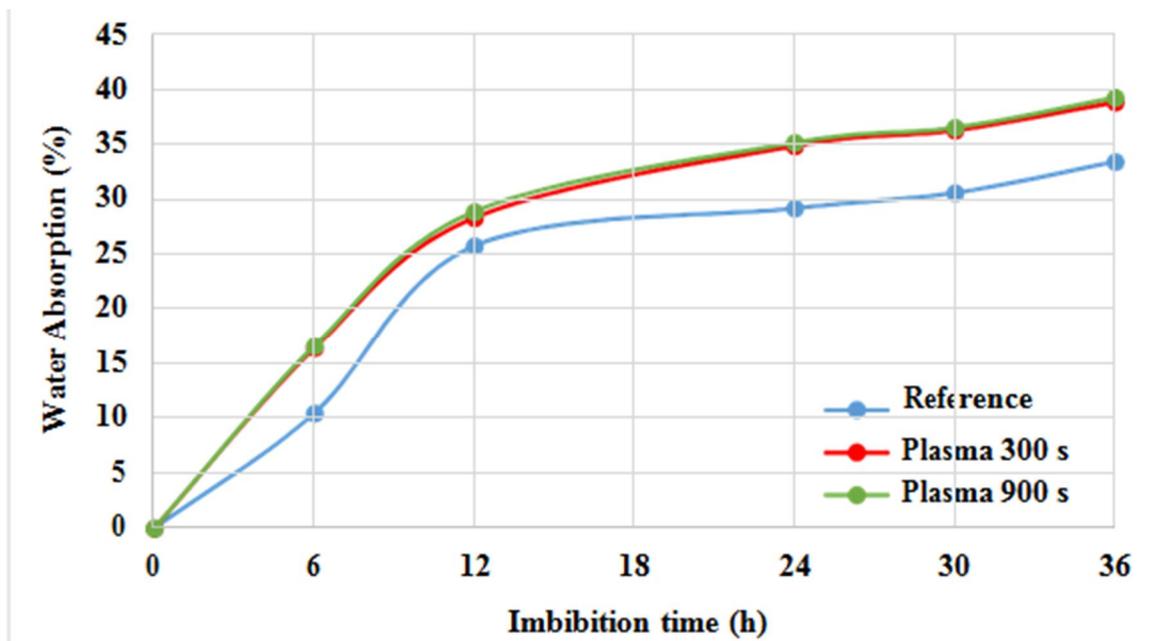
Il est bien connu que le plasma peut interagir avec les surfaces par des mécanismes complexes impliquant des radiations UV, un transfert de chaleur, des particules chargées, des espèces chimiquement actives, etc... Dans notre étude, les expériences ont été menées dans la zone de post décharge spatiale, loin de la partie émissive du panache de plasma, de sorte que nous pensons que le rayonnement UV n'a pas d'effet significatif sur le processus d'inhibition des agents pathogènes transmis. L'effet thermique peut également être écarté, car la température des échantillons est restée pratiquement inchangée pendant le processus. Ainsi, les ROS ( $\text{HO}^\circ$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $^\circ\text{O}_2\text{H}$ ) et les RNS ( $\text{NO}^\circ$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{NO}^{2-}$ ,  $\text{NO}^{3-}$ ,  $\text{ONOOH}$ ,  $\text{ONOO}^-$ ) générés par le plasma d'air humide seraient alors responsables de cette inhibition des pathogènes. La réactivité de ces espèces reste présente plusieurs heures, voire plusieurs jours après leur production comme le montre l'effet de la post-décharge temporelle du plasma Glidarc (Moussa et *al*, 2007 ; Kamgang-Youbi et *al*, 2007). Le stress oxydatif sur les micro-organismes, tel que rapporté par Kamgang et *al*, (2007), et Moreau et *al*, (2007), serait responsable de l'inhibition des pathogènes. Auparavant, le plasma Glidarc était utilisé pour le traitement de surfaces inanimées dans le but de favoriser l'émergence bactérienne, les modifications des polymères et de l'acier inoxydable induites par l'air humide, le traitement au plasma Glidarc, améliorerait la fixation bactérienne de l'épiderme de S (Kamgang et *al*, 2009). Cette étude a été menée en exposant le substrat dans la zone du plasma de décharge, ce qui peut considérablement affecter les propriétés de surface du matériau. L'amélioration de l'adhérence peut être considérée comme positive ou négative selon les applications, mais dans le but de diminuer le nombre de

champignons transmis par les semences, il est préférable qu'un traitement réduise la présence ultérieure de pathogènes. Sur la base des résultats obtenus ici, nous pouvons donc confirmer que le traitement en post-décharge spatial du plasma Glidarc est efficace pour améliorer le stockage des semences de maïs.

De plus l'humidité relative de l'air et la teneur en humidité de la surface du maïs jouent un rôle important, car elles sont la principale source de radicaux  $\text{OH}\bullet$ . Ces radicaux  $\text{OH}\bullet$  détruisent les molécules d'ADN, mitochondries ainsi que d'autres composants cellulaires (Thirumdas et *al*, 2015). L'autre raison de l'inactivation pourrait également être due à l'oxydation des acides nucléiques et des acides aminés des microbes (Song et *al*, 2009). La profondeur de pénétration du plasma, ont montré que les espèces réactives tels que le peroxyde d'hydrogène a une profondeur de pénétration 1  $\mu\text{s}$  et est relativement stable, d'autres espèces à savoir l'oxygène singulet et les radicaux hydroxyles ont des profondeurs de pénétration 30 nm, 1 nm respectivement (Møller et *al*, 2007). Xiong et *al*, (2011), ont étudié la profondeur de pénétration d'un jet de plasma dans les biofilms formés par la bactérie *Porphyromonas gingivalis* à l'aide d'un microscope confocal à balayage laser. Il a été constaté que le plasma était capable d'inactiver les cellules bactériennes jusqu'à une profondeur de 15  $\mu\text{m}$ .

### **III.6. Effet du plasma sur l'absorption d'eau**

Les résultats de l'absorption d'eau indiquent que les graines absorbent rapidement au début de l'imbibition (les 12 premières heures), puis plus lentement au cours des dernières heures pour atteindre environ 40 % pour les graines traitées et 33 % pour les graines non traitées (Figure 33). Les échantillons traités au plasma pendant 300 et 900 s ont absorbé plus d'eau que les échantillons témoins, quel que soit le temps d'imbibition. En outre, aucune différence significative n'a été enregistrée dans les résultats des deux groupes de semences traitées ( $P < 0,5 \%$ ), ce qui indique que la durée du traitement n'a pas eu d'influence sur l'absorption d'eau dans cette étude. L'amélioration de l'absorption d'eau pour les semences traitées au plasma observée dans cette étude est conforme aux observations d'autres auteurs pour plusieurs types de semences (Dobrin et *al*, 2015 ; Zahoranova et *al*, 2018 ; Vilichko et *al*, 2019).

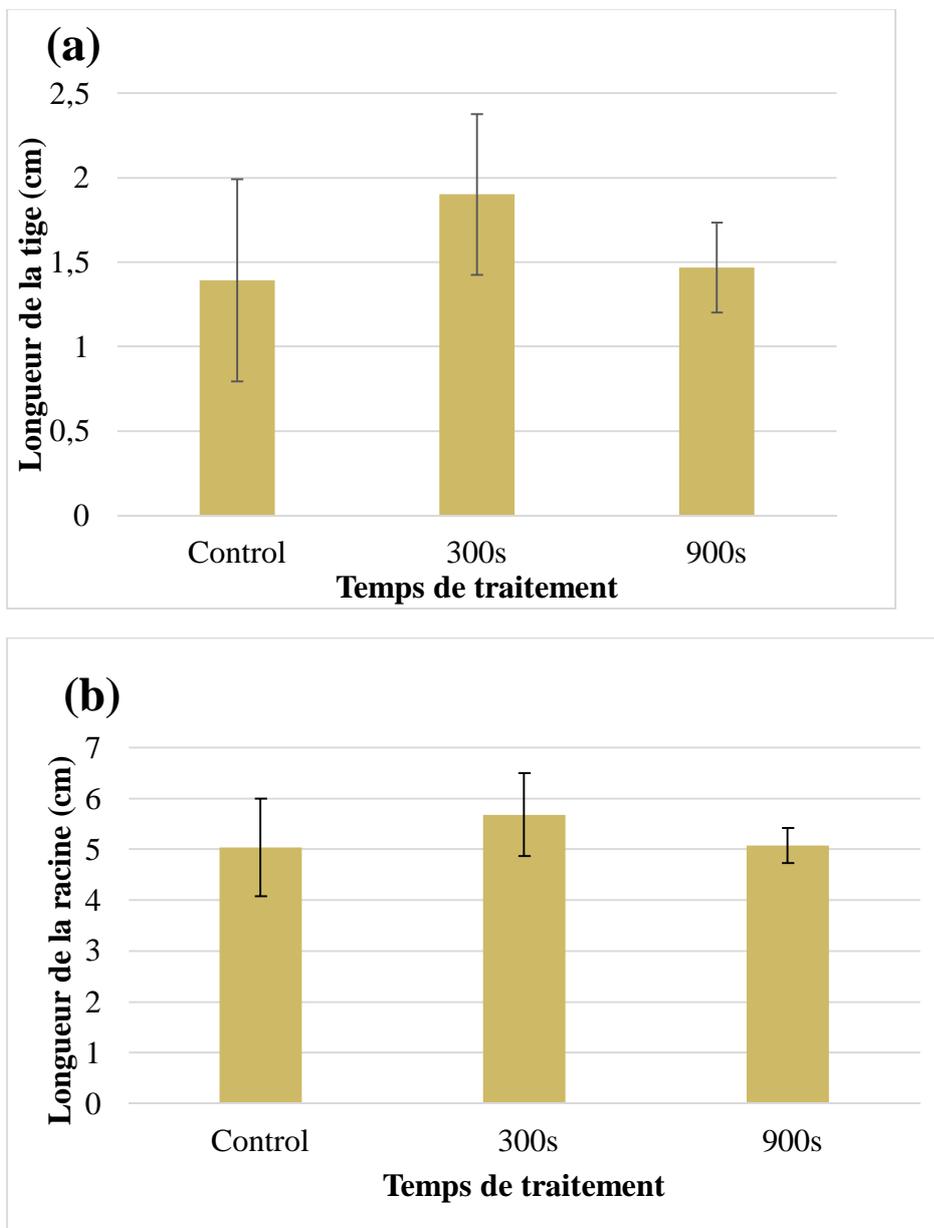


**Figure 33:** Absorption d'eau à 25 °C pour les semences de maïs traitées au plasma Glidarc (300 et 900 s) et les semences de maïs témoin non traitées (référence).

L'absorption initiale de l'eau est nécessairement liée à l'hydrophilie de la surface de la graine. Auparavant, nous avons montré une augmentation de l'hydrophilie de la surface de l'argile kaolinitique après un plasma d'air humide en utilisant le même dispositif, en raison de l'augmentation des groupes hydroxyles à la surface du matériau (Tamo et al, 2016). D'autres études antérieures utilisant le Glidarc avec l'échantillon placé dans la zone de décharge ont également montré une augmentation de l'hydrophilie des matériaux polymères et métalliques (Moreau et al, 2007 ; Hoang et al, 2009). Cette caractéristique semble donc générale au Glidarc de l'air humide lorsque les échantillons y sont exposés. En effet, il y a une concentration croissante de groupes polaires, contenant de l'oxygène et de l'azote, à la surface des échantillons de graines traitées. Une plus grande hydrophilie entraîne une diminution de l'angle de contact entre l'eau et l'échantillon et donc une meilleure absorption de l'eau dans le cas des graines. Ces résultats ont été démontrés par Velichko et al, (2019) sur des graines de blé et par Ling et al, (2014) sur du soja. En utilisant le plasma glidarc, Kamgang et al, (2009), Faubert et al, (2016) ont également montré une réduction de l'angle de contact, mais sur des matériaux non vivants. Une meilleure absorption d'eau est souvent le signe d'une meilleure germination ultérieure.

### III.7. Amélioration de la germination

Le plasma Glidarc a été appliqué sur des graines de maïs pendant deux périodes de traitement différentes. La Figure 34 montre que le traitement au plasma Glidarc influence la germination des graines de maïs. La réponse la plus significative a été obtenue pour les semences traitées pendant 300 s avec un taux de germination d'environ 96 %, largement supérieur à 78 % obtenu pour les semences non traitées. Aucune différence significative n'a été enregistrée pour les changements de germination au moment du traitement de 900 s par rapport au témoin ( $P > 0,05$ ).



**Figure 34:** Effet du traitement au plasma sur la croissance des semis : (a) longueur de la pousse et (b) longueur de la racine.

Le traitement au plasma Glidarc des semences de maïs a également affecté les caractéristiques de la croissance des semis, notamment la longueur des racines et des pousses après 7 jours de culture. En ce qui concerne la longueur des pousses [Figure 34(a)], le temps de traitement de 300 s a stimulé ce paramètre de 36,7 %, ce qui donne des résultats significativement différents ( $P < 0,05$ ) de ceux des semences non traitées. Pour les semences traitées pendant 900 s, une légère amélioration de 5,8% a été obtenue et les calculs statistiques n'ont révélé aucune différence significative ( $P > 0,05$ ) dans la longueur des pousses par rapport aux semences témoins. En ce qui concerne la longueur des racines [Figure 34(b)], les résultats indiquent une longueur moyenne de 5,03 cm pour les semences non traitées après 7 jours de germination, 5,68 et 5,07 cm pour les semences traitées pendant 300 s et 900 s respectivement. Le traitement au plasma n'a pas eu d'effet négatif sur la croissance, puisqu'une légère augmentation a été obtenue, même si elle n'est pas significativement différente ( $P > 0,05$ ) quelle que soit la durée du traitement (par rapport au témoin).

Globalement, le traitement au plasma Glidarc des graines de maïs affecte les caractéristiques du taux de germination et de la croissance des plants. L'interaction du plasma avec la surface des graines entraîne une germination plus rapide et de meilleurs rendements. La réponse à une exposition au plasma à 300 s est plus efficace qu'à 900 s et les résultats peuvent être liés au degré d'infection (Figure 32), où l'inhibition des agents pathogènes a été plus importante à 300 s. La Figure 33 a montré une meilleure absorption d'eau pour les semences traitées au plasma à 300 s et ce fait peut également expliquer le taux de germination relativement meilleur pour ce groupe de semences. En outre, les résultats des tests de germination ont été corroborés par ceux du SEM et de la FTIR. En effet, nous avons montré qu'après 300 s de traitement, la surface de la graine n'a pas été modifiée (Figures 27 et 30) mais qu'après 900 s, des différences significatives ont été observées par rapport à l'échantillon témoin (Figures 28 et 29). Une longue période de traitement aurait donc pour effet, en plus de produire les espèces réactives nécessaires à l'amélioration de la germination, d'induire des changements dans le matériel de base, ce qui retarderait la germination (Sera et al, 2010). Ces résultats, qui n'avaient pas été obtenus auparavant pour le plasma Glidarc, ont été rapportés dans des études antérieures utilisant d'autres dispositifs à plasma pour le traitement des semences de maïs. En effet, Zahoranová et al, (2018) a stimulé la longueur des racines et des pousses de semis de maïs de 12 % et 35 % respectivement dans les 60 secondes suivant le traitement par DBD du plasma atmosphérique et, de même un temps d'exposition plus long a diminué les premiers paramètres de croissance. Braşoveanu et al, (2015) a observé un phénomène similaire en utilisant la

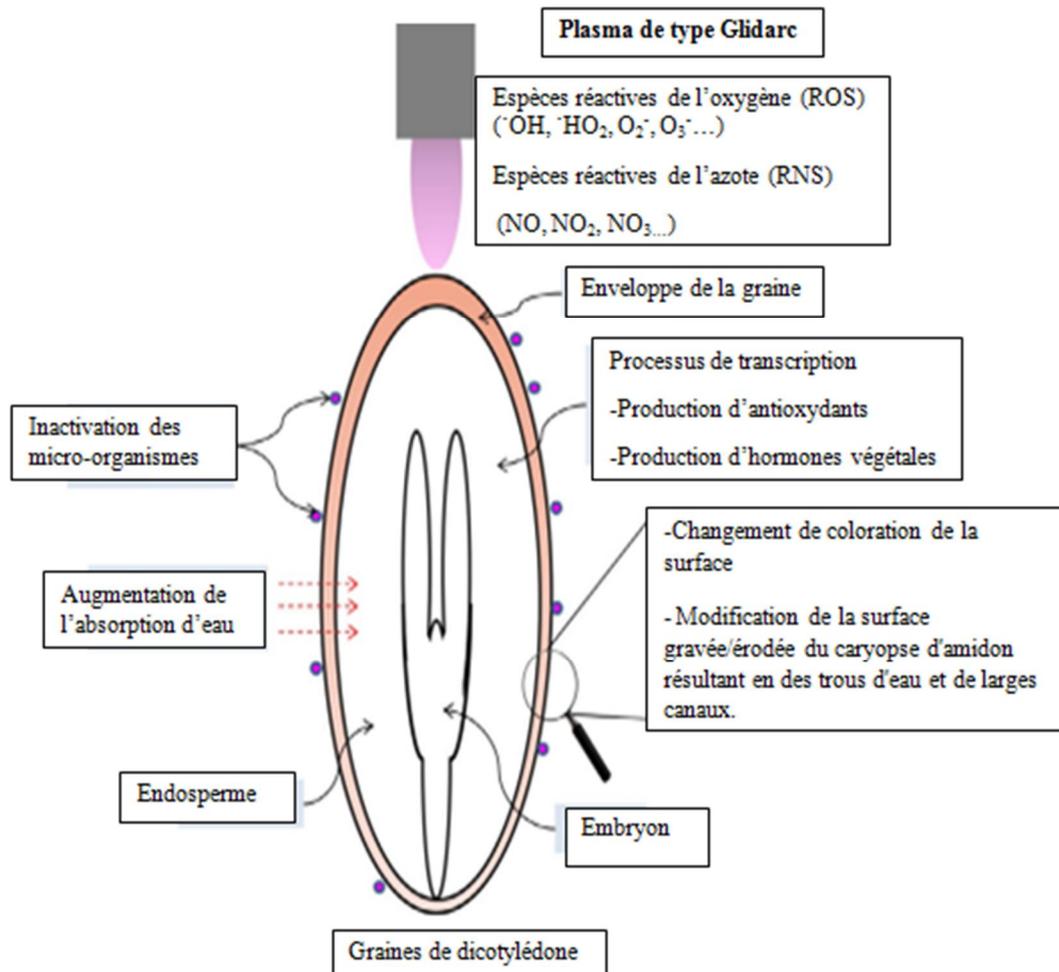
décharge lumineuse à basse pression du plasma atmosphérique pour le traitement des semences de maïs. Matra *et al.*, (2016) a également montré que, après 7 jours de culture, la longueur des racines et des pousses du traitement par plasma non thermique des graines de radis était plutôt plus longue que celle du groupe contrôlé. En utilisant le plasma DBD, Mazandarani *et al.*, (2020) a montré les effets positifs du traitement par plasma sur la germination des graines d'orge et la croissance des semis avec 18,28 % d'augmentation du GP et 38,55 % et 31,93 % d'augmentation de la hauteur des pousses et de la longueur des racines, respectivement. En étudiant la capacité et l'énergie de germination des graines de *Lavatera thuringiaca* L, Pawlat *et al.*, (2018) a montré que la stimulation du plasma glidarc avant le semis améliorait ces paramètres de germination.

La germination est le début du développement d'un nouvel individu végétal, à partir d'une graine placée dans des conditions favorables. Il existe différents événements associés à la germination, allant de l'absorption initiale d'eau par les graines sèches à l'émergence de la radicule à travers le tégument de la graine. La germination des graines s'accompagne d'une production intensive d'espèces oxydantes telles que l'anion superoxyde, le peroxyde d'hydrogène, le NO et ses dérivés. La teneur en protéines peut être un indicateur d'une germination plus rapide (Henselova *et al.*, 2012). En effet, l'analyse de la spectroscopie FTIR (Figure 26) a montré que les teneurs en protéines des graines traitées sont plus élevées que celles du témoin non traité, ce qui permet un développement plus rapide des plantules.

Dans cette étude, le gaz porteur est de l'air humide et le composé à base d'azote devrait favoriser la germination. En effet, les travaux menés par Volin *et al.*, (2000) sur l'influence des gaz plasmiques ont montré une amélioration de la germination des semences de maïs par prétraitement du plasma lorsque le gaz plasmique contenait de l'azote (aniline ou hydrazine) contrairement aux gaz ne contenant pas d'azote (cyclohexane, fluorocarbone).

En somme nous pouvons dire qu'avec l'augmentation de la population mondiale, l'agriculture est sous pression pour produire plus de nourriture avec des terres et des ressources naturelles limitées. Les technologies du plasma ont récemment été explorées pour leurs contributions possibles aux opérations de production agricole. La Figure 35 résume le mécanisme d'action du traitement par plasma qui entraîne une décontamination des semences, l'amélioration de la germination des graines, l'amélioration de la croissance des plantes, la lutte contre les insectes et les champignons dans les graines stockées, une meilleure absorption d'eau et la récupération des sols contaminés. La décontamination des semences et l'amélioration de

la croissance des plantes dans l'agriculture en serre grâce à la technologie du plasma offre la possibilité de pratiquer l'agriculture biologique sans utiliser de pesticides. Cependant, la mise à l'échelle des technologies du plasma pour des opérations agricoles pratiques nécessite des efforts importants de la part de la communauté de recherche sur le plasma.



**Figure 35:** Résumé des réactions qui ont lieu entre la graine et le plasma.

### III.8. Evaluation du bilan et coût énergétique de traitement

Depuis plusieurs décennies, le problème majeur des industriels était de faire des gros profits en utilisant des procédés moins coûteux. Quelques années plus tard, des problèmes d'accès aux intrants sont apparus, et une situation très préoccupante pour plusieurs pays en a résulté. Il devient donc impératif de trouver des solutions adéquates pour résoudre les problèmes d'accès aux intrants pour la fertilisation des sols. La plupart des paysans aujourd'hui sont contraints de payer des intrants à des coûts très élevés. Le problème de coût préoccupe toutes les grandes sociétés industrielles, il devient donc impératif de trouver des procédés propres et

moins coûteux. Afin de proposer la technologie plasma aux industriels, il s'avère nécessaire d'établir une estimation du coût de production de l'engrais azoté ainsi que les espèces oxydantes dans le but d'inhiber des champignons présents sur les graines de maïs stocké. Un compte d'exploitation de la production des semences de maïs avec et sans technologie plasma glidarc sur une surface de 1 ha a été également analysé. Pour un volume d'échantillon de 430 mL, une tension de travail de 600 V et une intensité de 160 mA, le calcul de l'énergie électrique consommée a été opéré à partir de l'expression ci-dessous au moyen des paramètres suivants :

I : l'intensité du courant (A),

U : la différence de potentiel (d.d.p) aux bornes des électrodes (V),

$\Delta t$ : la durée du traitement (s),

P : la puissance électrique donnée par la relation suivante :  $P = U \times I$  (watt),

W : l'énergie électrique donnée par  $W = U \times I \times \Delta t$  (W.s)

En définitif l'énergie électrique consommée en kWh sera donnée par la relation :

$$W(kWh) = \frac{P\Delta t}{3600} \times 0,001 \quad (70)$$

Pour le prix du kWh dans les industries camerounaises, classées comme gros consommateurs d'énergie électrique, il est fixé à 90 fcfa.

**Tableau XVII** : Estimation du coût de production d'engrais azoté ainsi que du taux d'infection des champignons du maïs par plasma glidarc.

|   |       |       |
|---|-------|-------|
| Tension U(V)  | 600   |       |
| Intensité (mA)  | 160   |       |
| Durée de traitement de l'eau du robinet au plasma (s) | 300   | 900   |
| [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mg/L)                | 443   | 1075  |
| Taux d'infection (%)                                  | 6,7   | 13,3  |
| Energie consommée (kWh)                               | 0,008 | 0,024 |
| Coût total en Fcfa                                    | 0,72  | 2,16  |

*Source : Auteur*

**Tableau XVIII** : Compte d'exploitation de la production des semences de maïs avec et sans technologie plasma Glidarc sur une surface de 1 ha

| Description  | Prix unitaire (FCFA) | Quantité | Coût sans Plasma (FCFA/ha) | Coût avec Plasma (FCFA/ha) |
|--|----------------------|----------|----------------------------|----------------------------|
| <b>1. Main d'œuvre</b> (Défrichage, dessouchage, nettoyage/andainage, piquetage-semis, labour (au tracteur, culture attelée ou manuel), sarclo-buttage, , irrigation, gardiennage, inspection, récolte/transport, pré-séchage ou séchage, égrenage, manutention, vannage, calibrage, triage, ensachage, suivi/supervision) | 2000                 | 100      | 200000                     | 200000                     |
| <b>1.1.</b> épuration, épandage engrais, traitement phytosanitaire   | 2000                 | 20       | 40000                      | 00                         |
| <b>Sous Total 1</b>  | 4000                 | 120      | 240000                     | 200000                     |
| <b>2. Intrants</b> (Semences de base des lignées pures, engrais, herbicides totaux et sélectifs, fongicides et insecticides)   | 35000                | 07       | 245000                     | 00                         |
| <b>2.1. Production d'engrais azotés (Plasma)</b>   | 0,72                 | 250000   | 00                         | 180000                     |
| <b>2.2. Coût d'engrais azotés dans le commerce</b>   | 45000                | 03       | 135000                     | 00                         |
| <b>Sous Total 2</b>  | 80000,72             | 250010   | 380000                     | 180000                     |
| <b>3. Matériel de travail</b>  |                      |          |                            |                            |
| Petit matériel (amortissement), sacs vides, égreneuse (amortissement), Bâche (amortissement)   | 500                  | 100      | 50000                      | 50000                      |
| <b>Sous Total 3</b>  | 500                  | 100      | 50000                      | 50000                      |
| <b>4. Communication</b> (téléphone, plaque)  | 1000                 | 10       | 10000                      | 10000                      |
| <b>Sous Total 4</b>  | 1000                 | 10       | 10000                      | 10000                      |
| <b>5. Transport</b>  | 1500                 | 10       | 15000                      | 15000                      |
| <b>Sous Total 5</b>  | 1500                 | 10       | 15000                      | 15000                      |
| <b>6. Construction de cribs</b>  |                      |          |                            |                            |
| Cribs de 5 tonnes (amortissement)  | 10000                | 100      | 1000000                    | 00                         |
| <b>Sous Total 6</b>  | 10000                | 100      | 1000000                    | 00                         |
| <b>7. Emballage</b>  |                      |          |                            |                            |
| Emballage, scellage, étiquettes  | 10000                | 12       | 120000                     | 120000                     |
| <b>Sous Total 7</b>  | 10000                | 12       | 120000                     | 120000                     |
| <b>GRAND TOTAL (T1+...+T7)</b>   | 62020                | 1219     | 1650000                    | 410000                     |
| <b>Production des semences commerciales (Qs)</b>   | 800                  | 1000 kg  | 800000                     | 800000                     |
| <b>Revenu issu des semences commerciales (RQs=Qs x Prix/kg)</b>  | 800                  | 5000kg   | 4000000                    | 4000000                    |
| <b>Revenu issus des Rebutés des semences (RRb : Grains + raffles)</b>  | 1000                 | 100      | 100000                     | 100000                     |
| <b>CHIFFRE D'AFFAIRE (RQs + RRb)</b>   | 18000                | 51000    | 4100000                    | 4100000                    |
| <b>BILAN (CHIFFRE D'AFFAIRE - GRAND TOTAL)</b>   | 44000                | 50641    | <b>2450000</b>             | <b>3690000</b>             |

*Source : Auteur*

Dans cette thèse, le plasma Glidarc en mode post-décharge spatiale et temporelle ont été testé pour le traitement et la germination des semences de maïs, la culture la plus populaire au Cameroun et parmi les plus importantes au monde. Le procédé Glidarc, une méthode non polluante, a inhibé efficacement la croissance des agents pathogènes dans les semences de maïs tout en favorisant la performance des paramètres de biomasse (% de germination, longueur des tiges, absorption d'eau, taux de chlorophylle). Des résultats intéressants ont été obtenus en soumettant des échantillons de semences à des espèces réactives d'oxygène et d'azote générées par un plasma d'air humide pour des traitements de 300 et 900 s avec de meilleurs résultats pour un temps d'exposition plus court. Ces résultats sont bien corrélés avec l'analyse MEB et la spectroscopie IRTF effectuées sur des semences non traitées et traitées. La méthode du plasma serait une bonne alternative aux pesticides ou autres produits chimiques, qui sont des intrants très coûteux ayant des effets dévastateurs sur l'environnement et la santé humaine.

# CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Il était question dans ce travail d'étudier l'influence du traitement plasma de type glidarc sur la conservation et la germination des semences de maïs. Chemin faisant les semences de maïs ont été semées sur une superficie de 64,4 m<sup>2</sup> et arrosées avec de l'eau du robinet et l'eau activées par plasma glidarc afin de mettre en évidence les propriétés acidifiantes que possède l'eau activées résultant du radical NO° dans la décharge qui au contact de l'air conduit à la formation successive des nitrites puis celle des ions nitreux et nitriques essentiel pour la croissance des plantes. D'une façon générale, les plantes arrosées à 300 et 900 secondes ont eu des valeurs plus élevées que le témoin pour ce qui est des paramètres physico-chimiques (pH, Conductivité, STD, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) et les paramètres de croissance végétale (longueur et largeur des feuilles, diamètre au collet, teneur en chlorophylle). L'ensemble des résultats de cette partie a laissé entrevoir quelques applications du plasma en agriculture en mode post décharge temporelle.

Dans l'optique d'améliorer l'état sanitaire des semences de maïs, le traitement des graines de maïs en mode post-décharge spatiale a permis d'inhiber efficacement la croissance des pathogènes sur les graines de maïs tout en favorisant leur performance et le rendement des cultures. Nous avons obtenu des degrés d'infection de 6,7 et 13,4 % en soumettant des échantillons de semences à des espèces réactives d'oxygène et d'azote générées par l'air humide pendant des temps de traitements de 300 et 900 secondes respectivement. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour le temps d'exposition plus court (300 s). Ces résultats sont bien corrélés avec l'analyse MEB et la spectroscopie FTIR réalisées sur les graines non traitées et traitées. La méthode plasma serait une bonne alternative aux pesticides ou autres produits chimiques, qui sont très coûteux et ont des effets dévastateurs sur l'environnement et la santé humaine.

Ce travail montre que le traitement des semences de maïs par plasma glidarc en mode post décharge spatiale se présente comme une technique très efficiente et propre de traitement des graines avant stockage. Cette technique opérant en différé, donne à espérer pour des travaux futurs la possibilité de réduire les consommations énergétiques liées à la création de la décharge dans les gaz lors de la génération du plasma ; ceci à travers le stockage et recyclage des gaz ionisés fortement réactifs, d'approfondir les recherches sur les mécanismes complexes d'interaction entre les espèces de plasma et la surface des graines et les mécanismes biochimiques qui sous-tendent les changements physiologiques dans les semis et les plantes. Il est essentiel de faire une analyse économique des intrants entre le plasma glidarc et les engrais commerciaux. Ces résultats pourraient permettre à l'industrie agricole d'utiliser pleinement le potentiel de la technologie du plasma à l'avenir.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Abe C., 2015.** Fungi isolated from maize (*Zea mays* L.) grains and production of associated enzyme activities, *Int. J. Mol. Sci.*, 16, 12, 15328–15346.

**Abena Koah G., Biwole Mbioc N., Kohn P G, Abouna H., Fououssong J., Nkolo E., 2005.** Physiques-chimie Premières C,D,E (Nouveaux programmes), Les Classiques Africains, NO 955,.216., Cameroun.

**AGPM.,2013.** Association Générale des Producteurs de Maïs.<http://www.agpm.com>.accessed, consulté le lundi, 15 novembre 2021 à 17 heures.

**Akanvou L., 2003.** Rapport étude des contraintes sur le maïs en Côte d'Ivoire. *Document interne CNRA*, Cote d'Ivoire.

**Akob C. A., and Ewete F. K., 2007.** The development and the field infestation of *Sitophiluszeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) on maize in the western highlands of Cameroon. *Journal of Cameroon Academic Science*, 7: 77-84.

**Aroga R., 1987.** Les insectes ravageurs du maïs en champs dans la zone de basse altitude à forte pluviométrie du Cameroun. Tentative d'inventaire. *Revue Science et Technique*, serie Science Agronomique 3 : 91-95.

**Aroga R., 1997.** Dynamique des populations de foreurs du maïs et leurs ennemies naturelles dans un agro-écosystème maïs-arachide du Centre du Cameroun. *Thèse de doctorat*. Université du Quebec Montréal. Canada 114.

**Ayuk- Takem J A., Ekebil J P., Cheda H R., 1982.** Problèmes and potential of maize research and production in Cameroon., *Revue Science et Technique*, 2 (4): 5-16.

**Badu-Apraku B., 2003.** Maize revolution in west and central Africa. IITA.

**Beernaert F., and Bitondo, D., 1992.** A simple and Practical Method to Evaluate Analytical Data of Soil Profiles. CUDs. *Soil Science Department*. Belgia Cooperation Dschang, Cameroon, 65.

**Beernaert F., and Bitondo D., 1993.** Land Evaluation Manual, part I and II. *Department of Soil Sciences*, University of Dschang, Cameroon: 396.

- Benayad N., 2008.** Les huiles essentielles extraites des plantes médicinales marocaines : moyen efficace de lutte contre les ravageurs des denrées alimentaires stockées. Projet de recherche. Université Mohammed V-Agdal. Algérie. 63.
- Benstaali B., 2001.** Etude des propriétés chimiques des espèces HO° et NO° créées par un plasma non thermique d'air humide inoxydables, *Thèse de Doctorat* d'état, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie.
- Benstaali B., Boubert P., Cheron B G., Abdou A., Brisset J-L., 2002.** Density and rotational temperature measurements, of NO and HO radicals produced by gliding arc in humid air and their interaction with aqueous solutions. *Plasma Chem. Plasma proc.* 22 (4), 553-571.
- Benstaali B., Moussa D., Addou A., and Brisset J-L., 1998.** Plasma treatment of aqueous solutes: Some chemical properties of a gliding arc in humid air. *Eur.Phys.J. Applied Phys.* 4, 171-179.
- Berger J., 1962.** Maize Production and the Manuring of Maize. Centre d'étude de l'azote. 283.
- Bermúdez-Aguirre D., Wemlinger E., Pedrow P., Barbosa-Canovas G., Garcia-Perez M., 2013.** Effect of atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli* in fresh produce. *Food Control* 34, 149–157.
- Billah M., Sajib S A., Roy N C., Rashid M M., Reza M A., Hasan M M., and Talukder M R., 2020.** Effects of DBD air plasma treatment on the enhancement of black gram (*Vigna mungo* L.) seed germination and growth. *Archives of biochemistry and biophysics*, 681, 108253.
- Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., and Drori E., 2012.** Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds, *Sci. Rep.*, 2, (1) 741.
- Brasoveanu M., Nemtanu M R., Surdu-bob C., Karaca G., and Erper I., 2015.** Effect of glow discharge plasma on germination and fungal load of some cereal seeds, *Romanian Rep. Phys.*, 67, (2), 617–624.
- Bray R H., and L T Kurtz., 1945.** Détermination des formes organiques totales et disponibles de phosphore dans les sols. *Sciences du sol*, 59,39-45.

**Brisset J L., and Pawlat J., 2016.** Chemical effects of air plasma species on aqueous solutes in direct and delayed exposure modes: Discharge, post - discharge and plasma activated water. *Plasma chem. and plasma process*, 36, 355-381.

**Brisset J L., and Hnatiuc E., 2012.** Peroxynitrite a re-examination of the chemical properties of non thermal discharges burning in air over aqueous solutions. *Plasma Chem Plasma Process*, 32, 655-674.

**Brisset J-L., 2008.** Chemical reactivity of discharges and temporal postdischarges in plasma treatment of aqueous media. Example of gliding discharge treated solutions: *A review, Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, (16), 5761–5781.

**Brisset J-L., Moussa D., Doubla A., Hnatiuc E., Hnatiuc B., Kamgang Youbi G., Herry J M., Naitali M., Bellon Fontaine M N., 2008.** Chemical Reactivity of Discharge and temporal Post-Discharge in Plasma Treatment of Aqueous Media: Examples of Gliding Discharge Treated Solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 5761-5781.

**Brisset. J-L., 2009.** Décharges électriques glissantes à la pression atmosphérique et leurs applications à l'environnement, *Bulletin de l'union des physiciens*, (912), 257-280.

**Bruggeman P J., Kushner M J., Locke B R., Gardeniers J G E., Graham W G., Graves D B., Hofman-Caris R C H M., Maric D., Reid J P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J E., Garrick S C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krcma F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E C., Pawlat J., Petrovic Z L., Pflieger R., Reuter S., Schram D C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P A., Verlet J R R., Von Woedtke T., Wilson K R., Yasui K., Zvereva G., 2016.** *Plasma Sources Sci. Technol*, 25, 053002.

**Burge R M., and Duensing W J., 1989.** Processing and dietary fiber ingredient applications of corn bran, *Cereal Foods World*, 34, (7), 535–538.

**Burlica R., Kirkpatrick M J., and Locke B R., 2006.** Formation of reactive species in a gliding arc discharge with liquid water. *J. Electros*, 6435-43.

**Buxton G V., 1987.** Radiation chemistry of the liquid state (1) water and homogeneous aqueous solutions, in: Farhataziz. A., Rodgers. M.A.J., (Eds.), *Radiation Chemistry, Principles and Applications*, VCH, Weinheim, Germany, 321–376.

**Cauderon A., 2012.** Le maïs : importance économique, amélioration génétique et production. <http://www.gnis-pedagogie.org/>, consulté le Samedi 18 décembre 2021 à 10 heures.

**Chen H H., Chen Y K., and Chang H C., 2012.** Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice, *Food Chem.*, 135, (1), 74–79.

**CIRAD., 2002.** Memento de l'Agrome. Ministère des Affaires Etrangères. Centre de Coopération International et de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques (GRET). 1691.

**Clarke E A., and Steinle D., 1995.** Health and environmental safety aspects of organic colorant, *Rev. progress Color.*, 25, 1.

**Clements J S., Sato M., Davis R H., 1985.** Preliminary investigation of prebreakdown phenomena and chemical reactions using a pulsed high voltage discharge in water. *IEEE Trans. Ind. Appl. IA.*, 23, 1372–1379.

**Coulong D E., 1994.** A review and perspectives of biological control of African sugarcane stalkborer *Eldan asaccharina* Walker (Lepidoptera: pyralidae). *Agriculture Ecosystems and Environment* 18: 9-17.

**Cramer H H., 1967.** Plant protection and world crop production, 24. Leverkusen: Bayer.

**Czernichowski A., 1994.** Gliding arc applications to engineering and environment control. *Pure & Appl. Chem*, 66 (6), 1301–1310

**Czernikowski A., 2001.** Glidarc assisted preparation of the synthesis gas from natural and waste hydrocarbons gases. *Oil Gas Sci Technol-Rev IFP*. 6, 181–198.

**Danilejko Y K., Belov S V., Egorov A B., Lukanin, V I., Sidorov V A., Apasheva L M., and Gudkov S V., 2021.** Increase of Productivity and Neutralization of Pathological Processes in Plants of Grain and Fruit Crops with the Help of Aqueous Solutions Activated by Plasma of High-Frequency Glow Discharge. *Plants*, 10(10), 2161.

**Dasan B G., Onal-Ulusoy B., Pawlat J., 2017.** A New and Simple Approach for Decontamination of Food Contact Surfaces with Gliding Arc Discharge Atmospheric Non-Thermal Plasma. *Food Bioprocess Technol* 10, 650–661. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1847-2>.

**Dayonna P., Kevin D., Samid G., Christal-Anne A., Danil D., Gary F., Alexander F., Alexander R., Fridman G., 2013.** Reactive nitrogen species produced in water by nonequilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield, *Curr. Appl. Phys.*, (13), 19-29.

**De Groot I., 2004.** Protection des céréales et des légumineuses stockées. Fondation Agromisa, Wageningen. Deuxième édition. Pays bas. 74.

**Delassus M., 1968.** Les principales maladies du maïs dans l'Ouest Cameroun. *Agronomie Tropicale Volume 23*. ORSTOM-IRAT, 429-434.

**Depenyou F J., 2007.** Etude de l'interaction du plasma d'air humide de type décharge glissante à pression atmosphérique avec une métallique. Application à l'amélioration des propriétés anticorrosives d'un acier doux, *Thèse de Doctorat*, Université de Rouen (France).

**Dhayal M., Lee S Y., and Park S U., 2006.** Using low-pressure plasma for *Carthamus tinctorium* L. seed surface modification. *Vacuum* 80, 499–506.

**Djakaou I., 2012.** Elimination de solutés organiques polluants d'effluents liquides par plasma non thermique : comparaison des processus mis en jeu à l'interface liquide-plasma dans les procédés Glidarc et DBD, *Thèse de Doctorat* en cotutelle, Université Pierre et Marie-Curie (France) et Université de Yaoundé I (Cameroun).

**Djeugap F J., 2017.** Morphological and molecular identification of pathogenic fungi of *Monodora myristica* Dunal kernels and their response to different phytoextracts, *Int. J. Adv. Agricult. Res.*, vol. 5, pp. 66 –75.

**Dobrin D., Magureanu M., Mandache N B 2013.** The influence of non-thermal plasma treatment on wheat germination, 31st, IPIG Granada Spain.

**Dobrin D., Magureanu M., Mandache N B., and Ionita M-D., 2015.** The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 29, 255–260.

**Doebley J., 2004.** The genetics of maize evolution. *Annu. Rev. Genet.* 37-59.

**Dolan T J., 1993.** Electron and ion collisions with water-vapor, *J. Phys. D*, 26 (1), 4–8.

**Doubla A., 2002.** Propriétés oxydo-réductrices des plasmas non thermiques d'air humide : application à la dépollution des eaux et à la corrosion de matériaux métalliques, *Diplôme d'Habilité à Diriger les recherches*, Université de Rouen.

**Doubla A., Abdelmalek F., Khelifa K., Addou A., Brisset J-L., 2003.** Post-discharge plasmachemical oxidation of iron (II) complexes. *J. Appl. Electrochem.* 33, 73 –77.

**Doubla A., Bouba B L., Fotso M., Brisset J L., 2008.** Plasma chemical decolourisation of Bromothymol Blue by gliding electric discharge at atmospheric pressure, *Dyesand Pigments.*,77, 118-124.

**Du C M., Shi T H., Sun Y W., Zhuang X E 2008.** Décolorization of Acid Orange 7 solution by gas-liquid gliding arc discharge plasma, *J. Hazard. Mat.*154, 1192-1197.

**Dubinov A E., Lazarenko E M., Selemir V D., 2000.** Effect of glow discharge air plasma on grain crops seed. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 28, 180–183.

**Eisenberg G., 1943.** Colorimetric determination of hydrogen peroxide, *Indus.Eng. Chem.*,15, 327-328.

**Ernst W H O., and Peterson P J., 1994.** The role of biomarkers in environmental assessment (4). Terrestrial plants. *Ecotoxicology*, 3(3), 180-192.

**Euroconsult, 1989.** Agricultural Compendium for Rural Development in the Tropics and the Subtropics. Elsevier.

**Fabiola J., 2006.** Contrôle de la vitesse de germination chez le maïs (*Zea mays*) : étude de la voie de biosynthèse des acides aminés issus de l'aspartate et recherche de quelques *thèses de doctorat* Spécialité : Biologie Cellulaire et Moléculaire Végétal. Ecole doctorale d'Angers.15-17.

**Fakorede M A B., Opeke B O., 1985.** Wheather factors affecting the response of maize to planting dates in a tropical rainforest location. *Expl. Agric.* 21 : 31-40.

**Fanmoe J., Kamgang J O., Moussa D., Brisset J L., 2003.** Application de l'arc glissant d'air humide au traitement des solvants industriels : cas du 1,1,1-trichloroethane, *Phys. Chem. News* (14), 1- 4.

- Fanny B., 2008.** Effet larvicide des huiles essentielles sur *Stomoxys calcitrans* à la Réunion. *Thèse de doctorat*. Université Paul-Sabatier de Toulouse. France. 78.
- FAO, 1980.** Improvement and production of maize, sorghum and millet. Breeding, Agronomy and Seed Production. *FAO Rome volume 2*. 487.
- FAO, 1983.** Guide pratique pour la technologie de semence de maïs. *FAO Rome 60*.
- FAO, 1987.** Guide sur les engrais et la nutrition des plantes. *Bulletin FAO*, Engrais et nutrition végétale. 190.
- FAO, 1993.** Le maïs dans la nutrition humaine. 174. <http://www.wikipédia.org/maïs.htm>.
- FAO, 2006.** La Sequestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des sols.
- Farid A T., 2006.** Plant products as potential stored-product insect management agents. *Emirates Journal of Agricultural Sciences*, 18(1): 17-32.
- Faubert F., 2016.** Treatment by gliding arc of epoxyresin : Preliminary analysis of surface modifications, *Proc. SPIE*, 10010, Art. 100103G.
- Filatova I I., Azharonok V V., Kadyrov M., Beljavsky V., Sera B., Hruskova I., Spatenka P., Sery M., 2010.** RF and microwave plasma applications for pre-sowing caryopsis treatments. *Publ. Astron. Obs. Belgrade* 89, 289–292.
- Filatova I., Azharonok V., Kadyrov M., Beljavsky V., Gvozdov A., Shik A., Antonuk A., 2011.** The effect of plasma treatment of seeds of some grain and legumes on their sowing quality and productivity. *Rom. J. Phys.* 56, 139 –143.
- Filatova I., Lyushkevich V., Goncharik S., Zhukovsky A., Krupenko N., and Kalatskaja J., 2020.** The effect of low-pressure plasma treatment of seeds on the plant resistance to pathogens and crop yields, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 53, (24), 244001.
- Fouodjouo M., Laminsi S., Kamgang G Y., Mengue M T, Debacher N A., (2015).** Nonthermal plasma induced total mineralization of glyphosate in water. *J. Bra. Chem. Soc.* 26 (3), 411-419.
- Foy C D., 1992.** Soil chemical factors limiting plant root growth. *Advanced Soil Science* 19: 87-149.

**Fridman A A., Petrousov A., Chapelle J., Cormier J M., Czernichowski A., Lesueur H., Stevefelt J., 1994.** Modèle physique de l'arc glissant. *J. Phys.* III, 4, 1449-1465.

**Gay J P., 1999.** Maïs, mythe et réalité. *Atlantica* 21.

**Gibbon D., Pain A., 1985.** Crops of the drier regions of tropics. *International Tropical Agriculture Series*. Longman London and New York 157.

**Gnokam F S., 2008.** Dégradation de l'hémoglobine et des effluents d'abattoirs par décharge électrique glissante dans l'air humide à pression atmosphérique, *Thèse de Doctorat*, Université de Rouen.

**Granados G., Pandey S., Celallos H., 1998.** Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. *Crop Science* 33 : 936-940.

**Gros A., 1976.** Engrais. *Guide pratique de la fertilisation*. <http://www.wikipédia.org/maïs.htm>.

**Guèye M T., Seck D., Wathelet J-P., Lognay G., 2011.** Lutte contre les ravageurs des stocks de céréales et de légumineuses au Sénégal et en Afrique occidentale : synthèse bibliographique. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 15(1): 183-194.

**Guèye M T., Seck D., Wathelet J-P., Lognay G., 2012.** Typologie des systèmes de stockage et de conservation du maïs dans l'est et le sud du Sénégal. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 16(1): 49-58.

**Haghighat G., Sohrabi A., Shaibani P M., Van Neste C W., Naicker S., 2017.** The role of chloride ions in plasma-activated water treatment processes, *Environ. Sc: Water Res. and Technol.*, (3), 156–168.

**Hamdani D., 2012.** Action des poudres et des huiles essentielles de quelques plantes aromatiques sur les paramètres biologiques de la bruche du Haricot, *Acanthoscelides obtectus* Say. (Coleoptera : Bruchidae). Mémoire de Magister en biologie. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie. 126.

**Hashizume H., Ohta T., Takeda K., Ishikawa K., Hori M., & Ito M., 2013.** Oxidation mechanism of *Penicillium digitatum* spores through neutral oxygen radicals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(1), 010209.

**Hayashi N., Ono R., Shiratani M., Yonesu A., 2015.** Antioxidative activity and growth regulation of Brassicaceae induced by oxygen radical irradiation. *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 06GD01.

**Hensel K., Kučerová B., Janda M., Machala Z., Sano K., Mihai C T., Ciorpac M., Jijie R., Pohoata V., Topala I., 2015.** Biointerphases, 10, 029515.

**Henselová M., Slovákova L., Martinka M., and Zahoranová A., 2012.** Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma, *Biologia*, 67, (3), 490–497.

**Hernandez O L R., 2005.** Substitution de solvants et matières actives de synthèse par un combine « solvant/actif » d'origine végétale. *Thèse de Doctorat*. L'Institut National Polytechnique de Toulouse. France. 225.

**Hickling A., 1971.** Electrochemical processes in glow discharge at the gas–solution interface, in: O’Bockris. J.M., Conway. B.E., (Eds.), *Modern Aspects of Electrochemistry*, *Plenum Press*, New York, 329–373.

**Hill D S., 1975.** Agricultural Insect pest of tropical and their control. *Cambridge, University Press* 519.

**Hnatiuc E., 2002.** Procédés électriques de mesure et de traitement des polluants, édition TEC et DOC, Paris (France), 159-291.

**Hoang LV., 2009.** Comparaison des rendements énergétiques de dégradation de trois composés organiques par plusieurs procédés d’oxydations avancées en milieu aqueux, *Thèse de Doctorat*, Université de Poitiers., 57.

**Ileke K D., & Oni M O., 2011.** Toxicity of some plant powders to maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae) on stored wheat grains (*Triticum aestivum*). *African Journal of Agricultural Research*, 6(13): 3043-3048.

**Ileke K D., 2012 b.** Evaluation of contact toxicity and fumigant effect of some medicinal plant and pirimiphos methyl powders against cowpea bruchid, *Callosobruchus*.

**Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD), 2012.** Cinquantenaire de la Recherche Agricole Camerounaise. Email : [irad@iradcameroon.org](mailto:irad@iradcameroon.org). Site web : <http://www.iradcameroon.org>.

**Institut National de la Statistique, 2002.** Deuxième Enquête Camerounaise auprès des ménages -Présentation des bases de données. Institut National de la Statistique : Yaounde (Cameroun). Available from: <http://www.statistics-cameroon.org/ins/publications.htm>

**International Seed Testing Association (ISTA), 2018.** International Rules for Seed Testing. *Zurichstr.* 50, 8303. Basserdorf, Suisse.

**IRAD, 1998.** Annual report Institute of Agricultural Research for Development. 150.

**IRAD, 2009.** Progrès de la recherche sur les variétés à faible niveau d'azote. Rapport de projet de recherche à financement conjoint. 20.

**Iranbakhsh A., Ghoranneviss M., Oraghi Ardebili Z., Oraghi Ardebili N., Hesami Tackallou S., & Nikmaram H., 2017.** Non-thermal plasma modified growth and physiology in *Triticum aestivum* via generated signaling molecules and UV radiation. *Biologia plantarum*, 61(4), 702-708.

**Ji S H., Choi K H., Pengkit A., Im J S., Kim J S., 2016.** Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. *Archives of biochemistry and biophysics* 605: 117-128.

**Jiangang L., Ling L., Jianfeng J., Minchong S., Xin H, Haliang S., Yuanghua D., 2014.** Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean, *Sci Rep*, 4.

**Joshi A A., Locke B R., Arce P., Finney W C., 1995.** Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution. *J. Hazard. Mat.* 41, 3-30.

**Kamgang J O., Briandet R., Herry J M., Brisset J L., and Naïtali M., 2007.** Destruction of planktonic, adherent and biofilm cells of staphylococcus epidermidis using a gliding discharge in humid air, *J. Appl. Microbiol.*,103, (3), 621–628.

**Kamgang J O., Naitali M., Herry J-M., Bellon-Fontaine M-N., Brisset J-L., and Briandet R., 2009.** Increase in the hydrophilicity and Lewis acid-base properties of solid surfaces achieved by electric gliding discharge in humid air: Effects on bacterial adherence, *Plasma Sci. Technol.*, 11, (2), 187–193.

**Kamgang Y G., 2008.** Propriétés réactives en post décharge temporelle des décharges électriques glissantes dans l'air humide: Application à la dégradation de colorant azoïque et à la décontamination microbienne. *Thèse de doctorat.* Université de Rouen

**Kamgang-Youbi G., Herry J-M., Bellon-Fontaine M-N., Brisset J-L., Doubla A., and Naiitali M., 2007.** Evidence of temporal postdischarge decontamination of bacteria by gliding electric discharges: Application to *Hafnia alvei*, *Appl. Environ. Microbiol.*, 73, (15), 4791–4796.

**Kamgang-Youbi. G., Herry. J. M., Meylheuc. T., Brisset.J. L., Bellon-Fontaine. M. N., Doubla. A., 2009.** Microbial inactivation using plasma-activated water obtained by glidingelectricdischarges. *Letters. InAppl. Microb.*, (48), 13–18.

**Kang M H., Veerana M., Eom S., Uhm H S., Ryu S., & Park G., 2020.** Plasma mediated disinfection of rice seeds in water and air. *Journal of Physics D: Applied Physics*,53(21), 214001.

**Kannaiyan S., 2003.** Inoculant production in developing countries—problems, potentials and. Maximising the use of biological nitrogen fixation in agriculture, 99, 187.

**Katsumura.Y., 1998.** NO<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub> radicals in radiolysis of nitric acid solutions. In: *Alfassi Z (ed) N centered radicals, Chap 12.* Wiley, Chichester, 393–412.

**Khadija A., 2011.** Traitement par plasma non thermique d'alcools et produits issus de la pyrolyse ou de la gazéification de la biomasse, *Thèse de doctorat*, Université d'Orléans (France). Utilisation des plasmas non thermiques pour l'optimisation de la productivité en agriculture Mémoire de Master rédigé et présenté par MASSOB MU TSASSE Alida Naomie, 2015 41.

**Khelifa M K., Abdelmalek F., Khelifa A., Belhadj M., Brisset J-L 2006.** Reduction of nitrite by sulfamic acid and sodium azide from aqueous solutions treated by gliding arc discharge, *Sep Purif technol* 50, 373-379.

**Kling G., Edmaester., 1997.** Maize developpement and physiology, *research guide 34. IITA.* Ibadan, Nigeria, 38.

**Kornyshev A A., Kuznetsov A M., Spohr E., Ulstrup J., 2003.** Kinetics of proton transport in water. *J. Phys. Chem; B* 107 (15), 3351–3366.

**Kučerová K., Henselová M., Slováková L., Bačovčinová M., & Hensel, K., 2021.** Effect of plasma activated water, hydrogen peroxide, and nitrates on lettuce growth and its physiological parameters. *Applied Sciences*,11(5), 1985.

**Kučerová K., Henselová M., Slovákova L., Hensel K., 2018.** Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity, *Plasma Process. Polym.*, e1800131, <https://doi.org/10.1002/ppap.201800131>.

**Kudachi D C., & Balikai R A., 2009.** Efficacy of botanicals for the management of lesser grain borer, *Rhizoperthadominica* Fab. In sorghum during storage. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 22 (3): 487-490.

**Kuhnen S., 2010.** ATR-FTIR spectroscopy and chemometric analysis applied to discrimination of landrace maize flours produced in southern Brazil, *Int. J. Food Sci. Technol.*, 45, (8), 1673–1681.

**Lagoke S T O., Parkinson V., Agunbiade R M., 1991.** Parasitic weeds and control methods in Africa. In: Proceedings of the international workshop on combating striga in Africa. *Striga S. K Kim (eds) IITA*, Ibadan, Nigeria. 3-14.

**Lagoke S T O., Shebayan J Y., Carsky R T., Kim S K., Afolabi T., Jily K., 1995.** On farm evaluation of intergrated striga control packages in maize in the Nigerian savanna. In: Badu Apraku B., Akoroda M. O. Ouedraogo M. and F.M Quin (eds). *Proceedings of a regional maize workshop 29 May-2 June 1995, IITA*, Cotonou, Benin republic 291-311.

**Lal, R., 1994.** Soil erosion research methods. *CRC Press*.

**Lansigan F P., De Los Santos W L., Coladilla J O., 2000.** Agronomic impacts of climate variability on rice production in the Philippines. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82: 129-137.

**Lappi S., Berrardinelli A., Ragni R., Dalla R M., Guarnieri A., Rocculia P., 2014.** Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples, *Elsevier.*, 21, 114-122.

**Laurita R., Barbieri D., Gherardi M., Colombo V., & Lukes P., 2015.** Chemical analysis of reactive species and antimicrobial activity of water treated by nano second pulsed DBD air plasma. *Clinical Plas. Med.*, 3(2), 53–61.

**Legrini O., Oliveros E., Braun AM., 1993.** Photochemical Processes for Water Treatment. *Chem. Rev.*, 93, 671-698.

**Lesueur H., Czernichowski A., Chapelle J., 1988.** Dispositif de génération de plasma basse température par formation de décharges électriques glissantes, *Brevet français n° 2639172*, 17/11/1988.

**Lesueur H., Czernichowski A., Chapelle J., 1994.** Electrically assisted partial oxidation of methane. *Int. J. Hydrogen Energy*, 19(2), 139-144.

**Lindsay A., Byrns B., King W., Andhvarapou A., Fields J., Knappe D., Fonteno W., Shannon S., 2014.** Fertilization of Radishes, Tomatoes, and Marigolds Using a Large Volume Atmospheric Glow Discharge, *Springer Science+Business Media New York*.

**Ling Jiafeng J., Jiangang L., Minchong S., Xin H., Hanliang S., and Yuanhua D., 2014.** Effects of cold plasma treatment on seed germination and seed ling growth of soybean, *Sci. Rep.*, 4, (5859).

**Liu D X., Liu Z C., Chen C., Yang A J., Li D., Rong M Z., & Kong M G., 2016.** Aqueous reactive species induced by a surface air discharge: Heterogeneous mass transfer and liquid chemistry pathways. *Scientific reports.*, 6, (1), 1-11.

**Locke B R., Lukes P., & Brisset J L., 2012.** Elementary chemical and physical phenomena in electrical discharge plasma in gas–liquid environments and in liquids. In V. I. Parvulescu, M. Magureanu, & P. Lukes (Eds.). *Plasma chem. And catalin gases and liq.*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

**Los A., Ziuzina D., Van Cleynenbreugel R., Boehm D., & Bourke P., 2020.** Assessing the biological safety of atmospheric cold plasma treated wheat using cell and insect models. *Foods*, 9(7), 898.

**Lu P., Boehm D., Bourke P., Cullen P J., 2017.** *Plasma Processes Polym*, 14, 1600207.

**Lukes P., Dolezalova E., Sisrova I., & Clupek L., 2014.** Aqueous-phase chemistry and bacteridaleffects from an air discharge plasma in contact with water: Evidence for the formation of peroxynitritethrought a pseudo-second-order post-discharge reaction of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HNO<sub>2</sub>. *Plasma sources sci. and technol.*, (23), 015019.

**Lukes P., Locke B R., & Brisset J., 2012.** Aqueous-phase chemistry of electrical discharge plasma in water and in gas-liquid environments. In Parvulescu V. I., Magureanu M., & Lukes P.,

(Eds.). *Plasma chem.and catalysis in gases and liq.*, Weintheim, Germany: Wiley-VCH VerlagGmbH& Co. KGaA.

**Ma R., Wang G., Tian Y., Wang K., Zhang J., & Fang J., 2015.** Non-thermal plasma activated water inactivation of food-borne pathogen on freshproduce. *J. of Hazad. Mat.*, (300), 643–651.

**Mac Gree D C., 1990.** Maize Dieases. *American Phytopathological Society* 150.

**Machala Z., Tarabova B., Hensel K., Spetlikova E., Sikurova L., Lukes P., 2013.** Plasma Processes *Polym*, 10, 649.

**Marchand J L., Peterschmitt M., Reynaud., 1994.** Les viroses de la striure, du strippe et de la mosaïque en région Tropicale. *Agriculture et Développement*N° 4, 15.

**Marschner H., 1991.** Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and soil*,134(1), 1-20.

**Massines F., Ségur P., Gherardi N., Khamphan C., Ricard A., 2003.** Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: diagnostic and modelling surface and coatings Technology, 174-175, 8-14. Utilisation des plasmas non thermiques pour l'optimisation de la productivité en agriculture Mémoire de Master rédigé et présenté par MASSOB MU TSASSE Alida Naomie, 2015 42.

**Matra K., 2016.** Non-thermal plasma for germination enhancement of radish seeds, *Procedia Comput. Sci.*, 86, 132–135.

**Matsuoka., and Yoshihiro., 2002.** A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99. 6080-6084.

**Mazandarani A., Goudarzi S., Ghafoorifard H., and Eskandari A., 2020.** Evaluation of DBD plasma effects on barley seed germination and seedling growth, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 48, (9),3115–3121.

**M'barek B., mounir N-mohsen S., 1996.** Effet d'un déficit hydrique, survenant à différents stades de développement du blé sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et sur les composantes du rendement.8.

**Mboob S S., 1986.** A regional programme for West and Central Africa. In anonymous Improved crop management in Africa. Poceedings of the *FAO/OAU* all African Government Consultation on Striga Control, Maroua, Cameroon.191-194.

**Mémento de l’Agronome, 2002.** Agriculture Générale. France ministère des affaires étrangères, *Edition Quae*. 407-773.

**Menkir A., Kling J G., 1999.** Effect of Reciprocal recurrent selection on grain and others traits no two early-maturing maize composites. *Maydica* 44: 159-165.

**Menz M A., Hallaeur A R., 2012.** Reciprocal recurrent selection of two tropical corn composites adapted to Iowa. *Maydica*: 42: 239-246.

**Mir S A., Shah M A., & Mir M M., 2016.** Understanding the Role of Plasma Technology in Food Industry. *Food Bioprocess Technol*9, 734–750. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1699-9>.

**Misra Oliver Schluter NN., & Cullen PJ., 2016.** Cold Plasma in Food and Agriculture Fundamentals and Applications *Elsevier*.

**Molina R., 2021.** Physicochemical surface analysis and germination at different irrigation conditions of DBD plasma-treated wheat seeds, *Plasma Processes Polym.*, 18, (1), 2000086.

**Møller I M., Jensen P E., & Hansson A., 2007.** Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 58, 459-481.

**Moreau M., 2008.** Non-thermal plasma technologies: New tools for bio-decontamination <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.08.001>.

**Moreau M., 2007.** Gliding arc discharge in the potato pathogen *Erwinia carotovora* subsp. *Atroseptica*: Mechanism of lethal action and effect on membrane-associated molecules, *Appl. Environ. Microbiol.*, 73, (18),5904–5910.

**Moughli L., 2000.** Transfert de Technologie en Agriculture, *Bulletin mensuel d’information et de liaison de PNTTA*, N0 72.

**Moussa D., 1999.** Destruction du tributylphosphate par effluage électrique. Utilisation d’un réacteur à décharge glissante, *Thèse de Doctorat*, Université de Rouen.

**Moussa D., Doubla A., Kamgang-Youmbi G., and Brisset J-L., 2007.** Post-discharge Long Life Reactive Intermediates Involved in the Plasma Chemical Degradation of an Azoic Dye. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 35, (2): 444-453.

**Mutambuki K., 2013.** The influence of grain moisture content on the efficacy of silica dust on *Prostephanus truncatus* (Horn.) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 4(2): 23-29.

**N’Goran A., & N’Guessan Kanga A., 2000.** Influence d'un précédent de légumineuse herbacée et d'une jachère courte de deux ans sur la productivité du maïs au Nord de la Côte d'Ivoire. La jachère en Afrique Tropicale. John Libbey, *Eurotext*, Paris, France, 616-62.

**Naab J B., 2003.** The role of legume-maize rotation in sustainable intensified maize-based farming systems in West and central Africa In : Maize Revolution in West and Central Africa (Eds) bardu-Apraku B. Fakorede M.A.B. Ouedrago M.Carky J. and. Menkir A. *Proceedings of a Regional Workshop IITA* cotonou Republic 14-18 May 2001.

**Naitali M., Kamgang-Youbi G., Herry J M., Bellon-Fontaine M N., & Brisset J L., 2010.** Combined effects of long-living chemical species during microbial inactivation using atmospheric plasma-treated water. *Appl. And Environm. Microb.*, (76), 7662–7664.

**Naumova I K., Maksimov A I., & Khlyustova A V., 2011.** Stimulation of the germinability of seeds and germ growth under treatment with plasma-activated water, *Sur. Eng. and Appl. Electrochem.*, (47), 263–265.

**NCRE, 1992.** Annual research Report. National cereals Research and Extension Projets Cameroon. *IRAD/USAID/IITA*. 259.

**Ndiffo Yemeli GB., Švubová R., Kostolani D., Kyzek S., Machala Z., 2020.** The effect of water activated by nonthermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley. *Plasma Process. Polym.*, e2000205. <https://doi.org/10.1002/ppap.202000205>.

**Ngamo T L S., Goudoum A., Ngassoum M B., Noudjou W F., Malaisse F Haubruge E., Lognay G., Kouninki H., & Hance T., 2007a.** Use of essential oils of aromatic plants as protectant of grains during storage. *Agricultural Journal*, 2(2): 204-209.

**Ngoko Z., 1994.** Les maladies du maïs dans les hauts plateaux du Cameroun. *Bulletin Technique. IRA/MNREST*. 22.

**Ngonkeu M. E. L., 2003.** Biodiversité et potentiel des champignons mycorhiziens à arbuscules de quelques zones agro écologiques du cameroun. *Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle*, Université de Yaoundé I Cameroun. 180.

**Nguemtchouin Mbouga M G., 2012.** Formulation d'insecticides en poudre par adsorption des huiles essentielles de *Xylopiya aethiopica* et de *Ocimum gratissimum* sur des argiles camerounaises modifiées. *Thèse de Doctorat/Ph.D.* Université de Ngaoundéré. Cameroun. 293.

**Niaz and S Dawar I., 2009.** Detection of seed borne mycoflora in maize (*Zea Mays L.*), Pakistan J. Botany., 41, (1) : 443–451.

**Nukenine E N. 2010.** Stored product protection in Africa. Past, present and future. *10<sup>th</sup> International Working Conference on Stored Product Protection*. Cameroon. 881-887.

**Nukenine E N., Adler C & Reichmuth C., 2007.** Efficacy evaluation of plant powders from Cameroon as post-harvest grain protectants against the infestation of *Sitophiluszeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Plant Diseases and Protection*, 114 (1): 30-36.

**Nukenine E N., Tofel H K., Adler C., 2011.** Comparative efficacy of NeemAzal and local botanicals derived from *Azadirachta indica* and *Plectranthus glandulosus* against *Sitophiluszeamais* on maize. *Journal of Pest Science*, 8.

**Nwaga D., Hamon S., Djieto L C., Engelmann F., 2007.** Biotechnologie et maîtrise des intrants agricoles en Afrique Centrale. *Réseau BIOVEG.AUF/IRD/Université de Yaoundé I/IRAD* ; Yaoundé Cameroun <http://www.Bioveg.auf.org>.

**Nwaga D., Ngonkeu M E L., Oyong M M., Ngakou A., Abelong M P., Foko J., 2000.** Soil beneficial microorganisms and sustainable agricultural production in Cameroon. In: Current Research and Perspectives UNESCO- TSBF (ed) *The biology and fertility of tropical soils TSBF Report Nairobi 1998*.62-65.

**Nzali S., 2010.** Application des plasmas non thermiques à la dépollution des eaux résiduaires : cas de quelques rejets de la zone industrielle de Yaoundé (Cameroun), *Thèse de Doctorat/ PhD*, Université Yaoundé I, Cameroun.

**Oehmigen K., Hähnel M., Brandenburg R., Wilke C., Weltmann K. D., and Von Woedtke T., 2010.** The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids, *Plasma Process. Polym.*, (7), 250–257.

**Oerke E C., Dehne H W., Scônbeck F., Weber A., 1994.** Crop Production and Crop Protection. Estimated losses in major food and cash crops. *Elsevier* 808.

**Ogborn J., 1984.** Research Priorities in Agronomy. In : Ayensu E.S. Doggett H. Keynus H.D. Marton Lefevre J. musselman L. J. Parker C. and Pickering A (*eds*). *I.C.S.U.* Paris 50.

**Park D P., Davis K., Gilani S., Alonzo C A., Dobrynin D., Friedman G., 2013.** Reactivenitrogenspeciesproduced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritionalyield. *Current Applied Physics*, 13, S19–S29.

**Park D P., Davis K., Gilani S., Alonzo C A., Dobrynin D., Friedman G., 2013.** Reactivenitrogenspeciesproduced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield, *Curr. Appl. Phy.*, (13), S19–S29.

**Parker C., Riches C R., 1993.** Parasitic weeds of the world: biology and control. CAB *International Castlefield Press*, Keltening, Northantz UK.

**Pârvulescu V I., Magureanu M., & Lukes P., 2012.** Plasma chemistry and catalysis in gases and liquids, *John Wiley& Sons*.

**Pauwels J., Van Ranst E., Verloo ., Mvondo Ze A., 1992.** Manuel de laboratoire de pédologie. Publication Agricole N° 28. *Agence générale de la coopération au développement de Bruxelles*.

**Pawlat J., Starek A., Sujak A., Kwiatkowski M., Terebun P., and Budzen M., 2018.** Effects of atmospheric pressure plasma generated in GlidArc reactor on *Lavatera thuringiaca* L. Seeds' germination, *Plasma Processes Polym.*, 15, (2), 1700064.

**Payak M M., Renfo B L., 1968.** Combating maize diseases. *Indian Famers digest* 1: 53-57.

**Prados M., Paillard H., Roche P., 1995.** Hydroxyl radical oxidation processes for the removal triazine from natural water. *Ozone-Sci. Eng*, 17,183-194.

**Pryor W., Squadrito G., 1995.** The chemistry of peroxyxynitrite: a product from the reaction of nitric oxide with superoxide. *Am J Physiol*, 268, 699–722.

**Puač N., Gherardi M., & Shiratani M., 2017.** Plasma agriculture: A rapidlyemergingfield, *Plasma Proc.*

**Rahman M., Sajib S A., Rahi M., Tahura S., Roy N C., Parvez S., & Kabir A H., 2018.** Mechanisms and signaling associated with LPDBD plasma mediated growth improvement in wheat. *Scientific reports*, 8(1): 1-11.

**Ramazzina I., Berardinelli A., Rizzi F., Tappi S., Ragni L., Sacchetti G., Rocculi P., 2015.** Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwifruit. *Postharvest Biol. Technol.* 107, 55–65.

**Randeniya L K., and de Groot G J J B., 2015.** Non-Thermal Plasma Treatment of Agricultural Seeds for Stimulation of Germination, Removal of Surface Contamination and Other Benefits: A Review. *Plasma Process. Polym.*, 12: 608-623. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500042>.

**Raynal-Roques A., 1991.** Diversification of the Genus striga. In: J. K. Ranson L. J Musselman A. D. Worshann and C. Parker (eds). *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Parasitic Weeds*. CIMNYT, Nairobi, Kenya, 251-261.

**Razafimahatratra., 2017.** Support de Cours Culture Vivrière : Le maïs,11.

**Rebourg C., Chastanet M., Gouesnard B., 2003.** Maize introduction into Europe: the history reviewed in the light of molecular data. *TheorAppl Genet*106, 895–903. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-1140-9>

**Regnault-Roger C. & Hamraoui A., 1993.** Efficiency of plants from the south of France used as traditional protectants of *Phaseolus vulgaris* L. against its bruchid *Acanthoscelides obtectus* (Say). *Journal of Stored Product Research*, 29: 259-264.

**Riches C. R., De Milliano W. A., Obilana A. T., Housse L. R., 1986.** Witchweed (*Strigas* sp) of sorghum and millets for Southern Africa. In *Proceedings of the SADCC/ICRSAT Regional work shop on sorghum and millets for Southern Africa, Lusaka, Zambia*. 48-70.

**Riou c., 1993.** L'eau et la production végétale. *Sècheresse*.83.

**Rouanet G., 1984.** Le maïs Collection le technicien d'Agriculture Tropicale. Edition Maison Neuve et Larousse. *Agence de Coopération Culturelles et Technique Française* 142.

**Rouanet G., 2000.** Le maïs. *Maison neuve et la rose*. Paris. 42. <http://www.wikipédia.org/maïs.htm>.

**Sanchez P A., 1994.** Tropical soil fertility research: toward the second paradigm. In: Scannerini L. and Bonfante P. 1991 Bacteria and bacteria like objects in endomycorrhizal fungi (Glomaceae). Symbiosis as source of Evolutionary Innovation: *Speciation and Morphogenesis*. 273-287.

**Sarinont T., Katayama R., Wada Y., Koga K., & Shiratani M., 2017.** Plant growth enhancement of seeds immersed in plasma activated water. *Mrs Advances*, 2(18): 995-1000.

**Saueborn J., 1991.** The economic importance of the phytoparasites Orobanche and Striga. In: J. K. Ranson L. J Musselman A. D. Worsham and C. Parker (eds). Proceedings of the 5<sup>th</sup> *International Symposium on Parasitic weeds*. CIMNYT, Nairobi, Kenya, 137-143.

**Selcuk M., Oksuz L., & Basaran P., 2008.** Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. And *Penicillium* spp. by cold plasma treatment. *Bioresource Technol.* 99, 5104–5109.

**Šerá B., Gajdvá I., Šerý M., & Špatenka P., 2013.** New physicochemical treatment method of poppy seeds for agriculture and food industries. *Plasma Sci. Technol.* 15, 935–938.

**Sera B., Sery M., Gavril B., 2017.** Seed Germination and Early Growth Responses to Seed Pre-treatment by Non-thermal Plasma in Hemp Cultivars (*Cannabis sativa* L.). *Plasma Chem Plasma Process* 37, 207–221 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11090-016-9763-9>.

**Sera B., Sery M., Stranak V., Spatenka P., Tichy M., 2009.** Does cold plasma affect breaking dormancy and seed germination? A study on seeds of Lamb's Quarters (*Chenopodium album* agg.). *Plasma Sci. Technol.* 11 (6), 750–754. <http://dx.doi.org/10.1088/1009-0630/11/6/22>.

**Sera B., Spatenka P., Sery M., Vrchotova N., and Hruskova I., 2010.** Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 38, (10): 2963–2968.

**Sera B., Stranak V., Sery M., Tichy M., Spatenka P., 2008.** Germination of *Chenopodium album* in response to microwave plasma treatment. *Plasma Sci. Technol.* 10, 506–511.

**Shaaya E., Kostjukovski M., Eilberg J., Sukprakarn C., 1997.** Plant oils as fumigants and contact pesticides for the control of stored-product insects. *J Stored Prod Res.* 33:7–15.

**Shainsky N., Dobrynin D., Ercan U., Joshi S G., Ji H., Brooks A., 2012.** Retraction: Plasma acid: Water treated by dielectric barrier discharge, *Plasm. Proc. And Polym.*, (9).

**Shen J., Tian Y., Li Y., Ma R., Zhang Q., Zhang J., 2016.** Bactericidal effects against *S. aureus* and physicochemical properties of plasma activated water stored at different temperatures, *Sci. Reports*, (6).

**Shurlef F M C., 1992.** Compendium of Corn Diseases. Second Edition Minnesota. *The American Phytopathological Society (APS)*. 105.

**Sonchieu J., 2006.** Selling pesticides in Ngaoundere, Cameroon. *Crop Prot.* 48:180–181.

**Song H P., Kim B., Choe J H., Jung S., Moon S Y., Choe W., & Jo C., 2009.** Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiology*, 26(4): 432-436.

**Sop-Tamo B., Acayanka E., Boyom-Tatchemo W F., Nzali S., Kamgang-Youbi G., and Laminsi S., 2018.** Gliding arc plasma pre-treatment of kaolin in spatial post-discharge mode for removal of reactive red 2 dye from aqueous solution, *Water Sci. Technol.*, vol. 78, (7): 1448–1458.

**Station Polyvalente de Recherche Agricole de Dschang (SPRAD), 2020.** Station Météorologique de Dschang.

**Stewart G., 1990.** Witchweed: a parasitic weed of grain crops *Outlook Agriculture* 19: 115-119.

**Stolárik T., Henselová M., Martinka M., Novák O., Zahoranová A., & Černák M., 2015.** Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35(4): 659-676.

**Straněák V., Tichý M., Kráha V., Scholtz V., Šera B., Špatenka P., 2007.** Technological applications of surfatron produced discharge. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 9, 852–857.

**Sudhakar N., Nagendra-Prasad D., Mohan N., Hill B., Gunasekaran M., Murugesan K., 2011.** Assessing influence of ozone in tomato seed dormancy alleviation. *Am. J. Plant Sci.* 2, 443–448.

**Suslow T., 2004.** Oxidation-reduction potential (ORP) for water disinfection monitoring, UCANR Publications.

**Svečnjak Z., & Rengel Z., 2006.** Canola cultivars differ in nitrogen utilization efficiency at vegetative stage. *Field Crops Research*, 97(2-3), 221-226.

**Tadom D., Kamgang-Youbi G., Acayanka E., Njoyim-Tamungang E., and Laminsi S., 2018.** Reduction of sludge formed during a coagulation treatment of Ridomil gold by means of non-thermal quenched plasma pre-treatment, *Environ. Monitor. Assessment*, 190, (7), 443.

**Tagne A., The C., Amvam Zollo P H., Mathur S B., Neergaard E., 1999.** Sources of Resistances to Blight Disease of Maize in Cameroon. *Proceedings of Annual Conférence of the Cameroon Biosciences Society*.

**Takam B., 2010.** Application du plasma d'arc électrique rampant à la décoloration et la dégradation des colorants textiles : cas du Bleu de Méthylène. Mémoire de Master. Université de Yaoundé I.

**Tamo B S., 2016.** Plasma chemical functionalisation of a cameroonian kaolinite clay for a greater hydrophilicity, *PlasmaChem. Plasma Process.*, 36, (6): 1449–1469.

**Tappi S., Berardinelli A., Ragni L., Dalla Rosa M., Guarnieri A., Rocculi P., 2014.** Atmospheric gas plasma treatment of fresh-cut apples. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* 21, 114–122.

**Tarfa B D., Uyovbisere E O., Chude V O., Yaro D T., 2003.** Effect of complementary use of NPK and the foliages of Azadirachta and Parkia on yield and nutrients uptake of maize in a savanna soil. In: Maize Revolution in West and Central Africa (Eds) bardu-Apraku B. Fakorede M.A.B. Ouedrago M. Carky J. and. Menkir A. *Proceedings of a Regional Workshop IITA Cotonou Benin Republic 14-18 May 2001.* IITA/WECAMAN.224-230.

**Tenailon M I., Hollister J D., and Gaut B S., 2010.** A triptych of the evolution of plant transposable elements. *Trends in Plant Science*, 15(8), 471-478.

**Thapanut S., Ryu K., Yosuke W., Kazunori K., and Masaharu S., 2017.** Plant growth enhancement of seeds immersed in plasma activated water, *Mat. Res. Soc*, DOI:10.1557/adv.2017.178.

**The C., Calba H., Horst W J., Zonkeng C., 2001.** Three-year performance of a tolerant and susceptible maize cultivars on non amended and amended acid soil. In Plant Nutrition Developments in plant soil sciences, 92, *Kluwer Academic Publishers Dordrecht*. 980-985.

**The C., Calba H., Zonkeng C., Ngonkeu E L., Adetimirin V O., Mafouason H A., Meka S S., Horst W J., 2006 b.** Responses of maize grain yield changes in acid soils characteristics after soil amendment. *Plant and soil* 284: 45-47.

**Thirumdas R., Sarangapani C., & Annapure U S., 2015.** Cold plasma: a novel non-thermal technology for food processing. *Food Biophysics*, 1, 1-11.

**Thottappilly G., Bosque Pèrez N A., Rossel H W., 1993.** Viruses and virus diseases of maize in tropical Africa. *Plant Pathology* 42: 494-509.

**Tong J., He R., Zhang X., Zhan R., Chen W., Yang S., 2014.** Effects of atmospheric pressure air plasma pretreatment on the seed germination and early growth of *Andrographis paniculata*. *Plasma Sci. Technol.* 16, 260–266.

**Traoré D., Vincent., Stewart R K., 1995.** Association and Synchrony of *Smicronyx guineans* Voss, sm. *Umbrinus Hustache* (Coleopteran: Cucurlionidea and the parasitic Weed *Striga hermontica* (del) benth. (Scrophulariaceae).

**Traoré O., 1995.** Les viroses du maïs au Cameroun. *Rapport de mission* 18.

**Traoré O., Konoté G., 1997.** Evaluation des maladies virales du maïs en Afrique Occidentale et Centrale. In Strategy for Sustainable Maize Production in West and Central Africa : Badu Apraku B. Okoroda M. O. Ouedrago M. Quin F.M. *Proceedings of a Regional Maize Workshop 21-25 April 1997, IITA Cotonou Benin.* 339-345.

**Tsagou-Sobze E., Moussa D., Doubla A., Hnatiuc E., Brisset J L., 2008.** Gliding discharge-induced oxidation of a toxic alkaloid, *J. of Hazardous Mat.*, vol. 152, p 446–449.

**Uarrota V G., Amante E R., Demiate I M., Vieira F., Delgadillo I., and Maraschin M., 2013.** Physicochemical, thermal, and pasting properties of flours and starches of eight Brazilian maize landraces (*Zea mays* L.), *Food Hydrocolloids.*, 30, (2): 614–624.

**Upadhyay R K., & Ahmad S., 2011.** Management strategies for control of stored grain insect pests in farmer stores and public warehouses. *World Journal of Agricultural Sciences*, 7 (5): 527-549.

**Van Heerwaarden J., 2010.** Fine scale genetic structure in the wild ancestor of maize (*Zeamays* ssp. *parviglumis*). *Molecular Ecology* 19,1162-1173.

- Vayias B J., Athanassiou C G., Buchelos C T., 2009.** Effectiveness of spinosad combined with diatomaceous earth against different European strains of *Tribolium confusum* du Val (Coleoptera: Tenebrionidae): influence of commodity and temperature. *Journal of Stored Products Research*, 45: 165-176.
- Velichko I., 2019.** Plasma jet and dielectric barrier discharge treatment of wheat seeds, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 39, (4): 913–928.
- Violleau F., Hadjeba K., Albet J., Cazalis R., Surel O., 2008.** Effect of oxidative treatment on corn seed germination kinetics. *Ozone Sci. Eng.* 30, 418–422
- Volin J C., Denes F S., Young R A., and Park S M T., 2000.** Modification of seed germination performance through cold plasma chemistry technology, *Crop Sci.*, 40, (6): 1706–1718.
- Walkley A J., and I A Black., 1934.** Estimation du carbone organique du sol par la méthode de titrage de l'acide chromique. *Soil Sci* 37, 29-38.
- Wang R X., Nian W F., Wu H Y., Feng H Q., Zhang K., Zhang J., Zhu W D., Becker K H., Fang J., 2012.** Atmospheric-pressure cold plasma treatment of contaminated fresh fruit and vegetable slices: inactivation and physiochemical properties evaluation. *Eur. Phys. J. D* 66, 1–7.
- Waston S A., 1987.** Structure and composition, in *Corn: Chemistry and Technology*, S. A. Watson, P. E. Ramstad, Ed. St Paul, MN, USA: *American Association of Cereal Chemists*, 55–82.
- Westphal E., 1985.** Cultures vivrières tropicales, avec référence spéciale au Cameroun. *Pudoc* No.75.
- Westphal E., Embrechts J., Ferwenda J D., Mutsaers H J W., Westphal J M C., 1985.** Cultures vivrières tropicales avec références spéciales au Cameroun. *Pudoc*, Wageningen. 514.
- White D G., 2000.** Compendium of Corn Diseases. Third Edition. Minnesota. USA. *The American Phytopathological Society (APS)*. 79.
- Wright S I., 2005.** The effects of artificial selection on the maize genome. *Science* (New York, N.Y.) 308.1310-1314.

**Xiong J., Onal M., Jilka R L., Weinstein R S., Manolagas S C., & O'brien, C A 2011.** Matrix-embedded cells control osteoclast formation. *Nature medicine*, 17(10), 1235-1241.

**Yallappa R., Nandagopal B., & Thimmappa S., 2012.** Botanicals as grain protectants. Review, 13p.

**Yin M., Huang M., Ma B., Ma T., 2005.** Stimulating effects of seed treatment by magnetized plasma on tomato growth and yield. *Plasma Sci. Technol.* 7, 3143p.

**Zahoranová A., 2018.** Effect of cold atmospheric pressure plasma on maize seeds: Enhancement of seedlings growth and surface microorganisms inactivation, *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 38, no. 5, pp. 969–988.

**Zahra R-K., Moharramipour S., Hossein F., & Javad K-E., 2011.** Insecticidal effect of six native medicinal plants essential oil on indian meal moth, *Plodia interpunctella* hübner (Lep.: Pyralidae). *Munis Entomology and Zoology*, 6 (1): 339-345.

**Zhang Q., Ma R., Tian Y., Su B., Wang K., Yu S., 2016.** Sterilization efficiency of a novel electrochemical disinfectant against *Staphylococcus aureus*, *Environ. Sci. and Technol.*, (50), 3184–3192.

**Zhang S., Rousseau A., Dufour T., 2017.** *RSC Advances*, (7) 31244-31251.

**Zhou R., Zhang X., Zhuang J., Yang S., Bazaka K., Ostrikov K K., 2016.** *Scientific Reports*, (6) 32603.

**Zhou Z W., Huang Y F., Yang S Z., & Chen W., 2011.** Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds. *Agri. Sci.* 2, 23–27.

**Zhu J., Zhang Z., Yang Z., 2001.** General research methods on pathogen of potato late blight (*Phytophthora infestans*). *Journal of Agricultural Sciences* 24, 112-114.

# ANNEXES

## Annexe 1 : Appareils utilisés



**Humidimètre de marque GAC plus**



**Générateur de haute tension**



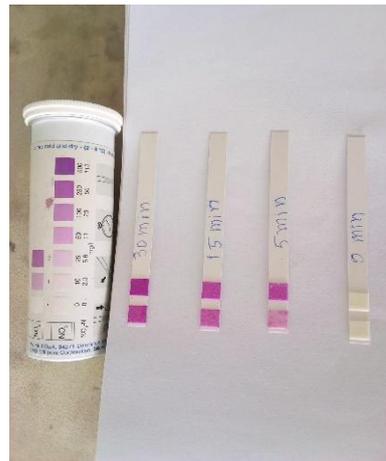
**Compresseur d'air**



**Vue Réacteur « glidarc »**



**Multimètre de marque HANNAH**



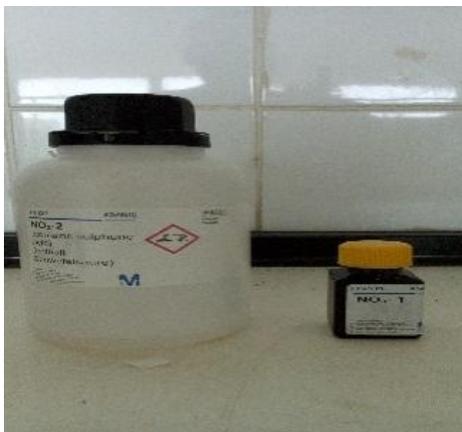
**Kit de nitrate**



**Spectrophotomètre**



**Kit de Nitrite**



**Kit de Nitrate**



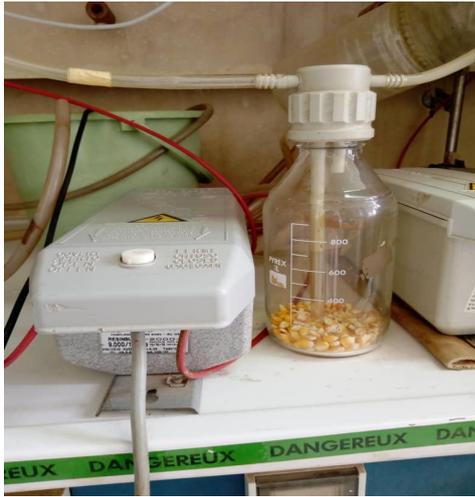
**Chlorophyll mètre**



**Pied à coulisse**



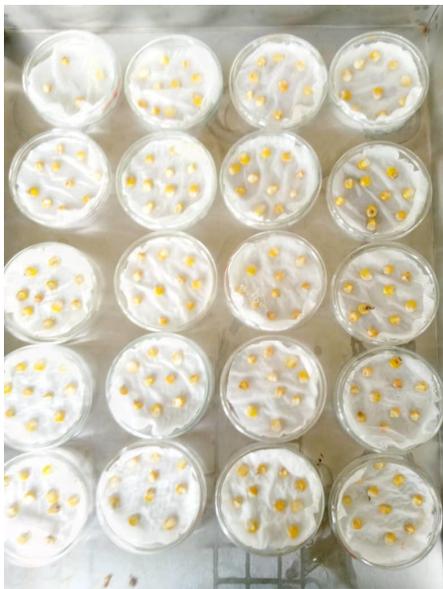
**Balance de marque SARTORIUS**



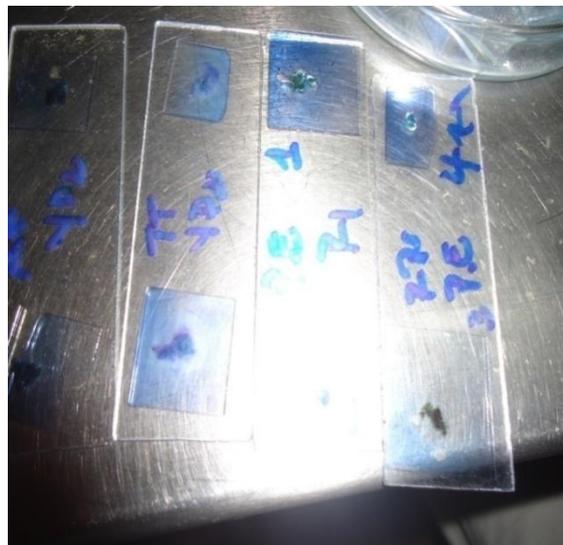
**Dispositif de traitement en  
Post Décharge spatiale**



**Plant de maïs en serre**



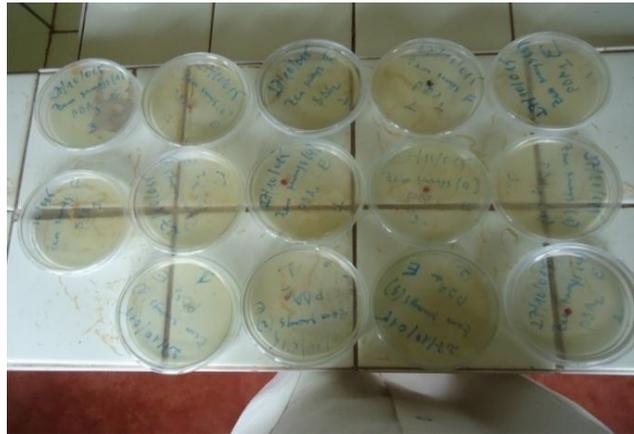
**Ensemencement des graines dans les  
boites de petri afin d'évaluer le taux  
d'infection**



**Montage entre lame et lamelle pour  
observation au microscope et identification  
microscopique des espèces *F. graminearum* et  
*F. moniliforme*.**



**Milieu de culture PDA**



**Inoculation des souches pures sur milieu de culture coulé dans des boîtes de pétri**



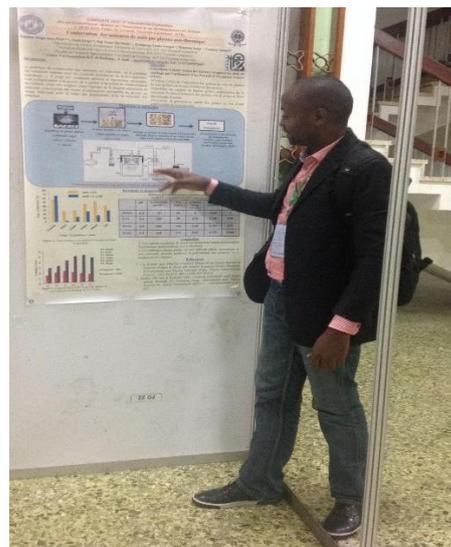
**Test de germination au laboratoire**



**Essai expérimental en Champs**



**Epis de maïs issu de la récolté**



**Présentation scientifique**

## Annexe 2: Données des résultats obtenus

**Tableau :** Évolution de la moyenne du taux de germination en fonction du temps de traitement

|      |       |       |
|------|-------|-------|
| 0 s  | 300 s | 900 s |
| 86,4 | 88,7  | 100   |

**Tableau :** Évolution de la moyenne de la longueur de la tige en fonction du temps de traitement.

|      |       |       |
|------|-------|-------|
| 0 s  | 300 s | 900 s |
| 11,3 | 11,6  | 12,8  |

**Tableau :** Évolution de la largeur moyenne des feuilles (cm) en fonctions du temps de traitement.

|      |       |       |
|------|-------|-------|
| 0 s  | 300 s | 900 s |
| 1,58 | 1,61  | 1,74  |

**Tableau :** Evolution moyenne du diamètre au collet (cm) en fonction du temps de traitement

|      |       |       |
|------|-------|-------|
| 0 s  | 300 s | 900 s |
| 0,37 | 0,37  | 0,38  |

**Tableau :** Evolution moyenne de la concentration de la chlorophylle (mg/g) en fonction du temps de traitement :

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 0 s   | 300 s | 900 s |
| 23,91 | 25,33 | 29,66 |

**Tableau :** Moyenne du taux infection (%) en fonction du temps de traitement

|                     |     |       |       |
|---------------------|-----|-------|-------|
| Temps de traitement | 0 s | 300 s | 900 s |
| Taux infection      | 58  | 6,7   | 13,3  |

**Tableau :** Moyenne du taux d'absorption d'eau (%) en fonction du temps de traitement

| Temps de traitement | 0 s   | 300 s | 900 s |
|---------------------|-------|-------|-------|
| 0h                  | 0     | 0     | 0     |
| 6h                  | 10,48 | 14,16 | 16,62 |
| 12h                 | 25,78 | 26,94 | 28,88 |
| 18h                 | 27,19 | 29,72 | 30,79 |
| 24h                 | 29,18 | 32,22 | 35,15 |
| 30h                 | 30,59 | 33,61 | 36,51 |
| 36h                 | 33,43 | 36,11 | 39,24 |
| 42h                 | 35,13 | 38,89 | 41,96 |

**Tableau :** Test de germination précoce (%) en fonction du temps de traitement

|            | 0 s        | 300 s      | 900 s      |
|------------|------------|------------|------------|
| Moyenne    | 6,05789474 | 7,755      | 7,41052632 |
| Écart type | 2,31260214 | 3,40285871 | 2,20652939 |

### **Annexe 3 : Conférences, Formations et Communications Scientifiques**

1. Conférence sur « Insécurité Alimentaire et Développement Durable en Afrique Subsaharienne » (IADDAS) du 24 au 26 juillet 2018, Université de Douala.
2. 1<sup>ère</sup> Conférence Internationale de l'Académie des Jeunes Scientifiques du Cameroun sur le thème « Jeunes Chercheurs : Moteur de l'innovation et du développement en Afrique. » (CONFCAYS) du 28 au 29 Août 2019, Palais des congrès Yaoundé.
3. First best oral presentation prize in Genetic Resources and Food Security during the seventh Life Science Conference (JSV2021) organised by the Cameroon Forum for Biological Sciences (CAFOBIOS) on August 12-13, 2021 at the university of Dschang.
4. Cours d'enseignement à distance sur l'introduction au système UPOV de protection des variétés végétales selon la convention UPOV (Union internationale pour la Protection des Obtentions Végétales) du 9 mars au 13 avril 2022.
5. Formation sur le thème « Solutions Efficientes de Gestion de l'Irrigation et de l'Eau Agricole Permettant une Economie d'Eau et une Réduction de Coûts en vue d'une Transformation Agricole en Afrique » Du 17 au 27 octobre 2022 à l'université Mohamed IV Polytechnique De Bengueir, Maroc.
6. Communication scientifique sur le thème « conservation des semences de maïs par des procédés physiques » lors des septièmes éditions des Journées d'Excellence de la Recherche Scientifique et de l'Innovation à l'Ouest (JERSIO) du 19 au 20 Janvier 2023, Bafoussam.
7. Bourse octroyée par le service de coopération et d'action culturelle (SCAC) de l'ambassade de France au Cameroun. Du 05 février – 04 juin 2024 à LPP, Sorbonne Université Univ. Paris 6, CNRS, Ecole Polytech., Univ. Paris-Sud, Observatoire de Paris, Université Paris-Saclay, PSL Research University, 4 Place Jussieu, 75252 Paris, France.
8. 4th Workshop / Conferences on plasma application for smart and sustainable agriculture, from 20 to 22 /05/2024 at the Academy of Sciences and Arts, Knez Mihailova 35, Belgrade, Serbia.

# PUBLICATIONS ISSUES DE LA THÈSE

# Treatment of Maize Seeds (*Zea Mays*) by Nonthermal Plasma Generated by Gliding Electric Discharge for Application in Agriculture

Jean-Paul Kamseu-Mogo, Georges Kamgang-Youbi<sup>✉</sup>, Serge A. Djepang, Berthelot S. Tamo, and Samuel Laminsi

**Abstract**—The gliding arc (Glidarc) electric discharge generates nonthermal plasma at atmospheric pressure. This work proposes to investigate the effect of humid air Glidarc plasma on maize seeds by studying the early germination and the effect on maize pathogens potentially harmful. The seeds were treated for 300 and 900 s in spatial post-discharge mode. At the first sight, there was a coloration change of the surface of 900 s-treated seeds, which became darker than control ones. Scanning electron microscopy (SEM) analysis showed no change for 300-s-treated but significant changes for higher exposure (900 s) revealed by modification of the etched/eroded surface of the starch caryopsis resulting in water holes and large channels. The pathogenicity test through the fungal infection led to a degree of 58% for the untreated seeds and 6.7% and 13.3% for the seeds treated for 300 and 900 s, respectively, and, thus, an important load reduction of fungi when the seeds were pretreated. Then, germination percentage (GP) along the early growth parameters was evaluated and the results showed that under laboratory conditions, these parameters increased by 4.6%–17.4% for GP, 5.8%–36.7% for shoot length, and 1%–12.9% for root length. Furthermore, the Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy showed no change in the bonds between atoms after the plasma treatment but revealed a surface activation due to the degradation of lipids. This application could contribute to the fight against food insecurity in Cameroon and in the world without using chemical additives.

**Index Terms**—Fungi, germination, inhibition, maize seeds, plasma gliding arc (Glidarc).

## I. INTRODUCTION

THE use of nonthermal plasma technology for environmental pollution remediation showed worthy outcomes,

Manuscript received June 8, 2020; revised December 11, 2020 and April 4, 2021; accepted June 23, 2021. The review of this article was arranged by Senior Editor S. J. Gitomer. (Corresponding author: Georges Kamgang-Youbi.)

Jean-Paul Kamseu-Mogo is with the Department of Inorganic Chemistry, University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon, and also with the Institute of Agricultural Research for Development, Dschang, Cameroon (e-mail: jppaul32001@yahoo.fr).

Georges Kamgang-Youbi and Samuel Laminsi are with the Department of Inorganic Chemistry, University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon (e-mail: drkamgangyoubigeorges@gmail.com; samuellamins@gmail.com).

Serge A. Djepang is with the University Institute of Technology, University of Ngaoundéré, Ngaoundéré, Cameroon (e-mail: sdjepang@yahoo.fr).

Berthelot S. Tamo is with the School of Geology and Mining Engineering, University of Ngaoundéré, Meiganga, Cameroon (e-mail: berthelot\_sop@yahoo.fr).

Color versions of one or more figures in this article are available at <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3094935>.

Digital Object Identifier 10.1109/TPS.2021.3094935

0093-3813 © 2021 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.

See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

implying the chemical properties of the reactive species generated by the plasma [1]. Nonthermal plasmas are characterized by very high electron energy and a low macroscopic temperature (as opposed to thermal plasmas) close to the room temperature and operated at atmospheric or low pressure. This category of plasma is suitable and efficient for microbial decontamination and sterilization of surfaces [2], [3]. When considering the surface treatment, the advantage of this technique is its ability to improve the surface properties of materials without affecting their bulk properties. The gliding electric discharge (Glidarc) is an easy, flexible and inexpensive way to generate nonthermal plasma at atmospheric pressure; an electric discharge takes place between two or more diverging electrodes raised to a suitable energy source, generally a high-voltage source (5–10 kV) so that an arc forms at the narrowest gap [4], [5]. A gas flow directed along the axis of the electrodes gently pushes the arc feet along the electrodes so that the discharge glides and its length increases until it breaks in a plasma plume when a new arc forms. The temperature of the ionized gas decreases so that it becomes nonthermal plasma; the temperatures of solids and liquid exposed are rarely higher than 310 K [6]. The chemistry of the Glidarc plasma involves the production of  $\text{NO}^\circ$  and  $\text{HO}^\circ$  radicals as main reactive species when the carrier gas is humid air [4].  $\text{NO}^\circ$  radical is known to be involved in acid effects and  $\text{HO}^\circ$  radical is involved in the oxidation effects due to its high redox potential ( $E_{\text{HO}^\circ/\text{H}_2\text{O}}^\circ = 2.85\text{V/SH}$ ), which justifies the use of Glidarc as advanced oxidation process (AOP). Moreover, these primary species are precursors of other entities, such as the reactive oxygen species (ROS)  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $^\circ\text{O}_2\text{H}$ ; the reactive nitrogen species (RNS)  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{ONOOH}$ , and  $\text{ONOO}^-$ ; and the ions  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ , and  $\text{N}^+$  [1]. The mechanisms by which Glidarc generates these radicals can be found in some of previous works [1], [4]. The Glidarc humid air was successfully applied for the inactivation of microorganisms in planktonic form [7] or in adherent form to solids [6], [8].

Hunger and malnutrition remain a scourge, affecting nearly 870 million people worldwide, the majority of whom remain in developing countries where food security remains a luxury [9]. Cereal crops play a major role in smallholder farmers' livelihoods in sub-Saharan Africa, with maize, *Zea mays*, being the most important food and cash crop for millions of rural farm families in the region. Despite this importance of maize,

grain yields are generally <1.0 t/ha, representing some of the lowest in the world [10]. In Cameroon, maize is considered the most important source of food, especially in the western highlands and the North [11]. Despite this importance, maize cultivation remains seasonal. In order to meet seed requirements and year-round consumption, farmers save a large part of their harvest. However, pests regularly damage storage [12]. Pests damage the quality, quantity, and commercial value of stored seeds [13]. Conventionally, crops are treated by chemicals or insecticides and fungicides but whose discharges later can present major environmental and human health risks.

In order to implement cheaper, efficient, and environmentally friendly physical storage policies to spare people from the risk of shortage of improved seeds during the agricultural off-season, plasma technology would offer good prospects for seed conservation and germination [14]. Seed plasma treatment has been successfully studied for its positive effect on germination and growth parameters of many agriculture crops, including grain and legumes. One of the first articles dedicated to the results of the effect of plasma on seeds was that of Dubinov *et al.* [15], which used glow discharge air plasma on grain crops seeds. Some other examples of plasma used for similar objectives can be found in the literature using radio frequency low-pressure plasma [16]–[18], atmospheric pressure dielectric barrier discharge [19]–[23], or plasma jet [19]. To the best of our knowledge, no studies on the effects of Glidarc plasma on maize seeds have been carried out so far. Therefore, our research group has decided to develop the Glidarc technology in the agricultural sector to protect seeds and, if possible, enhance seed germination. This article presents the preliminary works of maize seeds treatment by Glidarc plasma in spatial post-discharge mode with aim to decrease the number of seed-borne fungi. The spatial post-discharge zone is not to be confused with the “temporal post-discharge,” which is another feature of Glidarc treatments and referring to the evolution of the target after switching OFF the discharge, and the reactions continued without any other energy source [5], [7]. The spatial post-discharge phenomenon is considered when the samples are disposed out of the discharge zone, but in a part of the reactor in contact with the gas species formed in the discharge [24]. Therefore, the current work includes a surface analysis of maize seeds both by the Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM) analysis, the fungal infection degree (ID), and the measure of germination percentage (GP) and early growth parameters (shoot length and root length) of treated samples compared to the control ones.

## II. EXPERIMENT

### A. Maize Seeds Sample

Maize seeds (*Zea mays*) were collected from the Institute of Agricultural Research for Development (IRAD), Dschang, Cameroon, without any information on diseases in the field. For experiments, only healthy seeds without visible damage or infection were selected. It was a composite acid tolerance population (ATP) variety, the variety was chosen because of its

TABLE I  
APPROXIMATE CHEMICAL COMPOSITION (%)  
OF THE MAIN PARTS OF MAIZE

| Chemical component | Pericarp | Endosperm | Germ |
|--------------------|----------|-----------|------|
| Protein            | 3,7      | 8,0       | 18,4 |
| Lipid              | 1,0      | 0,8       | 33,2 |
| Crude fiber        | 86,7     | 2,7       | 8,8  |
| Ash                | 0,8      | 0,3       | 10,5 |
| Starch             | 7,3      | 87,6      | 8,3  |
| Sugar              | 0,3      | 0,6       | 10,8 |

adaptability in the agro-ecological zone of humid forest with monomodal rainfall.

The chemical composition of the main parts of the dry grain is presented in Table I. The pericarp (the outermost part of maize seed) is characterized by a high raw fiber content (approximately 86.7%), mainly consisting of hemicellulose (67%), cellulose (23%), and lignin (1%) [25]. Its thickness is around 110  $\mu\text{m}$  [26].

### B. Glidarc Plasma Device and Treatment Procedure

The plasma treatment was carried out in a Glidarc reactor schematized in Fig. 1. The description of a common Glidarc plasma reactor can be found elsewhere [27]. The basic reactor used in this study consists of two aluminum divergent electrodes disposed in a gas at atmospheric pressure and connected to a SELFI HV transformer. The transformer delivers a potential difference of about 9 kV in open conditions for an electrode gap of 3 mm (600 V; 160 mA in working conditions, which provides about 100 W to the discharge). The samples to be treated can be placed in a 500-mL cylinder-shaped glass reactor fitted with a water cooling jacket (direct mode) or in the spatial post-discharge zone (indirect mode). Operating conditions include the humid air as the carrier gas at a flow rate of 800 Lh<sup>-1</sup>, obtained by bubbling the airflow provided by a compressor through a water-filled Durand flask. In this study, the samples were treated in spatial post-discharge mode; the plasma gas coming from the reactor is piped in the bubbler containing the sample to be treated [24]. By leaving empty the glass cylinder and by associating to it a bubbler, a pipe, and a hose KNF NEUBERGER brand N86KT.18 suction pump type with a maximum pressure of 2.5 bar, 50 maize seeds are introduced and spread in the bubbler in a typical experiment. The gases formed in the plasma phase were funneled into the bubbler (57 cm<sup>2</sup> of bottom surface) using a small diameter Teflon hose (approximately 1-cm diameter and 1-m length) and the suction pump.

The treatment in spatial post-discharge mode was preferred to the direct mode (sample in the first chamber in contact with the plasma plume) in order to, on the one hand, avoid any thermal effect (although the temperature variation is also very moderate in the first chamber) and, on the other hand, to take advantage of the primary and secondary plasma species formed. Indeed, we previously showed during treatment of

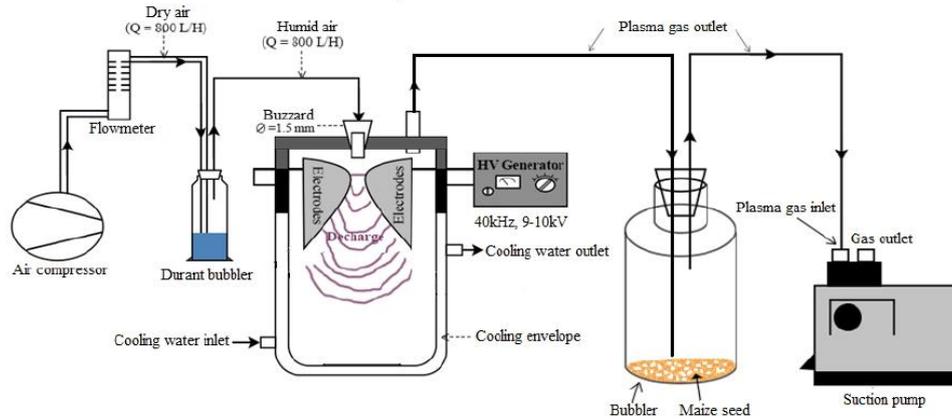


Fig. 1. Simplified schematic of a gliding plasma reactor for maize seeds treatment (spatial post-discharge).

kaolinite clay samples by humid air Glidarc plasma that their functionalization was more pronounced for samples in spatial post-discharge [24], [28].

To illustrate the effects of the treatment, the seeds were exposed for durations of 300 and 900 s.

### C. Water Absorption

One-hundred plasma-treated (300 and 900 s) and untreated maize seeds were stored in a cylindrical glass box with distilled water and left to imbibe at laboratory temperature of 25 °C for 36 h. The seeds were dried and weighed within the first and last 12 h at 6-h intervals. An electronic analytical balance (SARTORIUS 1264MP, Germany) with an accuracy of 0.1 mg was used for this purpose. The amount of water absorbed was determined from the actual increase in seed weight. The water absorption (WA, %) can be expressed by the following equation:

$$WA = \frac{FW - D}{DW} \times 100\% \quad (1)$$

where FW is the fresh weight of samples stored in distilled water and DW is the weight of dry samples.

### D. Pathogenicity Test

The pathogenicity test consists of the analysis of the appearance of pathogens on seeds when they are placed under certain biological conditions. For this purpose, analysis of pathogens was carried out according to the protocol described by Djeugap *et al.* [29]. First, maize seeds were disinfected with 5% bleach solution for 5 min, followed by a triple rinse in sterile water and placed on sterile blotting paper. After this disinfection step, seeds were divided into three groups: seeds for the control treatment, seeds to be treated with Glidarc plasma for 300 s, and seeds to be treated with Glidarc plasma for 900 s. A total of 200 seeds in four replicates of 50 seeds were treated by plasma for each processing time as described in Section II-B, and for each plasma processing time, 40 seeds were divided into four replicates of ten seeds. The ten seeds

were sown in a wet chamber consisting of a 9-cm diameter glass Petri dish while protected from further contamination (sterile medium). Petri dishes contained blotting paper soaked in sterilized distilled water. After five days of incubation at 22 °C, pathogens developed all around the seeds. The control treatment was carried out on nontreated seeds as the same manner described above.

At the end of the incubation period, seeds are observed one by one for the analysis of the growth of fungi on their surface. The total infection degree (ID, %) can then be calculated by the following equation:

$$ID = \frac{SI}{ST} \times 100\% \quad (2)$$

where ID is the infection degree, SI is the number of infected seeds, and ST is the total number of seeds.

### E. Germination and Early Growth Test

A standard blotter method was used to search the GP [30]. The experimental device used to set up our laboratory trial was the fully randomized block device with four replicates. Seeds were placed into sterile Petri dishes (diameter of 20 cm) boxes containing blotting paper moisturized with sterile distilled water under laboratory conditions (25 °C, 8%–12% humidity). During the germination period, 5 mL of sterile distilled water was added to the Petri dishes every 6 h in order to maintain the environment always wet. Four hundred seeds were sown at four replicates of 100 seeds for each experiment point (0, 300, and 900 s). The substrate used is blotting paper and the method used is top of the paper (TP). For seeds that germinated, germination began noticeably the third day. After seven days, the germination percentage (GP, %) was calculated by the following equation (the seed was considered germinated when the radicle protrusion was 1 cm):

$$GP = \frac{SG}{ST} \times 100\% \quad (3)$$

where GP is the germination percentage, SG is the number of germinated seeds, and ST is the total number of seeds.

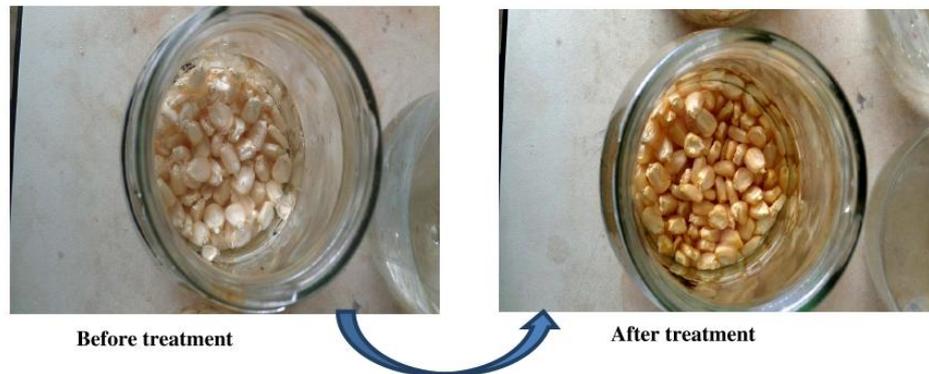


Fig. 2. Color change on the seed surface after Glidarc plasma treatment of 900 s.

The early growth test of seeds was determined by measuring the length of shoot and length of root. The population used for the measurements of these parameters was the same as that used for the above germination tests. Root lengths and shoot lengths were observed daily. However, determining that the root lengths were difficult at the beginning of growth, the roots were very fragile to straighten out for proper measurement. Therefore, the length of roots and shoots for seeds that germinated was measured only after the seventh day of cultivation.

#### F. Surface Analysis

In order to evaluate the eventual morphology changes after the plasma treatment, SEM imaging was conducted on three sets of seeds: seeds without treatment (control), seeds treated by plasma for 300 s, and seeds treated by plasma for 900 s. We produced the SEM images of pericarp using a Philips FEI XL 70 FEG brand apparatus equipped with a field emission gun. The nonmetal-coated samples were exposed to electrons with an acceleration voltage of 3 and 5 kV.

FTIR spectroscopy was used to characterize the presence of specific chemical groups on the pulp of maize seeds before and after plasma treatment. For this purpose, the maize seeds were pulped and ground in a porcelain crucible, and then, the FTIR analysis was carried out using the attenuated total reflectance (ATR) method on powder of maize. Spectra were recorded after 07 scans on a Spectrum two from Perkin Elmer Instruments (U.K.) spectrometer operating in the wavelength range  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  with a resolution of  $4\text{ cm}^{-1}$ .

#### G. Statistical Analysis

All these data based on the average of the four replicates using Microsoft Excel software. The analysis of variances was performed using ANOVA and the differences were considered significant for  $P < 0.05$ . Standard deviations were calculated. In the figures, the spread of values is shown as error bars representing standard errors of the means.

### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A. Surface Characterizations

The seeds surface of maize showed no visual change after 300 s of treatment, but changes between surfaces of

untreated seeds and 900-s-plasma-treated seeds were obvious (see Fig. 2). At first sight, the pulp of 900-s-treated seeds had a darker color than the untreated ones.

The normalized FTIR-ATR spectra of the treated seeds were carried out and compared with that of the untreated seeds (see Fig. 3). The three spectra have practically the same characteristic bands, but with peaks at sometimes different intensities. The typical bindings relative to the chemical composition shown in Table I are present: carbohydrates, proteins, and lipids. Carbohydrates are represented by C–O, C–C, and C–O–H bonds ( $1200\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ ) with a typical glycosidic bond at about  $1000\text{ cm}^{-1}$  [31], [32]. The C–H stretching between  $2929$  and  $2858\text{ cm}^{-1}$  and also C–H deformation vibration at  $1464\text{--}1416$ ,  $1166$ , and  $1337\text{ cm}^{-1}$  are characteristic of lipids [32]. The decrease in the peaks of C–H stretching and more precisely the disappearance of band with peak at about  $2981\text{ cm}^{-1}$  for the two spectra of treated seeds indicates that plasma treatment modifies the surface by degrading the lipids. The oxidizing species of plasma such as  $\text{HO}^\circ$  are responsible for this modification, as  $\text{HO}^\circ$  is known to be efficient for oxidation of organic compounds [1], [5]. Proteins are represented by amides: N–H stretching vibration at about  $3152\text{ cm}^{-1}$ , C=O stretching vibration at about  $1740\text{ cm}^{-1}$ , C–N stretching vibration, and N–H deformation in the region  $1549\text{--}1464\text{ cm}^{-1}$  and more complex bands resulting from N–H, C–N, and C–C bonds at about  $1166\text{ cm}^{-1}$ . The strong broadband around  $3518\text{--}2929\text{ cm}^{-1}$  is attributed to OH stretching and peaks attributed to deformation of the O–H bonds at  $1416$  and  $1660\text{ cm}^{-1}$  [33]. The main bands due to the functional groups common to lignocellulosic materials present in the pericarp (the external part of the grain) are also depicted. The double peak depicted at around  $2923$  and  $2800\text{ cm}^{-1}$  characterizes the asymmetric elongation vibration of the CH and  $\text{CH}_2$  (symmetric stretch) of the cellulose and lignin, the peak of C=O valence vibration of aldehydes, esters, and carboxylic acids present in lignin and hemicellulose appears around  $1731\text{ cm}^{-1}$ , and some other peaks appearing below  $900\text{ cm}^{-1}$  are characteristics of the C–H group in the cellulose. The decrease in C=O ( $1731\text{ cm}^{-1}$ ) and C=C ( $1635\text{ cm}^{-1}$ ) chemical groups for plasma-treated seeds indicates the surface modification by reactive plasma species. These results are also in agreement with those obtained by Molina *et al.* [34]

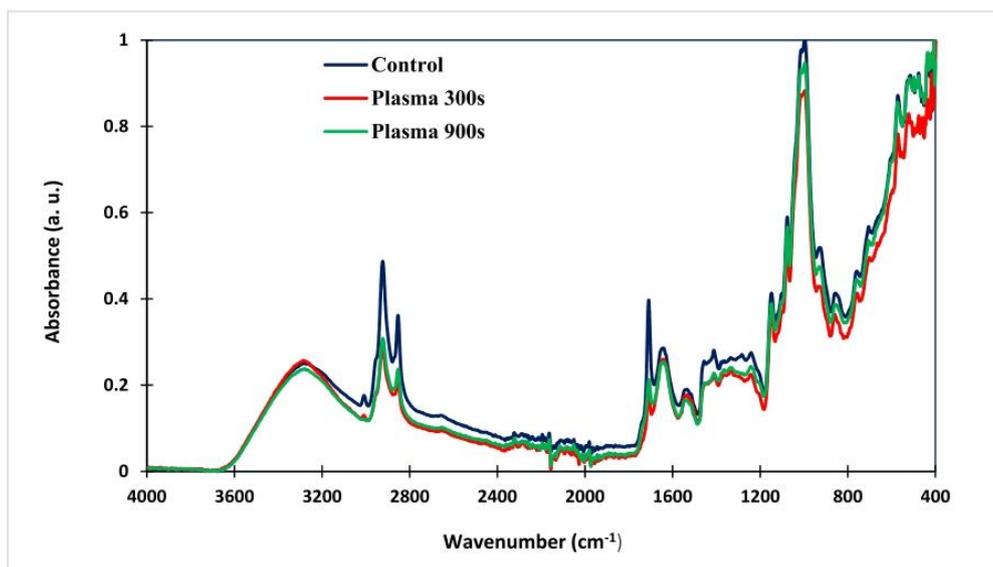


Fig. 3. FTIR analysis of maize seed pericarp.

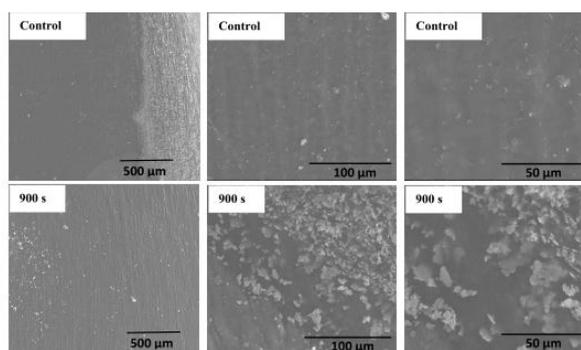


Fig. 4. SEM images of seeds treated for 900 s and untreated seeds.

using atmospheric DBD plasma for treatment of wheat pericarp, also containing lignin, hemicellulose, and cellulose compounds.

SEM analysis is presented in Figs. 4 and 5 with different magnifications. SEM photographs showed that the 900-s treatment significantly affected the morphology of maize starch (see Fig. 4). It seems that some debris-like contamination was noted on the plasma-treated seeds. The 900-s-exposure of seeds to plasma resulted in etching of surfaces and this can affect the inner parts of germ with the main consequence in water holes and large channels. Similar changes were observed by Chen *et al.* [35] using the low-pressure plasma to modify the microstructure and textural properties of brown rice. Their study revealed an etching of brown rice surface after the plasma treatment for 18 min. On the other hand, a 300-s treatment did not cause any degradation of the surface of the maize seeds (see Fig. 5). The treatment zone (far from the

ignition of the discharge) and the shorter duration (300 s) can explain this observation. This result is consistent with those obtained by Zahoranová *et al.* [33] on maize seeds using DBD cold atmospheric plasma and by Molina *et al.* [34] and Šerá *et al.* [36] on another cereal seeds (wheat seeds), as these authors showed that the reactive species of the plasma did not cause any surface degradation, erosion, or scratches for short treatment time.

#### B. Pathogenicity Test

Fungi on cereal seeds may affect the crops quality and are responsible for most spoilage and germ damage during storage. The maize grains are known to be good substrates for growth of fungi, such as *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, and *Fusarium* species [37], [38]. These species can infect food grains by producing toxins that cause diseases on human or animals using seeds as food.

Fig. 6 shows the image of plasma-treated seeds for 300 s and untreated seeds. The same pathogenicity test was carried out on the two groups of samples. Pathogens are clearly seen to appear on untreated seeds [see Fig. 6(a)]. As all of seeds were “healthy” before the test (i.e., the seeds were not visibly infested with filamentous fungi), a visible infection due to an autochthonous microflora was developed for the untreated seeds, unlike the plasma-pretreated seeds [see Fig. 6(b)]. These results were quantified by calculating the ID.

The ID of the nontreated seeds is around 58%, whereas those of 300 and 900 s treated seeds are only 6.7% and 13.4%, respectively (see Fig. 7). The plasma pretreatment of seeds allowed a significant reduction ( $P < 0.05$ ) of fungal load whatever the treatment time. This characteristic was also demonstrated by Braşoveanu *et al.* [30] during treatment of maize seeds using low-pressure air glow discharge plasma

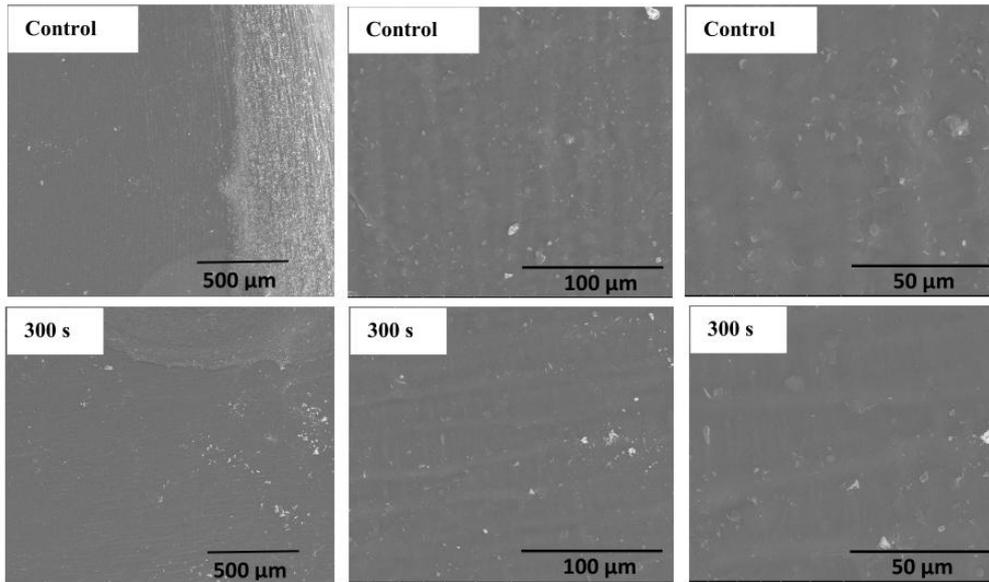


Fig. 5. SEM images of 300-s-treated seeds and untreated seeds.

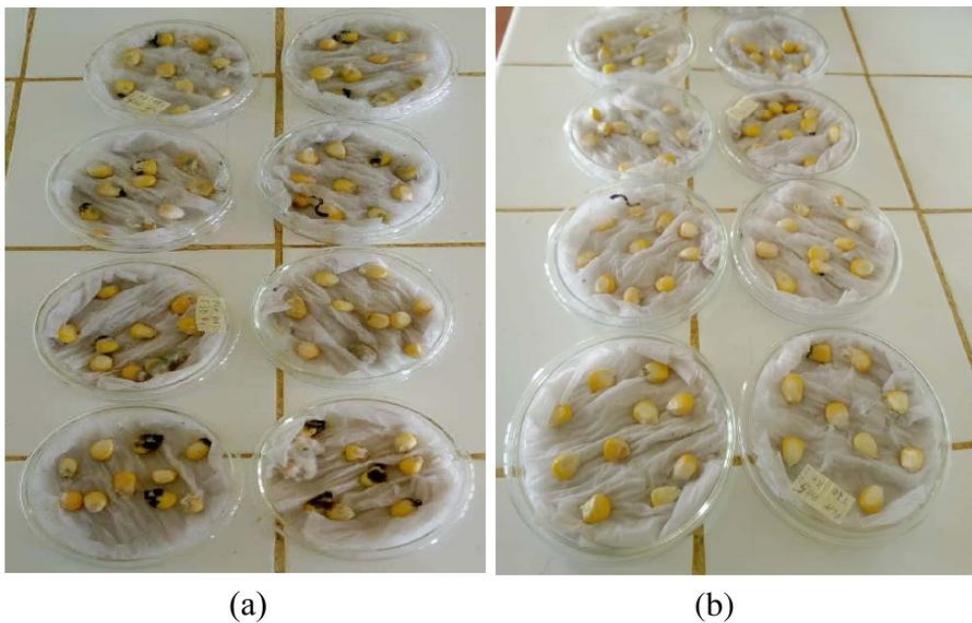


Fig. 6. Images of development of pathogens on (a) untreated seeds compare to (b) 300-s-plasma-treated seeds.

for 2–20 min or during air-DBD treatment for 60 and 300 s with aim to reduce the appearance of pathogens on maize seeds [33]. Recently, Filatova *et al.* [39] also showed the efficiency of seed treatment by low-pressure radio frequency plasma in suppression of a number of fungal crop diseases of maize. They demonstrated that the infection level in maize plants from treated seeds was three times less than that in control. However, the better infection rate recorded at the

shortest treatment time is a paradox because the devitalizing effect of plasma increases with the length of treatment [33]. One explanation may be related to the quality and quantity of reactive plasma species over time which is not constant [1], and this could then influence the subsequent development of pathogens on maize seeds. Kamgang *et al.* [40] showed greater adhesion of bacteria on steel and polymer surfaces previously exposed to Glidarc plasma.

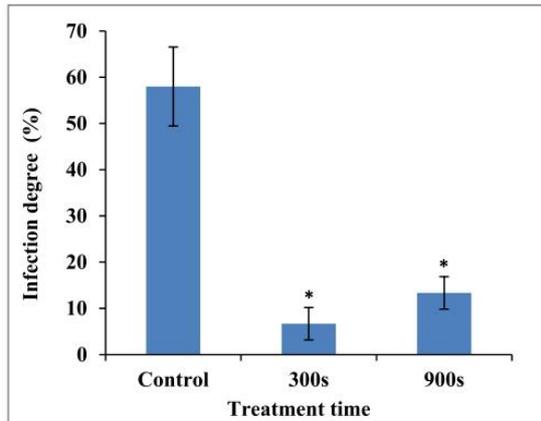


Fig. 7. ID of untreated seeds and plasma-treated maize seeds for 300 and 900 s. Values are mean of at least four independent experiments and bars represent standard deviation (SD). The significance was determined against control (untreated) samples. Results were significant at  $*P < 0.05$ .

It is well known that plasma may interact with the surfaces via complex mechanisms involving UV radiation, heat transfer, charged particles, chemically active species, and so on. In our study, experiments were run in the spatial post-discharge zone, far from the emissive part of the plasma plume, so we believe that the UV radiation does not have a significant effect on the inhibition of borne pathogens process. The thermal effect can also be discarded because the temperature of samples remained practically unchanged during the process. Thus, ROS ( $\text{HO}^\bullet$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and  $^\circ\text{O}_2\text{H}$ ) and RNS ( $\text{NO}^\circ$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{ONOOH}$ , and  $\text{ONOO}^-$ ) generated by humid air plasma would then be responsible for this inhibition of pathogens. The reactivity of these species remains present several hours, even several days after their production as demonstrated in the temporal post-discharge effect of Glidarc plasma [5], [7]. Oxidative stress on microorganisms, as reported by Kamgang *et al.* [8] and Moreau *et al.* [41], is believed to be responsible for the inhibition of pathogens.

Previously, Glidarc plasma was used for the treatment on inanimate surfaces. With the aim of bacterial emergence, modifications of polymers and stainless steel induced by humid air Glidarc plasma treatment enhanced bacterial fixation of *S. epidermidis* [40]. This study was conducted by exposing the substrate in the discharge plasma zone, which can considerably affect the surface properties of the material. The enhancement of adherence may be considered as positive or negative depending on the applications, but with the aim of decreasing the number of seed-borne fungi, it is better for a treatment to reduce the further presence of pathogens. Based on the results obtained here, we can therefore confirm that spatial post-discharge Glidarc treatment is efficient for improving the storage of maize seeds.

### C. Plasma Effect on Water Absorption

The water absorption results indicated that the seeds absorb rapidly at the start of imbibition (the first 12 h) and then more slowly during the last hours to reach around 40%

for the treated seeds and 33% for the untreated seeds (see Fig. 8). Samples plasma-treated for 300 and 900 s absorbed more water than control samples whatever the imbibition time. In addition, no significant difference was recorded in the results of the two groups of treated seeds (difference  $< 0.5\%$ ), which indicates that the duration of the treatment had no influence on the absorption of water in this study. The enhancement of water absorption for plasma-treated seeds observed in this study is consistent with the observations of other authors for several types of seeds [19], [23], [33].

The initial absorption of water in necessarily linked to the hydrophilicity of the surface of seed. Previously, we have shown an increase in the hydrophilicity of the surface of kaolinite clay after humid air plasma using the same device, due to the increase in hydroxyl groups on the surface of the material [24]. Other previous studies using Glidarc with the sample placed in the discharge zone have also shown an increase in the hydrophilicity of polymer and metallic materials [41]–[43]. This characteristic, therefore, seems general to the humid air Glidarc when the samples are exposed to it. Indeed, there is an increasing concentration of polar groups, containing oxygen and nitrogen on the surface of the treated seed samples. Greater hydrophilicity leads to a decrease in the contact angle between water and sample and, therefore, better water absorption in the case of seeds. These findings were demonstrated by Velichko *et al.* [19] on wheat seeds and by Ling *et al.* [44] on soybean. Using Glidarc plasma, Moreau *et al.* [41] and Faubert *et al.* [42] also showed a reduction on contact angle, but on nonliving materials. Better water absorption is often indicative of better subsequent germination.

### D. Germination Enhancement

Glidarc plasma was applied to maize seeds for two different treatment times. Germination of the tree types of seeds (0, 300, and 900 s) was monitored. Although irrigation conditions can impact the percentage of subsequent germination [34], this parameter was kept constant and the same for all studied seeds (untreated and plasma-treated). Thus, the potential effect of irrigation condition can be discarded. Fig. 9 shows that the Glidarc plasma treatment influences the germination of maize seeds. The most significant response was obtained for seeds treated for 300 s with around 96% of GP, largely higher than 78% obtained for the untreated seeds. No significant difference was recorded for changes of germination at the treatment time of 900 s in comparison to the control ( $P > 0.05$ ).

Glidarc plasma treatment of maize seeds also affected the characteristics of seedling growth, including root and shoot length after seven days of cultivation. For each experimental point (control, 300 s, and 900 s), the mean values of the measurements of these parameters were calculated. Regarding the shoot length [see Fig. 10(a)], the treatment time of 300 s stimulated this parameter by around 36.7% results significantly different ( $P < 0.05$ ) from the untreated seeds. For the seeds treated for 900 s, a slight improvement of 5.8% was obtained and the statistical calculations revealed no significant ( $P > 0.05$ ) difference in shoot length from the control seeds.

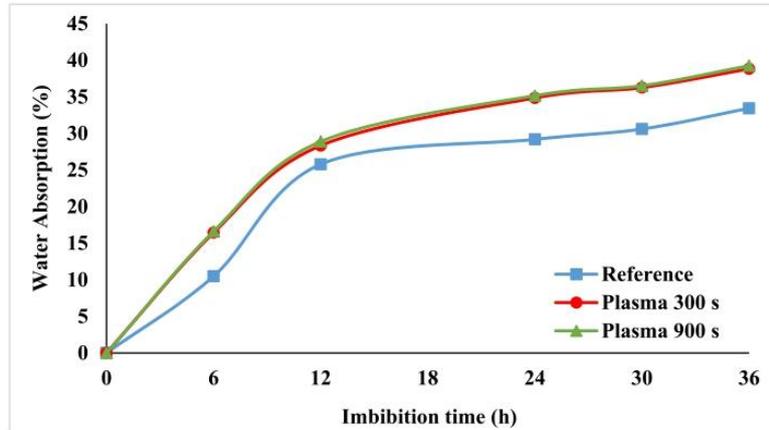


Fig. 8. Water absorption at 25 °C for Glidarc plasma-treated maize seeds (300 and 900 s) and untreated control (reference) maize seeds.

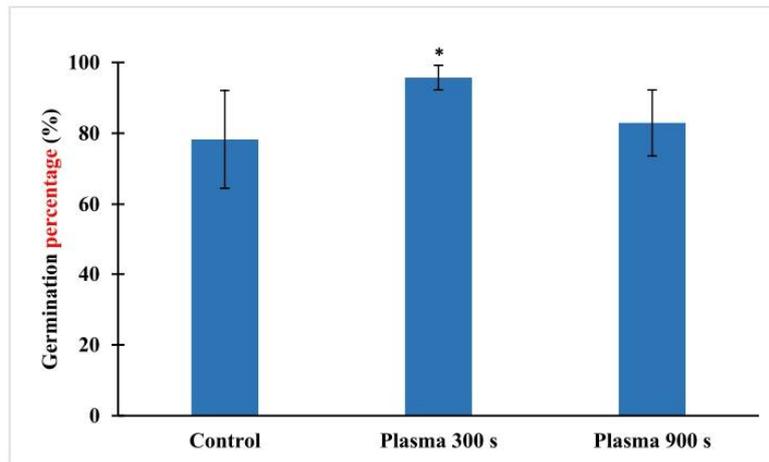


Fig. 9. Effect of Glidarc plasma treatment on GP of maize seeds. Values are the mean of at least four independent experiments and bars represent SD. The significance was determined against control (untreated) samples. Results were significant at  $*P < 0.05$ .

As for the root length [see Fig. 10(b)], the results indicated an average length of 5.03 cm for untreated seeds after seven days of germination, 5.68 and 5.07 cm for seeds treated for 300 and 900 s, respectively. Plasma treatment did not negatively affect growth, since a slight increase was obtained, even if not significantly different ( $P > 0.05$ ) whatever the treatment time (compared to control).

Globally, Glidarc plasma treatment of maize seeds affects the characteristics of GP and seedling growth. The interaction of plasma with the surface of seeds leads to faster germination and greater yields. The response to a 300-s-plasma exposure is more effective than that at 900 s and the results can be correlated with those of ID (see Fig. 6), where the inhibition of pathogens was greater at 300 s. Fig. 8 shows a better water uptake for 300-s-plasma-treated seeds and this fact can also explain the relatively better GP for this group of seeds. In addition, the results of germination tests corroborated with

those of SEM and FTIR. Indeed, we have shown above that after 300 s of treatment, the surface of the seed was not changed (see Fig. 5), but after 900s, significant differences were observed compared to the control sample (see Fig. 4). A long treatment period would therefore have the effect: in addition to produce the reactive species necessary for enhancing germination, inducing changes in the bulk material, which could even delay germination [36]. These results, which have not previously been obtained for Glidarc plasma, have been reported in previous studies using other plasma devices for maize seeds treatment. Indeed, Zahoranová *et al.* [33] stimulated root length and shoot length of corn seedling by 12% and 35%, respectively, within 60 s of treatment by atmospheric plasma DBD, and similarly, higher exposure time diminished the early growth parameters. Braşoveanu *et al.* [30] observed a similar phenomenon using low-pressure glow discharge of air plasma for treatment of maize seeds. Matra [45] also showed

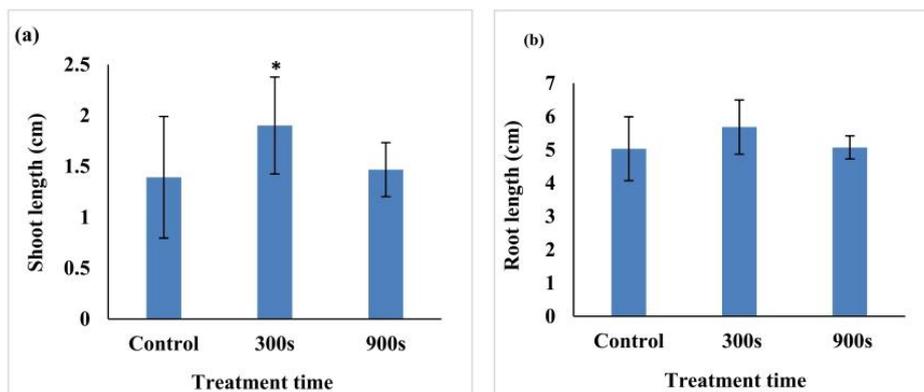


Fig. 10. Effect of plasma treatment on seedling growth. (a) Shoot length. (b) Root length. Values are the mean of at least four independent experiments and bars represent SD. The significance was determined against control (untreated) samples. Results were significant at  $*P < 0.05$ .

that, after seven days of cultivation, the root length and the shoot length of nonthermal plasma treatment of radish seeds were rather longer than that of the controlled group. Using DBD plasma, Mazandarani *et al.* [46] showed the positive effects of plasma treatment on barley seed germination and seedling growth with 18.28% increment in GP and 38.55% and 31.93% increment on the shoot height and root length, respectively. Studying germination capacity and germination energy of *Lavatera thuringiaca L.* seeds, Pawlat *et al.* [47] showed that pre-sowing Glidarc plasma stimulation improved these germination parameters.

Germination is the beginning of the development of a new plant individual, from a seed placed in favorable conditions. There are various events associated with germination ranging from the initial absorption of water by dry seeds to the emergence of the radicle through the seed coat. Seed germination is accompanied by intensive production of oxidizing species, such as superoxide anion, hydrogen peroxide, NO, and its derivatives. Protein contents can be an indicator for faster germination [48]. Indeed, the analysis of FTIR spectroscopy (see Fig. 3) showed that the protein contents in treated seeds are higher than those of untreated control, allowing faster development of seedlings.

In this study, the carrier gas is humid air and the nitrogen-based compound is expected to promote germination. Indeed, works carried out by Volin *et al.* [49] on the influence of plasma gases have shown an improvement in the germination of maize seeds by plasma pretreatment when the plasma gas contained nitrogen (aniline or hydrazine) unlike gas not containing (cyclohexane and fluorocarbon).

#### IV. CONCLUSION

In this article, Glidarc plasma in spatial post-discharge mode was tested for the treatment of maize seeds, the most popular crop in Cameroon and among the most important in the world. Glidarc process, a nonpolluting method, inhibited efficiently the growth of pathogens in maize seeds while promoting their performance and crop yields. Interesting preliminary results were obtained by subjecting seed samples to

reactive oxygen and nitrogen species generated by humid air plasma for 300- and 900-s treatments with better results for the shorter exposure time. These results are well correlated with SEM analysis and FTIR spectroscopy carried out on untreated and treated seeds. The plasma method would be a good alternative to pesticides or other chemicals, which are very expensive inputs with devastating environmental and health effects. Works are in progress to identify the nature of the fungal contamination of the maize grains during the infection stage, optimize the plasma treatment time, and study the impact of germination on treated and aged seeds.

#### REFERENCES

- [1] J.-L. Brisset *et al.*, "Chemical reactivity of discharges and temporal post-discharges in plasma treatment of aqueous media. Example of gliding discharge treated solutions: A review," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, no. 16, pp. 5761–5781, Aug. 2008.
- [2] M. Laroussi, "Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 1188–1191, Jun. 1996.
- [3] M. Moisan, J. Barbeau, S. Moreau, J. Pelletier, M. Tabrizian, and L. Yahia, "Low-temperature sterilization using gas plasmas: A review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms," *Int. J. Pharmaceutics*, vol. 226, nos. 1–2, pp. 1–21, Sep. 2001.
- [4] B. Benstaali, P. Boubert, B. G. Chéron, A. Addou, and J.-L. Brisset, "Density and rotational temperature measurements of the NO<sup>+</sup> and OH<sup>+</sup> radicals produced by a gliding arc in humid air and their interaction with aqueous solutions," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 22, no. 4, pp. 553–571, Dec. 2002.
- [5] D. Moussa, A. Doubla, G. Kamgang-Youbi, and J.-L. Brisset, "Postdischarge long life reactive intermediates involved in the plasma chemical degradation of an azoic dye," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 444–453, Apr. 2007.
- [6] B. G. Dasan, B. Onal-Ulusoy, J. Pawlat, J. Diatczyk, Y. Sen, and M. Mutlu, "A new and simple approach for decontamination of food contact surfaces with gliding arc discharge atmospheric non-thermal plasma," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 650–661, Apr. 2017.
- [7] G. Kamgang-Youbi, J.-M. Herry, M.-N. Bellon-Fontaine, J.-L. Brisset, A. Doubla, and M. Naïtali, "Evidence of temporal postdischarge decontamination of bacteria by gliding electric discharges: Application to *Hafnia alvei*," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 73, no. 15, pp. 4791–4796, Aug. 2007.
- [8] J. O. Kamgang, R. Briandet, J. M. Herry, J. L. Brisset, and M. Naïtali, "Destruction of planktonic, adherent and biofilm cells of *Staphylococcus epidermidis* using a gliding discharge in humid air," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 103, no. 3, pp. 621–628, Sep. 2007.

- [9] *The State of Food Insecurity in the World 2012. Economic Growth is Necessary but not Sufficient to Accelerate Reduction of Hunger and Malnutrition, Annex 2: Updating and Overhauling the FAO Methodology for Assessing Food Insecurity a Summary of Changes and Their Impacts*, FAO, WFP, and IFAD, Rome, Italy, 2012, pp. 50–56. [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/016/i3027e07.pdf>
- [10] C. A. O. Midega, A. W. Murage, J. O. Pittchar, and Z. R. Khan, "Managing storage pests of maize: Farmers' knowledge, perceptions and practices in western kenya," *Crop Protection*, vol. 90, pp. 142–149, Dec. 2016.
- [11] E. I. Moyin-Jesu, "Comparative evaluation of modified neem leaf, wood ash and neem leaf extracts for seed treatment and pest control in maize (*Zea mays L.*)," *Emirates J. Food Agric.*, vol. 22, no. 1, pp. 37–45, Oct. 2010.
- [12] E. N. Nukene, C. Adler, and C. Reichmuth, "Efficacy evaluation of plant powders from cameroon as post-harvest grain protectants against the infestation of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae)," *J. Plant Diseases Protection*, vol. 114, no. 1, pp. 30–36, Feb. 2007.
- [13] T. L. S. Ngamo *et al.*, "Use of essential oils of aromatic plants as protectant of grains during storage," *Agric. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 204–209, 2007.
- [14] L. K. Randeniya and G. J. J. B. de Groot, "Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review," *Plasma Processes Polym.*, vol. 12, no. 7, pp. 608–623, Jul. 2015.
- [15] A. E. Dubinov, E. M. Lazarenko, and V. D. Selemir, "Effect of glow discharge air plasma on grain crops seed," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 180–184, Feb. 2000.
- [16] E. Bormashenko, R. Grynyov, Y. Bormashenko, and E. Drori, "Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds," *Sci. Rep.*, vol. 2, no. 1, p. 741, Oct. 2012.
- [17] S. Kitazaki, K. Koga, M. Shiratani, and N. Hayashi, "Growth enhancement of radish sprouts induced by low pressure O<sub>2</sub> Radio frequency discharge plasma irradiation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 1S, Jan. 2012, Art. no. 01AE01.
- [18] D. Butscher, I. Schlup, C. Roth, N. Müller-Fischer, C. Gantenbein-Demarchi, and P. R. Von Rohr, "Inactivation of microorganisms on granular materials: Reduction of *Bacillus amyloliquefaciens* endospores on wheat grains in a low pressure plasma circulating fluidized bed reactor," *J. Food Eng.*, vol. 159, pp. 48–56, Aug. 2015.
- [19] I. Velichko *et al.*, "Plasma jet and dielectric barrier discharge treatment of wheat seeds," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 39, no. 4, pp. 913–928, Jul. 2019.
- [20] Y. Meng, G. Qu, T. Wang, Q. Sun, D. Liang, and S. Hu, "Enhancement of germination and seedling growth of wheat seed using dielectric barrier discharge plasma with various gas sources," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 37, no. 4, pp. 1105–1119, Jul. 2017.
- [21] S. Kitazaki, T. Sarinont, K. Koga, N. Hayashi, and M. Shiratani, "Plasma induced long-term growth enhancement of *Raphanus sativus* L. Using combinatorial atmospheric air dielectric barrier discharge plasmas," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 14, no. 2, pp. 149–153, Jul. 2014.
- [22] M. Sery, A. Zahoranova, A. Kerdik, and B. Sera, "Seed germination of black pine (*Pinus nigra Arnold*) after diffuse coplanar surface barrier discharge plasma treatment," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 48, no. 4, pp. 939–945, Apr. 2020.
- [23] D. Dobrin, M. Magureanu, N. B. Mandache, and M.-D. Ionita, "The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 29, pp. 255–260, May 2015.
- [24] B. S. Tamo *et al.*, "Plasma chemical functionalisation of a cameroonian kaolinite clay for a greater hydrophilicity," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 36, no. 6, pp. 1449–1469, Nov. 2016.
- [25] R. M. Burge and W. J. Duensing, "Processing and dietary fiber ingredient applications of corn bran," *Cereal Foods World*, vol. 34, no. 7, pp. 535–538, 1989.
- [26] S. A. Waston, "Structure and composition," in *Corn: Chemistry and Technology*, S. A. Watson, P. E. Ramstad, Ed. St Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists, 1987, pp. 55–82.
- [27] D. Tadam, G. Kamgang-Youbi, E. Acayanka, E. Njoyim-Tamungang, and S. Laminsi, "Reduction of sludge formed during a coagulation treatment of Ridomil gold by means of non-thermal quenched plasma pre-treatment," *Environ. Monitor. Assessment*, vol. 190, no. 7, p. 443, Jun. 2018.
- [28] B. Sop-Tamo, E. Acayanka, W. F. Boyom-Tatchemo, S. Nzali, G. Kamgang-Youbi, and S. Laminsi, "Gliding arc plasma pre-treatment of kaolin in spatial post-discharge mode for removal of reactive red 2 dye from aqueous solution," *Water Sci. Technol.*, vol. 78, no. 7, pp. 1448–1458, Nov. 2018.
- [29] F. J. Djeugap *et al.*, "Morphological and molecular identification of pathogenic fungi of *Monodora myristica* Dunal kernels and their response to different phytoextracts," *Int. J. Adv. Agricult. Res.*, vol. 5, pp. 66–75, Aug. 2017.
- [30] M. Braşoveanu, M. R. Nemţanu, C. Surdu-bob, G. Karaca, and I. Erper, "Effect of glow discharge plasma on germination and fungal load of some cereal seeds," *Romanian Rep. Phys.*, vol. 67, no. 2, pp. 617–624, 2015.
- [31] V. G. Uarrota, E. R. Amante, I. M. Demiate, F. Vieira, I. Delgadillo, and M. Maraschin, "Physicochemical, thermal, and pasting properties of flours and starches of eight Brazilian maize landraces (*Zea mays L.*)," *Food Hydrocolloids*, vol. 30, no. 2, pp. 614–624, Mar. 2013.
- [32] S. Kuhnen *et al.*, "ATR-FTIR spectroscopy and chemometric analysis applied to discrimination of landrace maize flours produced in southern Brazil," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 45, no. 8, pp. 1673–1681, Jun. 2010.
- [33] A. Zahoranová *et al.*, "Effect of cold atmospheric pressure plasma on maize seeds: Enhancement of seedlings growth and surface microorganisms inactivation," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 38, no. 5, pp. 969–988, Sep. 2018.
- [34] R. Molina *et al.*, "Physicochemical surface analysis and germination at different irrigation conditions of DBD plasma-treated wheat seeds," *Plasma Processes Polym.*, vol. 18, no. 1, Jan. 2021, Art. no. 2000086.
- [35] H. H. Chen, Y. K. Chen, and H. C. Chang, "Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice," *Food Chem.*, vol. 135, no. 1, pp. 74–79, Nov. 2012.
- [36] B. Sera, P. Spatenka, M. Sery, N. Vrchotova, and I. Hruskova, "Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and fungal load," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, no. 10, pp. 2963–2968, Oct. 2010.
- [37] I. Niaz and S. Dawar, "Detection of seed borne mycoflora in maize (*Zea mays L.*)," *Pakistan J. Botany*, vol. 41, no. 1, pp. 443–451, Feb. 2009.
- [38] C. Abe *et al.*, "Fungi isolated from maize (*Zea mays L.*) grains and production of associated enzyme activities," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 16, no. 12, pp. 15328–15346, Jul. 2015.
- [39] I. Filatova, V. Lyushkevich, S. Goncharik, A. Zhukovsky, N. Krupenko, and J. Kalatskaja, "The effect of low-pressure plasma treatment of seeds on the plant resistance to pathogens and crop yields," *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 53, no. 24, Jun. 2020, Art. no. 244001.
- [40] J. O. Kamgang, M. Naitali, J.-M. Herry, M.-N. Bellon-Fontaine, J.-L. Brisset, and R. Briandet, "Increase in the hydrophilicity and Lewis acid-base properties of solid surfaces achieved by electric gliding discharge in humid air: Effects on bacterial adherence," *Plasma Sci. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 187–193, Apr. 2009.
- [41] M. Moreau *et al.*, "Gliding arc discharge in the potato pathogen *Erwinia carotovora subsp. Atroseptica*: Mechanism of lethal action and effect on membrane-associated molecules," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 73, no. 18, pp. 5904–5910, Sep. 2007.
- [42] F. Faubert *et al.*, "Treatment by gliding arc of epoxyresin: Preliminary analysis of surface modifications," *Proc. SPIE*, vol. 10010, Dec. 2016, Art. no. 100103G.
- [43] S.-H. Hong, T.-H. Kim, and S. Choi, "Hydrophilic surface modification of polytetrafluoroethylene film with gliding arc plasma," *Appl. Sci. Conver. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 101–106, Jul. 2019.
- [44] L. Ling *et al.*, "Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean," *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, p. 5859, Jul. 2014.
- [45] K. Matra, "Non-thermal plasma for germination enhancement of radish seeds," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 86, pp. 132–135, May 2016.
- [46] A. Mazandarani, S. Goudarzi, H. Ghafoorifard, and A. Eskandari, "Evaluation of DBD plasma effects on barley seed germination and seedling growth," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 48, no. 9, pp. 3115–3121, Sep. 2020.
- [47] J. Pawlat, A. Starek, A. Sujak, M. Kwiatkowski, P. Terebun, and M. Budzen, "Effects of atmospheric pressure plasma generated in GlidArc reactor on *Lavatera thuringiaca L.* Seeds' germination," *Plasma Processes Polym.*, vol. 15, no. 2, Feb. 2018, Art. no. 1700064.
- [48] M. Henselová, L. Slovákova, M. Martinka, and A. Zahoranová, "Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma," *Biologia*, vol. 67, no. 3, pp. 490–497, Jun. 2012.
- [49] J. C. Volin, F. S. Denes, R. A. Young, and S. M. T. Park, "Modification of seed germination performance through cold plasma chemistry technology," *Crop Sci.*, vol. 40, no. 6, pp. 1706–1718, Nov. 2000.



**Jean-Paul Kamseu-Mogo** was born in Yaoundé, Cameroon, in 1985. He received the B.S. degree in chemistry and the M.S. degree in inorganic chemistry from the University of Yaoundé-I, Yaoundé, in 2010 and 2015, respectively, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Laboratory of Applied Analytical Physical Chemistry (LCPAA), Faculty of Science.

In 2016, he joined the Institute of Agricultural Research for Development (IRAD), Dschang, Cameroon, where his research focuses on the conservation and germination of maize seeds by nonthermal gliding arc plasma. He has participated in the Conference on Food Insecurity and Sustainable Development in Sub-Saharan Africa (IADDAS) in 2018 and the First International Conference on Young Scientists: Driving Innovation and Development in Africa in 2019.



**Georges Kamgang-Youbi** was born in Cameroon, in 1980. He received the M.S. degree in mineral chemistry from the University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon, in 2003. From 2005 to 2008, he prepared his thesis on the chemical and microbiological applications of gliding discharge plasmas at the University of Rouen, Rouen, France.

From 2009 to 2012, he was a Research Assistant with the Laboratory of Plasma Applications for Nuclear Waste, French Atomic Commission-CEA Marcoule, Bagnols-Sur-Cèze, France. He became an Assistant Lecturer and an Assistant Professor with the Department of Inorganic Chemistry, University of Yaoundé-I, in 2012 and 2013, respectively, where he has been an Associate Professor since 2018. He teaches general chemistry and electrical process for pollution abatement with contribution of chemical reactive species. He is a pioneer of developing process for producing and using plasma-activated water on microorganisms. He has authored or coauthored one book, around 30 peer-reviewed articles, and numerous conference contributions. His research interests include environmental problems and pollution abatement by means of Glidarc, including living and inanimate substrates.



**Serge A. Djepang** was born in Cameroon, in 1979. He received the M.S. degree in analytical chemistry and the Ph.D. degree in mineral chemistry from the University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon, in 2008 and 2014, respectively.

From 2013 to 2019, he was a Research Lecturer with the Nuclear Technology Section, Ministry of Scientific Research and Innovation. Since January 2020, he has been an Assistant Lecturer with the University Institute of Technology, University of Ngaoundéré, Ngaoundéré, Cameroon. He also works in projects relating to the regulatory sanitary control of water intended for human consumption. He has participated in several scientific projects and authored or coauthored five research articles and communication in international conferences and newspapers. His research interests include low and atmospheric pressure nonthermal plasma, especially gliding arc discharge treatment in liquids and solids surface modifications.



**Berthelot S. Tamo** was born in Cameroon, in 1986. He received the B.S. degree in chemistry and the M.S. degree in inorganic chemistry from the University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon, in 2008 and 2010, respectively, the M.S. degree in engineering sciences mining and petroleum from the University of Dschang, Dschang, Cameroon, in 2017, and the Ph.D. degree in physical and environmental chemistry from the University of Yaoundé-I in 2019.

In 2019, he was recruited at the School of Geology and Mining Engineering, University of Ngaoundéré, Ngaoundéré, Cameroon, where he is currently an Assistant Lecturer with the Department of Oil and Gas Engineering. He has authored four articles. His research interests include the activation of mineral surfaces using nonthermal atmospheric pressure plasmas, development of geopolymers, and wastewater treatment.



**Samuel Laminsi** was born in Cameroon, in 1953. He received the B.S. and M.S. degrees in physical sciences from the Higher Teacher Training College, Yaoundé, Cameroon, in 1978 and 1980, respectively, and the "Doctorate, third cycle" and Ph.D. degrees in inorganic chemistry from the University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon, in 1989 and 2005, respectively.

From 1980 to 1984, he was a Professor of physical sciences with the Obala High School, Obala, Cameroon. In 1984, he moved to the Department of Inorganic Chemistry, Faculty of Sciences, University of Yaoundé, as an Assistant Lecturer, where he was an Assistant Professor from 1991 to 2010 and an Associate Professor from 2010 to 2015 and he has been a Professor in physical and analytical chemistry since 2015. Since 2010, he has been the Director of the Physico-Chemistry of Environment and Material Group, University of Yaoundé-I. He is the author of one book, more than 60 peer-reviewed articles, and numerous conference communications. His research interests include depollution of environment (soil, water, and air), Glidarc plasma processes, and their application for surface treatment, oxide synthesis, and photocatalysts preparation.

Article

# Effect of Gliding Arc Plasma Activated Water (GAPAW) on Maize (*Zea mays* L.) Seed Germination and Growth

Jean Paul Kamseu Mogo <sup>1,2</sup>, Joseph Djeugap Fovo <sup>3,\*</sup>, Berthelot Sop-Tamo <sup>4</sup>, Hortense Noëlle Apala Mafouasson <sup>5</sup>, Marcelline Carine Ngo Ngwem <sup>1,6</sup>, Marie Jeanne Tebu <sup>1</sup>, Georges Kamgang Youbi <sup>1</sup> and Samuel Laminsi <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Inorganic Chemistry, University of Yaoundé I, Yaoundé P.O. Box 812, Cameroon

<sup>2</sup> Institute of Agricultural Research for Development, Dschang P.O. Box 44, Cameroon

<sup>3</sup> Plant Pathology and Agricultural Zoology Research Unit, Faculty of Agronomy and Agricultural Sciences, University of Dschang, Dschang P.O. Box 222, Cameroon

<sup>4</sup> School of Geology and Mining Engineering, University of Ngaoundéré, Meiganga P.O. Box 115, Cameroon

<sup>5</sup> Institute of Agricultural Research for Development, Yaoundé P.O. Box 2123, Cameroon

<sup>6</sup> National Committee for Development of Technologies, Yaoundé P.O. Box 1457, Cameroon

\* Correspondence: jdjeugapfovo@yahoo.fr (J.D.F.); samuellamins@gmail.com (S.L.)

**Abstract:** This study investigates the effect of Gliding Arc Plasma Activated Water (GAPAW) technique on maize germination and growth variables. The effect of GAPAW was evaluated on corn texture, water absorption in Lab conditions, and the pathway Scanning electron microscopy (SEM) analysis of corn seeds was also carry out. Maize seeds were sown 150 m<sup>2</sup> and then watered with tap water and with GAPAW. Seed germination, maize growth and chlorophyll content were evaluated in field conditions in a complete randomized block design with four replicates using the Acid Tolerance Population (ATP) variety. Seed texture treated with 15 min of GAPAW making it darker than those of the control (tap water). Pathway SEM analysis showed no change for the 5 min-GAPAW-treated seeds compared to the control but at 15 min-GAPAW significant changes were observed. Germination was 100% at the 15 min-GAPAW compared to the other treatments (0 and 5 min). Stem length, leaf width, collar diameter, chlorophyll content and water uptake have higher values on plants watered with 15 min-GAPAW compared to others treatments. This application could highlight the germination properties of GAPAW in crop production.

**Keywords:** germination; Gliding Arc Plasma Activated Water; growth variables; maize



**Citation:** Mogo, J.P.K.; Fovo, J.D.; Sop-lamo, B.; Mafouasson, H.N.A.; Ngwem, M.C.N.; Tebu, M.J.; Youbi, G.K.; Laminsi, S. Effect of Gliding Arc Plasma Activated Water (GAPAW) on Maize (*Zea mays* L.) Seed Germination and Growth. *Seeds* 2022, 1, 230–243. <https://doi.org/10.3390/seeds1040020>

Academic Editor: Nicola Wannicke

Received: 12 May 2022

Accepted: 26 September 2022

Published: 12 October 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

The need for enhancing microbial food safety and quality, without compromising the nutritional, functional, and sensory characteristics of foods, has created an increasing interest in innovative technologies in food industry. Plasma is an emerging, green processing technology offering many potential applications and fulfills the need of the industry [1]. Previously named as “creeping arc” or “glidarc”, plasma was mainly developed for gas treatment. This process is obtained by applying a suitable potential difference from 5 to 10 kV between at least two electrodes with continuously divergent profiles arranged symmetrically around a gas jet [2,3]. A discharge occurs at the minimum spacing; the arc feet formed is pushed towards the ends of the electrodes by a gas flow directed along the axis of the reactor. The ionized channel of the arc lengthens as it progresses, its volume increases and consequently its temperature decreases before it bursts into a hardened plume and is short-circuited by a new arc [4]. The result is a series of sliding discharges that sweep across the inter-electrode space (plume). The transfers of electrical energy into thermal energy supplied to the gas molecules are compensated by a High Voltage Generator. As the arc spreads along the electrodes, its resistance increases as well as its terminal voltage. This technique makes it possible to use high powers (several kW) [5], and thus to produce

a much larger quantity of gas and a large number of active species (hydroxyl radical  $\text{HO}^\bullet$  (most reactive), superoxide radical ion  $\text{O}_2^{\bullet-}$  (fairly reactive), ozonide ion  $\text{O}_3^{\bullet-}$  (not very reactive), hydroperoxide radical  $\text{HO}_2^\bullet$  (not very reactive), radical  $\text{HO}_3^\bullet$  (inert)) [6,7]. The effect, of species present in the plasma depend on the nature of the plasma gas. In the case of humid air, these species are therefore derived from  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ . Research work has highlighted the presence of ozone, nitrogen oxide and the radicals  $\text{NO}^\bullet$ ,  $\text{HO}^\bullet$  and  $\text{HO}_2^\bullet$  [8,9]. The glidarc humid air was successfully applied for the inactivation of microorganisms in planktonic form [10,11] or in adherent form to solids [12,13]. In Cameroon, pesticides are normally used for agriculture, including the treatment of livestock, and, to a lesser extent, in the protection of public health via the treatment of stored foodstuffs. Agriculture contributes 21.4% to the Gross National Product [14], with the regulation of pesticides assigned to the National Registration Commission of Phytosanitary Products and Certification of Sprayers, a specialized unit of the Ministry of Agriculture and Rural Development (MINADER). However, exchange between the local populations and neighboring countries facilitates the supply of unauthorized compounds [15]. Pesticide formulations may contain more than one active ingredient and are aimed mainly for protecting crops or storage of foodstuffs to limit annual losses, estimated at 10–40% [16]. In order to implement the effects of nitrogen species generated by the Gliding Arc Plasma Activated Water (GAPAW) technique on corn seed fertilization, plasma technology would offer good prospects for seed germination [17], root and shoot growth [18,19], photosynthesis, nutrients homeostasis, and floral regulation [20,21]. To the best of our knowledge, no studies on germination and fertilizing properties of Gliding Arc Plasma Activated Water on maize have been conducted so far. Therefore, we develop non-thermal plasma in agriculture in order to improve seed germination and maize growth. This paper presents preliminary work on the improvement of maize germination and growth by gliding arc plasma in temporal post discharge action mode. This gliding arc plasma treatment refers to the action of the treated water after the discharge is stopped, and the reactions continue without any further energy source [11,22]. Therefore, the current work includes surface analysis of maize seeds by SEM, physicochemical analysis (pH, conductivity, total dissolved solids,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), water uptake, measurement of growth variables (stem length, leaf width, crown diameter) and a physiological parameter as chlorophyll content of activated water sprayed samples compared to control samples.

## 2. Material and Experimental Methods

### 2.1. Location of the Study Site

The study was conducted at the Applied Physical and Analytical Chemistry Laboratory of the University of Yaoundé I for the Gliding Arc Plasma activation of water and its characterization at the Dschang branch of the Institute of Agricultural Research for Development research laboratory in terms of growth and physiological parameters of maize plants. Dschang locality is located in the West region of Cameroon, more precisely between  $5^\circ 25' - 5^\circ 30'$  North Latitude and  $10^\circ - 10^\circ 5'$  East Longitude, altitude of 1380 m. During the trial, the average temperature was around  $21^\circ\text{C}$ , and rainfall from 160 mm to 155 mm. The study was conducted in the experimental research farm of the Dschang Agricultural Research Station. Maize seeds (Acid tolerance population variety) were collected from the Institute of Agricultural Research for Development Dschang Station. This variety was chosen because of its adaptability in the agro-ecological zone of humid forest with mono-modal rainfall.

### 2.2. Glidarc Plasma Device and Treatment Procedure

The experimental apparatus used is a cylinder containing 430 mL of tap water, a glass reactor equipped with a water cooling jacket, and a magnetic stirrer (Figure 1). The sliding discharge device held by the lid has two divergent aluminum electrodes, symmetrically arranged around a wet air nozzle according to the founding father Czernichowski et al. [2]. The moist air is obtained by bubbling the air flow supplied by a compressor through a

Durand bottle filled with water. The gas flow rate is controlled by a flow meter set at  $Q = 800$  L/h. Energy is supplied by a 40 kHz, 9–10 kV HV Generator. For this purpose 430 mL of tap water was exposed to the plasma for 5 and 15 min and then 100 mL of activated water respectively was taken and brought into contact with one hundred corn seeds in a beaker. After a contact time (1 h), seeds were dried and reduced to a moisture content of 14%.

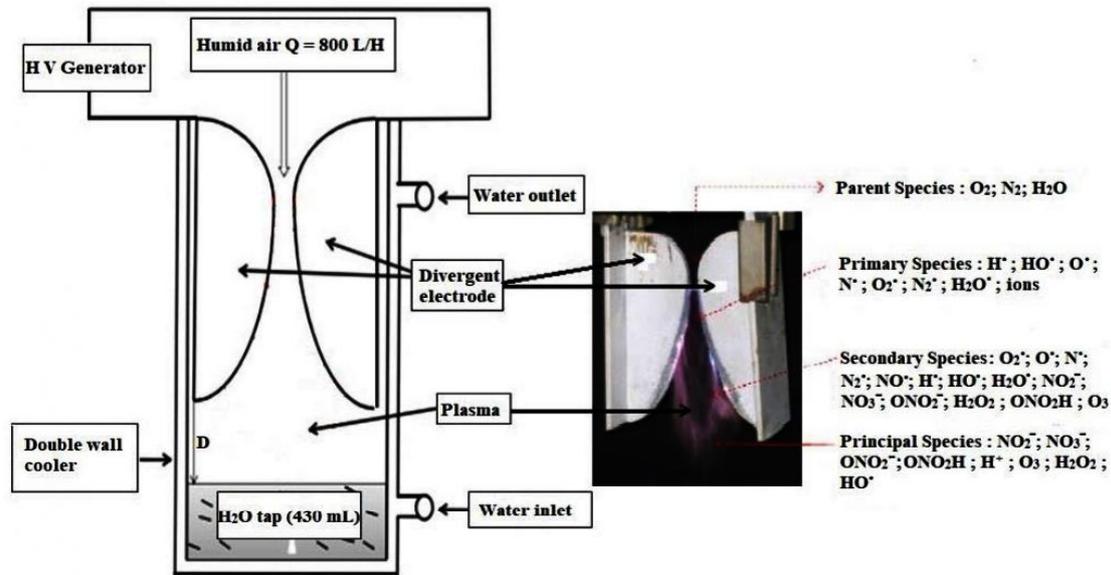


Figure 1. Experimental-processing system to have plasma activated water.

### 2.3. Physicochemical Analysis

The determination of pH, Conductivity and TDS was carried out using a HANNA HI 9811-5 pH/°C/EC/TDS multimeter with digital display.

The colorimetric method has been used for the determination of nitrates (515 nm) and hydrogen peroxide [23].

To assess possible morphological changes after contact between seeds and plasma-activated water, scanning electron microscopy (SEM) imaging was performed on three sets of seeds: seeds in contact with tap water (control); seeds in contact with plasma-activated water for 5 min; and seeds in contact with plasma-activated water for 15 min. We produced SEM images of the pericarp using a Philips FEI XL  $\gamma$ 0 FEG equipped with a field emission gun. The nonmetal-coated samples were exposed to electrons with an accelerating voltage of 3 and 5 kV.

### 2.4. Evaluation the Effect of Plasma on Water Absorption and Seed Germination

Concerning water absorption, 100 mL of plasma-treated (5 and 15 min) and untreated (0 min) tap water were placed in glass jars containing 100 maize seeds. The mixtures (seeds + water) were left at a laboratory temperature of 25 °C for forty-eight hours (Figure 2). The seeds were dried and weighed within the first and last twelve hours at six hours intervals. For this purpose, an electronic analytical balance SARTORIUS 1264MP with an accuracy of 0.1 mg was used. Amount of water absorbed was determined from the actual increase in seed weight. Water absorption (WA) was expressed by Equation (1) [18,24]:

$$WA = \frac{FW - DW}{r_{w}} \times 100\% \quad (1)$$



**Figure 2.** Maize seeds soaked in plasma-activated water for forty-eight hours.

With FW the fresh weight of samples stored in distilled water and DW the dry weight of samples.

Seed germination test was carry out in a fully randomized design with four replications according to International Seed Testing Association procedures [25]. Seeds were sown on an area of 150 m<sup>2</sup> at a rate of three seeds per pocket at a spacing of 40 cm in the line and 80 cm between the lines. During the germination period, 100 mL of activated (5, 15 min) and untreated (control) water were sprinkled every six hours on each pocket to maintain soil moisture. Three hundred seeds were sown at three replicates of one hundred seeds per treatment. After ten days, germination rate (GR) was calculated as follow (Equation (2)). The seed was considered to be germinated when the radicle protrusion was 5 cm.

$$GR = \frac{SG}{ST} \times 100\% \quad (2)$$

where SG is the number of germinated seeds and ST is the total number of seeds.

#### 2.5. Pathway Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Scanning electron microscopy (SEM) imaging was conducted on three sets of seeds: seeds in contact with tap water (control), seeds in contact with plasma activated water treated for 5 min and 15 min. We produced SEM images of pericarp using a Philips FEI XL  $\gamma$ 0 FEG brand apparatus equipped with a field emission gun. The nonmetal-coated samples were exposed to electrons with an acceleration voltage of 3 and 5 kV.

#### 2.6. Effects of Plasma on Maize Growth Variables and Chlorophyll Content

Growth variables measured were stem length, leaves width and collar diameter on seedlings receiving 800 mL of plasma activated water weekly. These variables were measured weekly after germination using a graduated ruler. Stem length was measured from the collar to the beginning of the first unfolded leaf while the width of leaves was measured in the middle of the leaf. Collar diameter was measured one month after emergence using a caliper. Chlorophyll content was taken using a chlorophyll meter SPAD-502, on three selected leaves for each plant on thirty days [26].

#### 2.7. Statistical Analysis

All these data based on the average of the four replicates using Microsoft Excel software. Analysis of variances was performed using SPSS software version 2021 at  $p < 0.05$ . In the figures, the spread of values is shown as error bars representing standard errors of the means.

### 3. Results

#### 3.1. Physicochemical Properties of Plasma Activated Water

Data from the physicochemical analyses of plasma activated water are presented in Table 1. It is shown that after a few minutes of exposure to humid air plasma (5 min), the pH of the tap water decreases from 6.4 to 3.4 and then continues to decrease to reach a value of 3.3 after 15 min of treatment. The conductivity and total dissolved solids (TDS) in tap water begin to increase after 5 min of exposure to the electrical discharge. Nitrate ions evolve gradually, increasing with exposure time and becoming more significant after 15 min of treatment. It is found that the concentration of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) in solution increases with the time of exposure to the electric discharge.

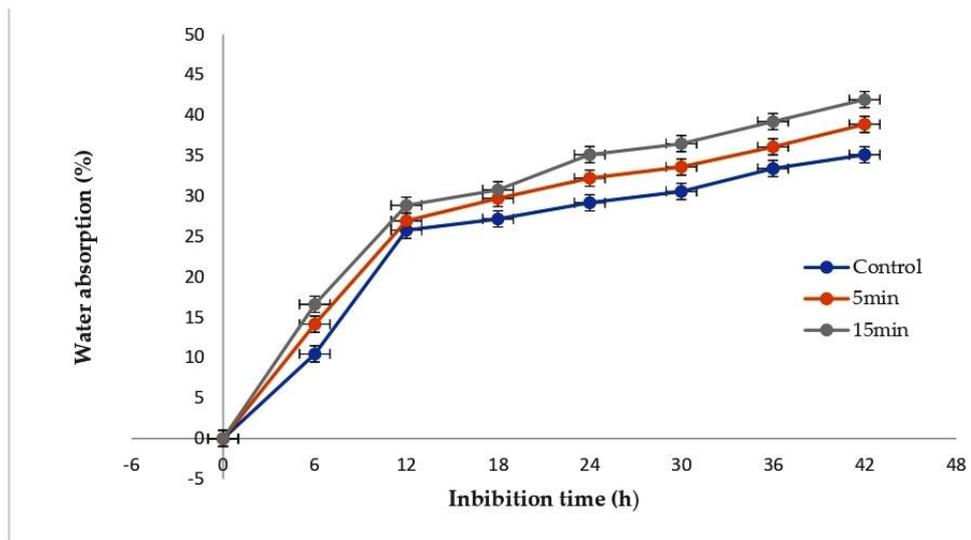
**Table 1.** Physicochemical analysis of plasma-activated tap water.

| Treatments | pH  | Conductivity ( $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) | TDS (mg/L) | $[\text{NO}_3^-]$ (mmol/L) | $[\text{H}_2\text{O}_2]$ (mmol/L) |
|------------|-----|---|------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Control    | 6.4 | 70  | 30         | 0.002                      | 0                                 |
| 5 min      | 3.4 | 190   | 90         | 0.156                      | 0.01                              |
| 15 min     | 3.3 | 230   | 110        | 0.176                      | 0.028                             |

#### 3.2. Effect of Plasma on Water Absorption, Maize Seed Color and Seed Germination

##### 3.2.1. Water Absorption

There was an increase in water absorption of GAPAW fortified corn seeds compared to untreated one (Figure 3). Water uptake indicated that seeds absorbed rapidly at the onset of imbibition (the first twelve hours), then became slowly in the final hours to reach the values of 41.96%, 38.89%, and 35.13% respectively for seeds soaked at 15, 5 and 0 min. The GAPAW-treated samples for 5 min and 15 min absorbed more water than the control samples, regardless of the imbibition time. In addition, no significant difference was recorded in the two groups of seeds treated at 5 min and 15 min, indicating that the duration of the treatment had no significant influence on water absorption.



**Figure 3.** Water absorption as a function of the imbibition time at 25 °C.

### 3.2.2. Maize Seed Color

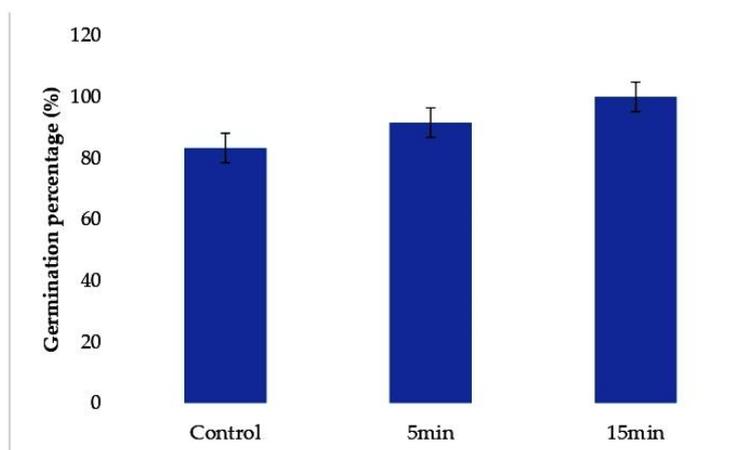
Maize seeds color did not change after 5 min of treatment, but from 15 min of treatment, change in color appears on the surface of maize seeds treated with GAPAW which became darker compared to others treatments. At that treatment time, the pulp of the kernels was darker in color (Figure 4). These photos were taken to explain the change in the in seeds color. In fact, neutral oxygen species, especially atomic oxygen, induce a minor structural change or functional inhibition of the cell membranes of seeds, which leads to the oxidation of intracellular organelles via the penetration of ROS into the cell.



**Figure 4.** Color change of GAPAW treated seeds at 0 min (A) and 15 min (B).

### 3.2.3. Seed Germination

Growth variables of untreated (0 min) and treated (5 and 15 min) seeds after ten days are shown in Figure 5. The most significant response was obtained with seeds treated for 15 min with 100% germination rate, compared to untreated seeds (83.3%). No significant difference was recorded in germination at 5 min treatment time compared to the control ( $p > 0.05$ ).



**Figure 5.** Seeds germination (%) after being treated during 5 and 15 min with GAPAW.

### 3.3. Pathway Scanning Electron Microscopy

SEM micrographs showed that the 15 min treatment significantly affected the crystal structure, molecular structure and rheological properties of maize starch (Figure 6). It seems that some debris-like contamination was noted on the seeds treated by activated water. Due to the presence of pinhole-like structures in the starch granules, the GAPAW treatment

not only modified the surface of the starch granules but also penetrated into the granules, resulting in water holes and large channels. On the other hand, the 5 min GAPAW did not cause any degradation of the maize seeds surface (Figure 7).

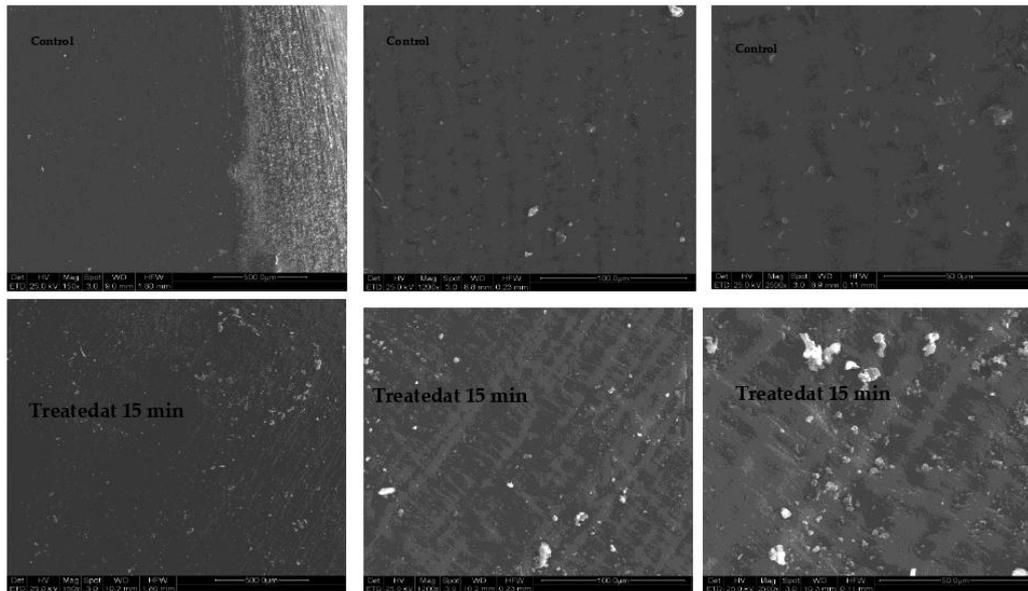


Figure 6. SEM micrographs taken for 0 and 15 min after treated with GAPAW.

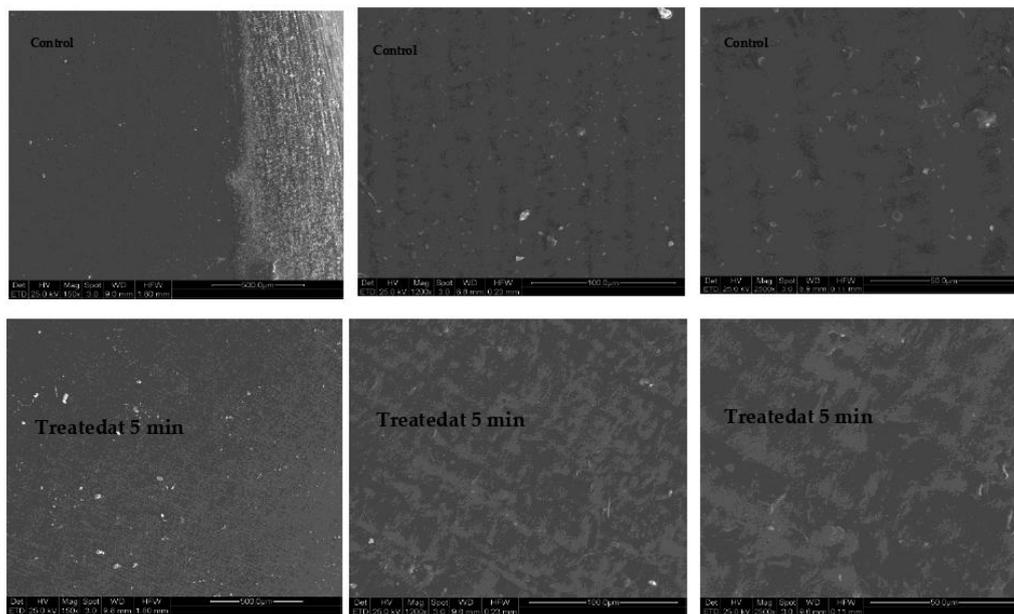


Figure 7. SEM micrographs taken for 0 and 5 min after treated with GAPAW.

### 3.4. Effect of Plasma on Maize Growth Variables and Chlorophyll Content

#### 3.4.1. Stem Length

Regarding stem length (Figure 8), the results indicated an average length of 11.58 cm for seeds not watered with GAPAW four weeks after sowing. However, the stem length increased with treatment time to reach the values of 12.84, 12.15 cm when maize plants were watered with GAPAW 15 and 5 min respectively. GAPAW treatment did not negatively affect stem length, as a slight increase was obtained, although it was not significantly different ( $p > 0.05$ ) regardless of treatment time (compared to control).

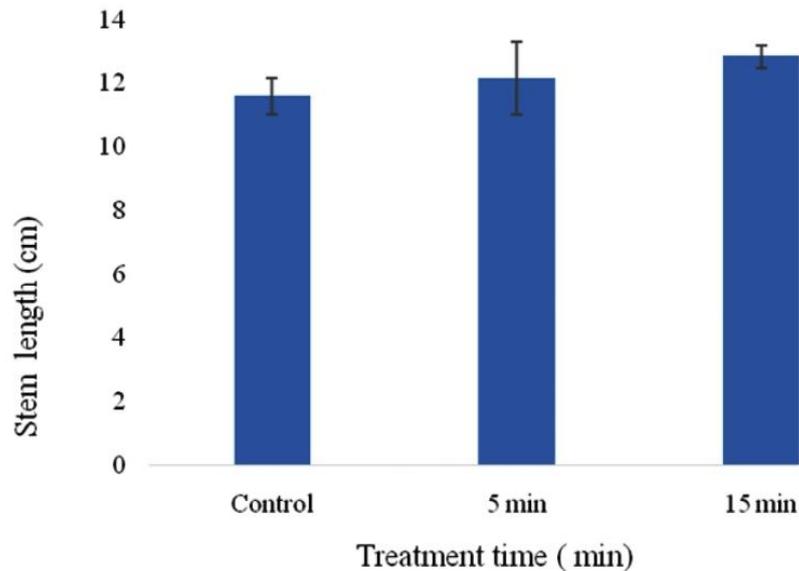


Figure 8. Stem length of one month old maize seedlings treated different time with GAPAW.

#### 3.4.2. Leaf Width and Collar Diameter

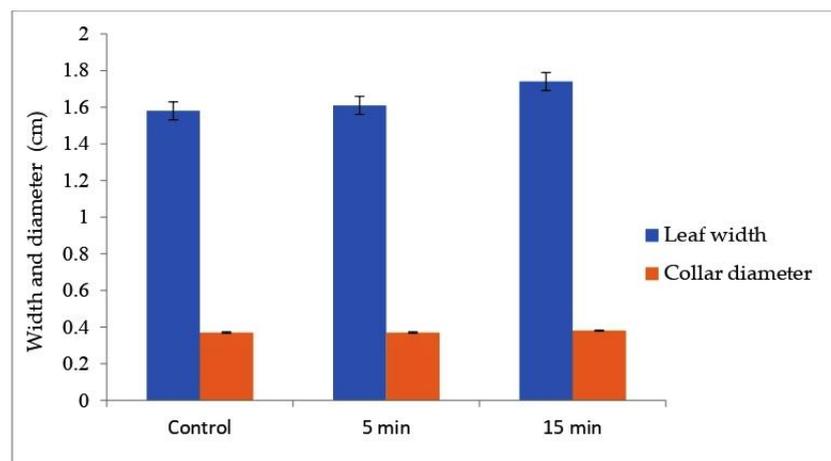
Leaf width increases thirty days after sowing (Figure 9). Values obtained were 1.58, 1.61 and 1.74 cm respectively for 0, 5 and 15 min after four weeks of watering (Figure 10). Collar diameter also varies with the GAPAW processing time. In fact, collar diameter was 0.37, 0.37 and 0.38 cm respectively for 0, 5 and 15 min.

#### 3.4.3. Chlorophyll Content

Plants watered with plasma activated water showed an increase in their chlorophyll content with treatment time, chlorophyll content were 23.91, 25.32 and 29.66 mg/g on plants treated with GAPAW at 0, 5 and 15 min respectively (Figure 11).



**Figure 9.** Maize with seeds not treated (A) and treated for 15 min (B) with activated water plasma, thirty days after sowing.



**Figure 10.** Leaf width (cm) and collar diameter (cm) at thirty days after sowing.

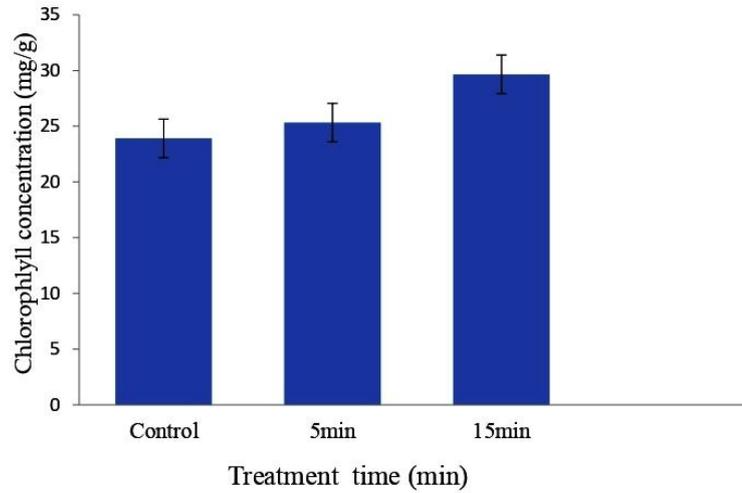
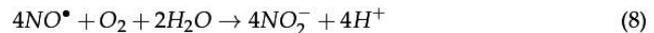
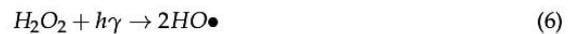


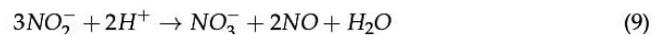
Figure 11. Chlorophyll concentration on maize plants watered for 0, 5 and 15 min during four weeks.

#### 4. Discussion

The physicochemical analyses of Plasma activated water shown that after a few minutes of exposure to humid air plasma, the pH of the tap water decreases. This result is in line with those obtained by some researchers who explained the gradual decrease in pH during plasma treatment due to the increase in treatment time, which further promotes the production of active species that diffuse into the aqueous solution [27]. Indeed, the presence of the  $\text{NO}^\bullet$  radicals in the discharge in contact with air leads to the formation of  $\text{NO}_x$  which can hydrolyze into nitrous, nitric and peroxonitric acids in solution [23]. The conductivity and total dissolved salts in tap water only begin to increase significantly after 5 min of exposure to the electrical discharge. The relative variations of these two parameters can be explained on the one hand by the change in pH. Indeed, the decrease in pH is accompanied by an increase in conductivity and total dissolved solids, as these two parameters are closely related. Furthermore, the study of the effect of ionizing radiation in the liquid phase [28], electrolysis of the discharge at liquid-gas interfaces [29] and electronic collisions with water vapor in moist gases [30] suggest the following reactions [31]:



These reactions lead to the formation of  $\bullet\text{OH}$  and  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Also the high mobility of oxonium ion  $\text{H}_3\text{O}^+$  in water contributes to the increase in conductivity due to these cations compared to other cations of similar size [32]. Table 1 shows that the release of ions and  $\text{NO}_3^-$  begins within the first few minutes of exposure of tap water to the plasma discharge. Nitrate ions evolve gradually, increasing with exposure time and becoming more significant after 15 min of treatment. This phenomenon could be explained by the oxidation of nitrite ions to nitrate ions using the following equation [33,34]:



Nitrate plays an important role in the photosynthesis process. Without nitrates, the amount of chlorophylls in leaves is reduced, which means leaves turn pale green or yellow.

Based on the values obtained at different concentrations of hydrogen peroxide in solution, it is found that the concentration of  $H_2O_2$  decreases with increasing exposure time. These results were similar to some previous work showing that the radicals formed upstream in the landfill ( $HO^\bullet$  and  $HO_2^\bullet$ ) responsible for the formation of  $H_2O_2$  would not recombine sufficiently or that these radicals would preferentially participate in other reactions [35]. Also, the high solubility of hydrogen peroxide in water would contribute kinetically to make it react spontaneously in aqueous solution as soon as it is formed in the gas phase in the landfill [31]. The GAPAW treated samples for 5 min and 15 min absorbed more water than the control samples, regardless of the imbibition time. The initial absorption of water is necessarily related to the hydrophilic of the seed surface. Previously, we have shown an increase in the hydrophilicity of the surface of kaolinitic clay after a humid air plasma treatment using the same device, due to the increase of hydroxyl groups at the surface of the material [36]. Other previous studies using the gliding arc plasma with the sample placed in the discharge area have also shown an increase in the hydrophilicity of polymeric and metallic materials [37]. These results were obtained on wheat seeds [38] and on soybeans [39]. A reduction in the contact angle, but on non-living materials was also observed using Gliding plasma [40,41].

Results on the color change of maize seeds could be explained by the plasma treatment temporal post-discharge mode changed color of the plant organs surfaces. For example, the effect of atmospheric double barrier discharge (DBD) of kiwifruit exhibited a lesser degree of darkening during storage compared to untreated samples, suggesting that the change in texture is likely due to physiological events that include enzymatic degradation of hemicelluloses [42,43]. Furthermore, it is known that RONS and UV-photons generated by NTP react with the components of the seed surface or penetrate the external layer of the seed coat, inducing significant changes in the elemental composition of the seed [44].

Germination is the beginning of the development for a new plant individual, from a seed placed in favorable conditions. There are various events associated with germination ranging from the initial absorption of water by dry seeds to the emergence of the radicle through the seed coat. Seed germination is accompanied by intensive production of oxidizing species, such as superoxide anion, hydrogen peroxide, NO, and its derivatives. Protein contents can be an indicator for faster germination [45]. Concerning the germination of maize seeds with GAPAW the result corroborates previous studies when using glidarc plasma treatment in spatial post discharge (gas transfer) mode [46]. Consistent with these authors, the plasma treatment had an influence on seed germination of 96% for maize seeds treated at 5 min, which was much higher than the 78% obtained for untreated seeds.

SEM photographs showed that the 15 min treatment significantly affected the morphology of maize starch (Figure 6). This change has been observed previously [47], using the low-pressure plasma to modify the microstructure and textural properties of brown rice. Their study revealed an etching of brown rice surface after the plasma treatment for 18 min. The shorter treatment time (5 min) and the low concentration of chemical species in solution, especially  $NO_3^-$   $H_2O_2$ , may explain this observation. This result is consistent with that obtained on maize seeds using DBD cold atmospheric plasma [48] and on another cereal seeds [49,50]. In fact, the activated species of the plasma did not cause any surface degradation, erosion or scratches for short treatment time.

The increase of stem length 30 days after sowing by GAPAW corroborates previous results [51] which show an improvement stem length of 1.33 and 1.31 times compared to the control, respectively for the treatment times of 1 and 2 min of the corn plants after four weeks of growth. In addition, similar results were obtained with the standardized lengths of radish seedlings; for 0 min 1.25; for 5 min 1.52 and 10 min 1.62 [52]. The differences between the studies may be caused by the different maize cultivars used, the different type of working gas, the nature of the instruments used, and the type of plasma discharge [19]. This suggests that stimulating effect of GAPAW increases the nitrogen concentration in the

leaves, thus promoting seedling growth. Therefore, the more a plant is rich in nitrogenous elements, the larger are the leaves.

Plants sprayed with plasma-activated water showed an increase in chlorophyll content with treatment time, probably due to the increased concentration of RONS in the water. Indeed, it was clearly established that an increase in chlorophyll content of to 1.11 mg/g compared to control for corn watered non-thermal air plasma at 1 min [51]. Moreover, the chlorophyll level increased with the activity of the water activated plasma and the increasing concentrations of RONS; compared to the control, the plants watered for 2 min showed an increase of 17% [53,54]. This suggests that the species ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  and  $\text{NO}_3^-$ ) generated by the GAPAW treatment increases the total metabolism of the plant modulates the process of photosynthesis, affects the synthesis of starch and chlorophyll [55].

## 5. Conclusions

The objective of this study was to improve seed germination and maize growth variables using Gliding Arc Plasma Activated Water. The study shows that when maize seeds are watered with GAPAW during 5 to 15 min seed germination and growth variables are improved. These results correlate well with SEM analyses, and physicochemical analyses (pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , conductivity, TDS) carry out on un-watered and watered seeds. It will be more interesting to change the nature of the plasmagenic gas and optimize the plasma treatment time in order to obtain better results.

**Author Contributions:** Conceptualization, S.L., G.K.Y. and J.P.K.M.; methodology, J.P.K.M., J.D.F., B.S.-T. and G.K.Y.; software, J.D.F.; validation, S.L. and J.D.F.; formal analysis, J.P.K.M. and H.N.A.M.; investigation, M.J.T. and M.C.N.N.; resources, M.C.N.N. and M.J.T.; data curation, B.S.-T. and J.P.K.M.; writing—original draft preparation, J.P.K.M. and B.S.-T.; writing—review and editing, J.D.F., S.L., G.K.Y. and H.N.A.M.; reading, H.N.A.M. and J.P.K.M.; supervision, S.L. and J.D.F.; project administration, J.P.K.M.; funding acquisition, J.P.K.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** Authors are grateful to Kamseu Elie for SEM photography and the Engineering Department “Enzo Ferrari” of the Università degli Studi di Modena Reggio Emilia, Italy for scientific collaboration.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Shabir, A.M.; Manzoor, A.S.; Mohammad, M.M. Understanding the role of plasma technology in food industry. *Food Bioprocess Technol.* **2016**, *9*, 734–750. [CrossRef]
2. Czernichowski, A. Gliding arc: Applications to engineering and environment control. *Pure Appl. Chem.* **1994**, *66*, 1301–1310. [CrossRef]
3. Lesueur, H.; Czernichowski, A.; Chapelle, J. Electrically assisted partial oxidation of methane. *Int. J. Hydrog. Energy* **1994**, *19*, 139–144. [CrossRef]
4. Brisset, J.L. *Décharges Electriques Glissantes à la Pression Atmosphérique et Leurs Applications à L’environnement*; Union des Professeurs de Physique et de Chimie: Paris, France, 2009; p. 103.
5. Fridman, A.A.; Petrousov, A.; Chapelle, J.; Cormier, J.M.; Czernichowski, A.; Lesueur, H.; Stevefelt, J. Modèle physique de l’arc glissant. *J. Phys. III* **1994**, *4*, 1449–1465. [CrossRef]
6. Legrini, O.; Oliveros, E.; Braun, A.M. Photochemical processes for water treatment. *Chem. Rev.* **1993**, *93*, 671–698. [CrossRef]
7. Prados, M.; Paillard, H.; Roche, P. Hydroxyl Radical Oxidation Processes for the Removal of Triazine from Natural Water. *Ozone Sci. Eng.* **1995**, *17*, 183–194. [CrossRef]
8. Clements, J.S.; Sato, M.; Davis, R.H. Preliminary investigation of pre-breakdown phenomena and chemical reactions using a pulsed high voltage discharge in water. *IEEE Trans. Ind. Appl.* **1985**, *23*, 1372–1379.
9. Burlica, R.; Kirkpatrick, M.J.; Locke, B.R. Formation of reactive species in gliding arc discharges with liquid water. *J. Electrostat.* **2006**, *64*, 35–43. [CrossRef]
10. Moreau, M.; Feuilloley, M.G.J.; Veron, W.; Meylheuc, T.; Chevalier, S.; Brisset, J.L.; Orange, N. Gliding arc discharge in the potato pathogen *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica*: Mechanism of lethal action and effect on membrane-associated molecules. *Appl. Environ. Microbiol.* **2007**, *73*, 5904–5910.

11. Kamgang-Youbi, J.; Herry, M.; Bellon-Fontaine, M.; Brisset, J.; Doubla, A.; Naïtali, M. Evidence of temporal post discharge decontamination of bacteria by gliding electric discharges: Application to Hafniaalvei. *Appl. Environ. Microbiol.* **2007**, *73*, 4791–4796. [CrossRef] [PubMed]
12. Kamgang, J.O.; Briandet, R.; Herry, J.M.; Brisset, J.L.; Naïtali, M. Destruction of planktonic, adherent and biofilm cells of Staphylococcus epidermidis using a gliding discharge in humid air. *J. Appl. Microbiol.* **2007**, *103*, 621–628. [CrossRef]
13. Dasan, B.G.; Onal-Ulusoy, B.; Pawlat, J.; Diatczyk, J.; Sen, Y.; Mutlu, M. A New and Simple Approach for Decontamination of Food Contact Surfaces with Gliding Arc Discharge Atmospheric Non-Thermal Plasma. *Food Bioprocess Technol.* **2016**, *10*, 650–661. [CrossRef]
14. INS. Quatrième Enquête Camerounaise Auprès des Ménages-Présentation des Bases de Données. Institut National de la Statistique, Yaoundé (Cameroun). [Cameroon Fourth Household Survey. National Institute of Statistic]. 2014. Available online: <http://www.statistics-cameroon.org/ins/publications.htm> (accessed on 10 September 2022).
15. Sonchieu, J. Selling pesticides in Ngaoundere, Cameroon. *Crop Prot.* **2006**, *48*, 180–181.
16. Shaaya, E.; Kostjukovski, M.; Eilberg, J.; Sukprakarn, C. Plant oils as fumigants and contact pesticides for the control of stored-product insects. *J. Stored Prod. Res.* **1997**, *33*, 7–15. [CrossRef]
17. Randeniya, L.K.; de-Groot, G.J.J.B. Non-thermal plasma treatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2015**, *12*, 608–623. [CrossRef]
18. Dobrin, D.; Magureanu, M.; Mandache, N.B.; Ionita, M.D. The effects of non-thermal plasma treatment on wheat germination. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2015**, *29*, 255–260. [CrossRef]
19. Ling, L.; Jiangang, L.; Minchong, S.; Chunlei, Z.; Yuanhua, D. Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 13033. [CrossRef] [PubMed]
20. Sera, B.; Sery, M.; Gavril, B. Seed germination and early growth responses to seed pre-treatment by non-thermal plasma in hemp cultivars (*Cannabis sativa* L.). *Plasma Chem. Plasma Process.* **2017**, *37*, 207–221. [CrossRef]
21. Šerá, B.; Vanková, R.; Roháček, K.; Šerý, M. Gliding Arc Plasma Treatment of Maize (*Zea mays* L.) Grains Promotes Seed Germination and Early Growth, Affecting Hormone Pools, but Not Significantly Photosynthetic Parameters. *Agronomy* **2021**, *11*, 2066. [CrossRef]
22. Kolbert, Z.; Feigl, G.; Freschi, L.; Poór, P. Gasotransmitters inaction: Nitric oxide-ethylene crosstalk during plant growth and abiotic stress responses. *Antioxidants* **2019**, *8*, 167. [CrossRef]
23. Khan, M.N.; Alamri, S.; Al-Amri, A.A.; Alsubaie, Q.D.; Al-Munqedi, B.; Ali, H.M.; Siddiqui, M.H. Effect of nitric oxide on seed germination and seedling development of tomato under chromium toxicity. *J. Plant Growth Regul.* **2021**, *40*, 2358–2370. [CrossRef]
24. Brisset, J.-L.; Moussa, D.; Doubla, A.; Hnatiuc, E.; Hnatiuc, B.; Youbi, G.K.; Herry, J.-M.; Naïtali, M.; Bellon-Fontaine, M.-N. Chemical Reactivity of Discharges and Temporal Post-Discharges in Plasma Treatment of Aqueous Media: Examples of Gliding Discharge Treated Solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2008**, *47*, 5761–5781. [CrossRef]
25. Hoang, L.V. Comparaison des Rendements Synergétiques de Dégradation de Trois Composés Organiques par Plusieurs Pro-cédés D’oxydations Avancées en Milieu Aqueux. PhD Thesis, Poitiers University, Poitiers, France, 2009; p. 57.
26. Molina, R.; López-Santos, C.; Gómez-Ramírez, A.; Vilchez, A.; Espinós, J.P.; González-Elipe, A.R. Influence of irrigation conditions in the germination of plasma treated Nasturtium seeds. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 1–11. [CrossRef]
27. International Seed Testing Association (ISTA). Seed Sci. Tech. 2001, 29, 1–127. Available online: <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing-1168.html> (accessed on 10 September 2022).
28. Sarinont, T.; Amano, T.; Koga, K. Effects of atmospheric air plasma irradiation to seeds of radish sprouts on chlorophyll and carotenoids concentrations in their leaves. *MRS Online Proc. Libr.* **2014**, *1723*, 34–38. [CrossRef]
29. Benstaali, B.; Moussa, D.; Addou, A.; Brisset, J.-L. Plasma treatment of aqueous solutes: Some chemical properties of a gliding arc in humid air. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **1998**, *4*, 171–179. [CrossRef]
30. Buxton, G.V. Radiation chemistry of the liquid state (1) water and homogeneous aqueous solutions. In *Radiation Chemistry, Principles and Applications*; Farhataziz, A., Rodgers, M.A.J., Eds.; VCH: Weinheim, Germany, 1987; pp. 321–376.
31. Hickling, A. Electrochemical processes in glow discharge at the gas-solution interface. In *Modern Aspects of Electrochemistry*; O’Bockris, J.M., Conway, B.E., Eds.; Plenum Press: New York, NY, USA, 1971; pp. 329–373.
32. Dolan, T. Electron and ion collisions with water-vapor. *J. Phys.* **1993**, *26*, 4–8.
33. Brisset, J.L.; Hnatiuc, E. Peroxynitrite are-examination of the chemical properties of non-thermal discharges burning in air over aqueous solutions. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2012**, *32*, 655–674. [CrossRef]
34. Kornyshev, A.A.; Kuznetsov, A.M.; Spohr, E.; Ulstrup, J. Kinetics of Proton Transport in Water. *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 3351–3366. [CrossRef]
35. Brisset, J.L.; Benstaali, B.; Moussa, D.; Fanmoe, J.; Njoyim-Tamungang, E. Acidity control of plasma chemical oxidation: Application to dye removal, urban wastes abatement and microbial inactivation. *Plasma Source Sci. Technol.* **2011**, *20*, 034021. [CrossRef]
36. Kamgang, G. Propriétés Réactives en Post-Décharge Temporelle des Décharges Electriques Glissantes dans l’air Humide: Application à la Dégradation de Colorant Azoïque et à la Décontamination Microbienne. [Reactive Properties in Temporal after Discharge of Sliding Electric Discharges in Humid Area: Application to azo dye Degradation and Microbial Decontamination]. Ph.D. Thesis. Université de Rouen et de Yaoundé I. Rouen. France. 2008.

37. Tamo, B.S.; Kamgang-Youbi, G.; Acayanka, E.; Simo, L.M.; Tiya-Djowe, A.; Kuete-Saa, D.; Laminsi, S.; Tchadje, L. Plasma chemical functionalization of a Cameroonian kaolinite clay for a greater hydrophilicity. *Plasma Chem. Plasma Process.* **2016**, *36*, 1449–1469. [[CrossRef](#)]
38. Kamgang, J.O.; Naitali, M.; Herry, J.M.; Bellon-Fontaine, M.N.; Brisset, J.L.; Briandet, R. Increase in the hydrophilicity and Lewis acid base properties of solid surfaces achieved by electric gliding discharge in humid air: Effects on bacterial ad-herence. *Plasma Sci. Technol.* **2009**, *11*, 187. [[CrossRef](#)]
39. Velichko, I.; Gordeev, I.; Shelemin, A.; Nikitin, D.; Brinar, J.; Pleskunov, P.; Choukourov, A.; Pazderů, K.; Pulkrábek, J. Plasma Jet and Dielectric Barrier Discharge Treatment of Wheat Seeds. *Plasma Chem. Plasma Process* **2019**, *39*, 913–928. [[CrossRef](#)]
40. Faubert, F.; Wartel, M.; Pellerin, N.; Cochet, V.; Regnier, E.; Hnatiuc, B. Treatment by gliding arc of epoxy resin: Preliminary analysis of surface modifications. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII*; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2016; Volume 10010, pp. 884–894. [[CrossRef](#)]
41. Varoquaux, P.; Wiley, R.C. Biological and biochemical changes in minimally processed refrigerated fruits and vegetables. In *Minimally Processed Refrigerated Fruits & Vegetables*; Springer: Boston, MA, USA, 1994; pp. 226–268.
42. Rocculi, P.; Romani, S.; Dalla Rosa, M. Effect of MAP with argon and nitrous oxide on quality maintenance of minimally processed kiwifruit. *Postharvest Biol. Technol.* **2005**, *35*, 319–328. [[CrossRef](#)]
43. Ramazzina, I.; Berardinelli, A.; Rizzi, F.; Tappi, S.; Ragni, L.; Sacchetti, G.; Rocculi, P. Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwifruit. *Postharvest Biol. Technol.* **2015**, *107*, 55–65. [[CrossRef](#)]
44. Mildaziene, V.; Ivankov, A.; Sera, B.; Baniulis, D. Biochemical and Physiological Plant Processes Affected by Seed Treatment with Non-Thermal Plasma. *Plants* **2022**, *11*, 856. [[CrossRef](#)]
45. Henselová, M.; Slováková, L.; Martinka, M.; Zahoranová, A. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma. *Biologia* **2012**, *67*, 490–497. [[CrossRef](#)]
46. Kamseu Mogo, J.-P.; Kamgang Youbi, G.; Djepang, S.A.; Tamo, B.S.; Laminsi, S. Treatment of Maize Seeds (*Zea mays* L.) by Nonthermal Plasma Generated by Gliding Electric Discharge for Application in Agriculture. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **2021**, *49*, 2318–2328. [[CrossRef](#)]
47. Chen, H.H.; Chen, Y.K.; Chang, H.C. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice. *Food Chem.* **2012**, *135*, 74–79. [[CrossRef](#)]
48. Zahoranová, A.; Hoppanová, L.; Šimončicová, J.; Tučeková, Z.; Medvecká, V.; Hudecová, D.; Kaliňáková, B.; Kováčik, D.; Černák, M. Effect of cold atmospheric pressure plasma on maize seeds: Enhancement of seedlings growth and surface microorganisms inactivation. *Plasma Chem. Plasma Process* **2018**, *38*, 969–988. [[CrossRef](#)]
49. Šerá, B.; Špatenka, P.; Šerý, M.; Vrchotová, N.; Hrušková, I. Influence of plasma treatment on wheat and oat germination and early growth. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **2010**, *38*, 2963–2968. [[CrossRef](#)]
50. Starich, P.; GrobelnikMlakar, S.; Junkar, I. Response of Two Different Wheat Varieties to Glow and Afterglow Oxygen Plasma. *Plants* **2021**, *10*, 1728. [[CrossRef](#)]
51. Ndiffo-Yemeli, G.B.; Švubová, R.; Kostolani, D.; Kyzek, S.; Machala, Z. The effect of water activated by non-thermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley. *Plasma Process. Polym.* **2020**, *18*, 2000205. [[CrossRef](#)]
52. Thapanut, S.; Ryu, K.; Yosuke, W.; Kazunori, K.; Masaharu, S. Plant growth enhancement of seeds immersed in plasma activated water. *Mater. Res. Soc.* **2017**, *2*, 995–1000. [[CrossRef](#)]
53. Kučerová, K.; Henselová, M.; Slováková, L.; Hensel, K. Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity. *Plasma Process Polym.* **2019**, *16*, 1800131. [[CrossRef](#)]
54. Ramalho, J.C.; Marques, N.C.; Semedo, J.N.; Matos, M.C.; Quartin, V.L. Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality. *Plant Biol.* **2002**, *4*, 112–120. [[CrossRef](#)]
55. Danilejko, Y.K.; Belov, S.V.; Egorov, A.B.; Lukanin, V.I.; Sidorov, V.A.; Apasheva, L.M.; Gudkov, S.V. Increase of Productivity and Neutralization of Pathological Processes in Plants of Grain and Fruit Crops with the Help of Aqueous Solutions Activated by Plasma of High-Frequency Glow Discharge. *Plants* **2021**, *10*, 2161. [[CrossRef](#)]