



République du Bénin



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

\*\*\*\*\*

Université Nationale des Sciences Techniques, Ingénierie et  
Mathématique (UNSTIM)

\*\*\*\*\*

Institut National Supérieur de Technologie Industrielle (INSTI)- Lokossa

\*\*\*\*\*

Département de Génie Energétique (GE)

\*\*\*\*\*

RAPPORT DES TRAVAUX DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
LICENCE PROFESSIONNELLE

**THEME :**

Expérimentation d'un module de production  
d'électricité verte via la technologie des piles  
végétales

Rédigé et soutenu par : AGOLIGAN T. Bénicel C

Sous la supervision de :

Dr Clotilde T. GUIDI

Dr BOTHON F. Diane

Dr CHEGNIMONHAN Victorin

**Année Universitaire : 2019-2020**

***16<sup>ème</sup> Promotion***

## **DEDICACES**

**2**

Je dédie ce travail :

A ma très chère et tendre famille, elle qui m'a inculqué une éducation et un sens du travail honorable de par son amour et son soutien indéfectible.

Particulièrement à mon cher père AGOLIGAN T. Célestin, mon inséparable ami et accompagnateur de tous les jours, pour le gout à l'effort qu'il a suscité en moi par sa rigueur et son sens du travail bien fait.

Et à toi ma tendre et adorer mère HOUNSOU Béatrice Grace, j'espère de tout cœur que ce travail représente la meilleure marque de reconnaissance que je puisse t'adresser pour ton amour éternel, tes conseils et tes prières quotidiennes.

## REMERCIEMENTS

L’aboutissement de ce travail est avant tout l’œuvre du Seigneur Dieu tout puissant, que je remercie du fond du cœur pour m’avoir comblé de sa grâce, de sa bénédiction et surtout de sa protection divine.

*Comme l’a su bien dire Hans Christian Anderson, « La reconnaissance est la mémoire du cœur.» C’est pourquoi, je tiens à remercier très particulièrement,*

- Monsieur le Directeur Alain ADOMOU, Maître de conférences des Universités (CAMES) pour sa bienveillance ;
- Madame la Directrice Adjointe Mme Clotilde GUIDI, Maître de Conférences, Enseignante-Chercheur et mon maître de mémoire pour son attention, sa participation et sa supervision dans ce travail ;
- Monsieur Armand DJOSSOU, Maitre-Assistant pour ses conseils;
- Madame Fifa T. Diane BOTHON, Maitre de Conférences des Universités (CAMES), pour son implication, ses apports, et sa participation active dans la réalisation de ce projet malgré ses occupations personnelles ;
- Monsieur Victorin CHEGNIMONHAN, Chargé des Recherches, Enseignant-Chercheur, pour sa disponibilité et son implication dans ce travail ;
- L’ensemble du personnel de l’Institut National Supérieur de Technologie Industrielle (INSTI), en général et particulièrement au corps enseignant, pour leurs accompagnements et soutiens permanents dans le cadre de ma formation ;
- Tous mes camarades de promotion, de qui j’ai appris tout le long de mon cursus les valeurs de l’amitié, du partage et de l’entraide ;
- Les membres du jury, qui ont accepté, malgré leurs nombreuses préoccupations, de prendre le temps et la responsabilité de présider cette soutenance.

# SOMMAIRE

DEDICACES .....	2
REMERCIEMENTS .....	3
SOMMAIRE.....	4
LISTE DES FIGURES.....	6
LISTE DES PHOTOS.....	6
LISTE DES TABLEAUX .....	9
LISTE DES GRAPHES .....	10
CAHIER DE CHARGE .....	11
RESUME .....	12
ABSTRACT .....	13
INTRODUCTION .....	14
CHAPITRE 1 :.....	15
I. PRESENTATION DE L'INSTITUT NATIONAL SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE INDUSTRIELLE DE LOKOSSA (INSTI-LOKOSSA) ....	16
1. Situation géographique.....	16
2. Historique .....	17
3. Organisation structurelle .....	18
4. Mission .....	19
5. Formation .....	19
II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL.....	20
1. Lieu de déroulement du stage.....	20
2. Présentation des sections parcourues .....	21
CHAPITRE 2 : .....	23
TRAVAUX EFFECTUES AU COURS DU STAGE.....	24
1. Travaux effectués dans la section du froid et de la climatisation .....	24
2. Travaux effectués dans la section de la maintenance industrielle .....	28

3. Tache annexe .....	32
CHAPITRE 3 : .....	33
PRESENTATION DU PROJET DE FIN D'ETUDE .....	34
I. CARACTERISATION D'UNE PILE VEGETALE .....	34
1. Historique .....	34
2. Principe de fonctionnement.....	36
3. Bilan de la transformation du glucose moléculaire en énergie électrique.	36
II. PRESENTATION DU MODULE DE PILE A REALISER ET EXPERIMENTER .....	36
1. Schématisation et description .....	37
2. Les matériels utilisés et leurs rôles .....	38
III. REALISATION ET EXPERIMENTATION DU MODULE DE PILE VEGETALE .....	47
1. Description des taches effectuées .....	48
2. Expérimentation du module de pile végétale réalisé.....	52
3. Mise en commun des résultats obtenus et Caractérisation du fonctionnement des piles végétales .....	63
4. Observations .....	65
IV. AVANTAGES ET INCONVENIENTS .....	66
1. Avantages .....	66
2. Inconvénient .....	67
V. PERSPECTIVES D'AMELIORATIONS ET D'EXPLOITATION POSSIBLES.....	67
1. Perspectives d'améliorations .....	67
2. Perspectives d'utilisations possibles.....	72
CONCLUSION .....	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	75

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : Plan de la situation géographique de L'INSTI .....	17
Figure 2: Organigramme de l'administration de l'INSTI-Lokossa .....	19
Figure 3 : Représentation d'une pile végétale à combustible microbienne .....	35
Figure 4 : Configuration adoptée pour la pile végétale réalisée .....	37

## LISTE DES PHOTOS

---

Photo 1: Vue de l'entrée principale de l'INSTI .....	16
Photo 2 : Unité intérieure d'un climatiseur de la salle d'informatique de l'INSTI .....	24
Photo 3 : Unité extérieure d'un climatiseur de la salle d'informatique de l'INSTI .....	25
Photo 4 : Unité extérieure d'un climatiseur situé à l'arrière du bâtiment administratif .....	26
Photo 5 : Unité extérieure du climatiseur de la bibliothèque de l'INSTI.....	26
Photo 6 : Unité extérieure du climatiseur de la salle des professeurs .....	27
Photo 7 : Unité intérieure du climatiseur de la salle des professeurs.....	27
Photo 8 : Manifolds ayant servi à la charge du climatiseur .....	28
Photo 9 : Pompe à vide.....	28
Photo 10 : Armoire électrique du Laboratoire de Génie mécanique et – Energétique .....	29
Photo 11 : Armoire électrique de la salle des professeurs .....	30
Photo 12 : nouveau disjoncteur installé .....	30
Photo 13 : Armoire électrique de la bibliothèque de l'INSTI.....	31
Photo 14 : Armoire électrique de l'atelier de mécanique .....	31
Photo 15 : Dispositif de lavage des mains réalisé à l'atelier de mécanique .....	32
Photo 16 : Tige de graphite récupérer dans les piles rondes (Elle mesure 5 cm de long pour 1.3 cm de large).....	39
Photo 17 : Anode en graphite utilisée .....	40
Photo 18 : Cathode en graphite utilisé .....	41
Photo 19 : Engrais organique SuperGro dans un bidon de 1.5L.....	42
Photo 20 : Plante de citronnelle dans le pot de culture.....	44
Photo 21 : Fil conducteurs en cuivre de petite section .....	45
Photo 22 : LED de 1 Volt (V) devant servir de témoin .....	46
Photo 23 : Multimètre à utiliser pour la mesure des tensions .....	46
Photo 24 : Modules de piles végétales à combustible microbienne réalisés .....	47
Photo 25 : Electrodes introduites dans le pot de culture.....	50
Photo 26 : Incision de 6 cm et 7 cm réalisée dans le pot de culture.....	50
Photo 27 : Connexions électriques réalisées entre les électrodes grâce aux fils conducteurs .....	51
Photo 28 : Module de pile végétale réalisé avec la citronnelle .....	51
Photo 29 : Module de pile végétale réalisé avec l'Aloe Vera.....	51
Photo 30 : Tension maximale mesurée aux bornes du Pot de plante de Citronnelle .....	61

Photo 31 : Essai d'allumage de la LED sur le module de pile végétale avec la plante de Citronnelle .....	62
Photo 32 : Essai d'allumage de la LED sur le module de pile végétale avec la plante d'Aloe Vera .....	63

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Mesure de la tension aux bornes du pot de Citronnelle sur sept (07) Jours en 24 H.....	53
Tableau 2 : Relevé des tensions maximales journalières enregistrer sur les sept (07) jours d'essai sur le pot de citronnelle .....	54
Tableau 3 : Mesure de la tension aux bornes du pot d'Aloe Vera sur sept (07) Jours en 24 H.....	56
Tableau 4 : Relevé des tensions maximales journalières enregistrer sur les sept (07) jours d'essai sur le pot d'Aloe Vera .....	58

## LISTE DES GRAPHES

Graphe 1 : Evolution approximative de la tension produite durant 24 H par le pot de citronnelle .....	54
Graphe 2 : Evolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot de citronnelle.....	55
Graphe 3 : Evolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot d'Aloe Vera.....	57
Graphe 4 : Evolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot d'Aloe Vera.....	58

# CAHIER DE CHARGE

- **Objectif du travail de fin d'études**

Le principal objectif de ce travail de fin d'étude est de contribuer au développement des énergies renouvelables au Bénin, par la valorisation des énergies vertes et saines via la technologie des piles végétales.

- **Contraintes et moyens mis à disposition**

Les différents moyens qui ont été mis à notre disposition pour l'élaboration de ce travail sont notamment : les revues bibliographiques obtenues sur internet, les rapports de travail antérieurs sur le thème, les tutoriels ainsi que des vidéos d'amateurs et de professionnels obtenues sur YouTube.

La contrainte majeure enregistrée se situe au niveau de la réalisation et de l'expérimentation effective du projet, eu égard aux difficultés d'accès à certains éléments, notamment la membrane échangeuse de protons qui joue un rôle capital dans la réalisation, les électrodes de travail et des différentes contraintes liées à la crise du Covid19, qui ont freinés un tant soit peu la bonne marche du projet.

- **Thème du travail de fin d'étude**

Les énergies renouvelables connaissent de nos jours un essor de plus en plus remarquable et une grande valorisation d'un point de vue environnementale et énergétique. Notre thème de fin d'étude intitulé : «**Expérimentation d'un module de production d'électricité verte via la technologie des piles végétales**», s'insère dans le cadre de la valorisation du potentiel énergétique des piles végétales. Globalement, elle consiste à produire et à récupérer de l'énergie électrique grâce à la photosynthèse des plantes.

## RESUME

12

Dans le cadre de l'obtention du diplôme de licence professionnel pour le compte de l'année académique 2019-2020, dans le département du Génie Energétique, le présent document rédiger à cet effet rends compte des connaissances théoriques et pratiques acquises au cours de cette formation, via le compte rendu de la période de stage effectuée au sein de Institut National Supérieur de Technologie Industrielle (INSTI)- Lokossa, et de la présentation du travail de fin d'études effectuer sur le thème : «*Expérimentation d'un module de production d'électricité verte via la technologie des piles végétales*». Le principal but de ce thème est de contribuer au développement des énergies renouvelables au Bénin via la technologie des piles végétales. En effet, le principe est très simple : Elle tire avantage des 70% de matière organique produite par photosynthèse que la plante n'utilise pas et qui sont excrétés par ses racines pour produire de l'énergie électrique grâce à l'action des microorganismes et bactéries du sol suivant un procédé électrochimique n'ayant aucun impact sur la croissance de la plante, ni sur l'environnement, encore moins sur le sol. Notre travail consiste à étudier le potentiel énergétique des piles végétales à travers la réalisation et l'expérimentation d'un module de pile végétale, afin de déterminer l'ensemble des facteurs qui participent à l'accroissement du potentiel énergétique de cette dernière. Il s'agit-là d'une technologie encore expérimentale, mais tout à faire novatrice, car, si l'utilisation des plantes pour en extraire de l'énergie n'est pas une idée nouvelle, c'est la toute première fois que l'on y parvient sans porter préjudice à leur environnement et en maintenant l'intégrité vitale de l'écosystème.

D'où il nous faut penser à diverses perspectives de valorisation et d'amélioration de ces piles végétales en vue d'une meilleure adaptation à notre habitat naturel pour une synergie parfaite entre : Plante- Energie-Environnement.

## ABSTRACT

In the context of obtaining a professional degree for the academic year 2019-2020, in the Department Energy Engineering, this document, which is written for this purpose, reflects the theoretical and practical knowledge acquired from the courses of this training, via the report of the internship period carried out at the National Higher Institute of Industrial Technology (INSTI)- Lokossa , and the presentation of the end-of-study work on the theme: "Developing a module for the production of green electricity" The main aim of this theme is to contribute to the development of renewable energies in Benin through microbial fuel cell technology. Indeed, the principle is very simple: It takes advantage of the 70% organic matter produced by photosynthesis that the plant does not use and which are excreted by its roots to produce electrical energy through the action of microorganisms and soil bacteria following an electrochemical process that has no impact on the growth of the plant, nor on the environment, much less on the soil. Our work is to study the energy potential of plant batteries through the realization and experimentation of a plant battery module, in order to determine all the factors that contribute to the increase in the energy potential of the plant. This is still experimental but quite innovative because, while the use of plants to extract energy is not a new idea, it is the first time that it has been achieved without harming their environment and maintaining the vital integrity of the ecosystem.

Hence we will have to think of various prospects for the upgrading and improvement of these plant batteries in order to better adapt to our natural habitat for a perfect synergy between: Plant-Energy-Environment.

## INTRODUCTION

Le réchauffement climatique et la pollution environnementale sont des phénomènes anthropiques dont les empreintes sont de plus en plus visibles et marquées sur le fonctionnement de notre écosystème. C'est dans ce sens qu'une réorientation vers les énergies renouvelables a été effectuée en réponse à un début de raréfaction du pétrole, puis principalement aux impacts climatiques et sanitaires négatifs des énergies carbonées non renouvelables. Dans ce contexte de crise énergétique et environnementale, les dernières décennies ont vu émerger un foisonnement de technologies nouvelles visant à réduire les impacts environnementaux et à exploiter les multiples sources d'énergies renouvelables disponibles dans notre écosystème.

C'est ainsi que l'une des stratégies envisageables dans le cadre des énergies alternatives prometteuses, à laquelle nous avons pensé pour contribuer au développement des énergies renouvelables dans notre pays est : « **La Pile végétale à combustible microbienne** ». Ainsi, le thème de notre travail de fin d'études intitulé : « **Expérimentation d'un module de production d'électricité verte via la technologie des piles végétales** », valorise le potentiel énergétique qu'offre cette technologie d'énergie verte très prometteuse.

Le présent rapport s'articule autour de trois (3) points essentiels à savoir : La présentation des structures de formation et d'accueil ; Le déroulement du stage et pour finir La présentation du projet de fin d'étude intitulé : « **Expérimentation d'un module de production d'électricité verte via la technologie des piles végétales** ».

## **CHAPITRE 1 :**

**PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE DE FORMATION ET  
DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL  
(INSTI-LOKOSSA)**

## I. PRÉSENTATION DE L'INSTITUT NATIONAL SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE INDUSTRIELLE DE LOKOSSA (INSTI-LOKOSSA)



Photo 1: Vue de l'entrée principale de l'INSTI

### 1. Situation géographique

L'Institut National Supérieur de Technologie Industrielle de Lokossa (INSTI-Lokossa) est situé au Bénin, dans le département du Mono précisément dans la ville de Lokossa. Il est situé au quartier Agnivêdji, à 2,6 kilomètres du parking principal de la ville. Il cohabite depuis février 2011 avec l'École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET). Il est, relié au centre-ville par une voie bitumée comme l'indique le plan de situation de la figure 1:

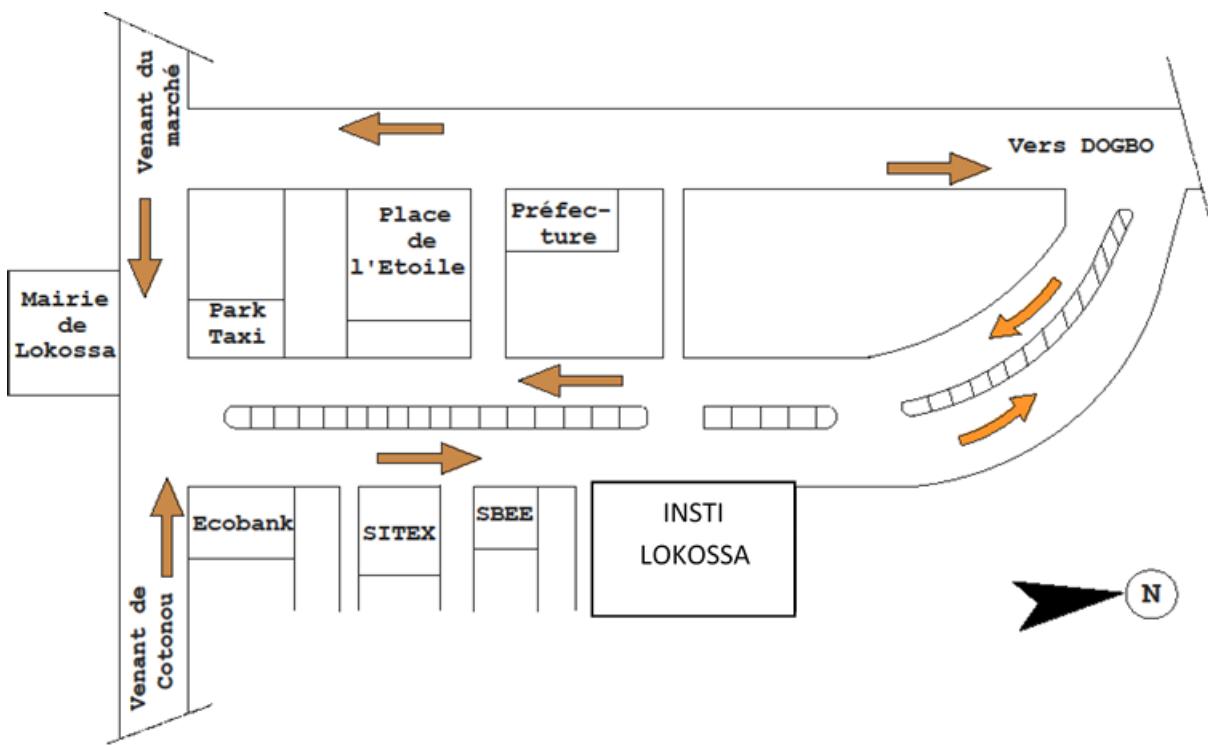


Figure 1 : Plan de la situation géographique de L'INSTI

## 2. Historique

Créé le 05 novembre 2001 par l'arrêté ministériel du décret N°2001-365 du 18 Septembre 2001, l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Lokossa fut un établissement d'enseignement supérieur de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC). Actuellement, l'INSTI-Lokossa (ex IUT-Lokossa) est un centre universitaire sous la tutelle de l'Université National des Sciences, Technologies, Ingénieries et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey.

L'institut était dirigé à sa création par une administration ayant à sa tête Monsieur Ézéchiel ALLOBA, Docteur Ingénieur en Génie Civil, spécialiste en routes, Maître Assistant des Universités. Aidé dans ses fonctions par ses Adjoints : Monsieur Alain ADOMOU, Docteur en physique, Maître de conférences/CAMES, Monsieur Emmanuel K. WOUYA, Docteur, Ingénieur en Résistance des Matériaux, Maître Assistant des Universités.

Puis, à la rentrée universitaire 2009-2010, la nouvelle administration avait à sa tête Monsieur Aliou Djibril MOUSSA, Docteur en mathématiques et maître assistant des universités avec pour adjoint Monsieur Léandre M. VISSOH, Docteur en Mécanique Générale et Maître assistant des universités. Monsieur Aristide HOUNGAN, Docteur en Énergétique et Environnement, Maître conférence des Universités a rejoint l'équipe en tête de l'administration en substituant le Docteur Léandre VISSOH avec toujours le Docteur Aliou Djibril MOUSSA à la tête de la direction au cours de l'année académique 2012-2013.

En 2016, le Docteur Alain ADOMOU prend les commandes de la direction à la suite d'une nouvelle élection avec comme adjointe Mme Clotilde GUIDI, Docteur en énergétique, Maître de Conférences/CAMES. Ils sont assistés dans leurs lourdes tâches quotidiennement pas des chefs départements, un comptable, des secrétaires et un personnel dynamique qui œuvre pour l'émergence dudit Institut.

### 3. Organisation structurelle

L'Institut National Supérieur de Technologie Industrielle de Lokossa dispose d'une administration bien organisée suivant la figure 2 :

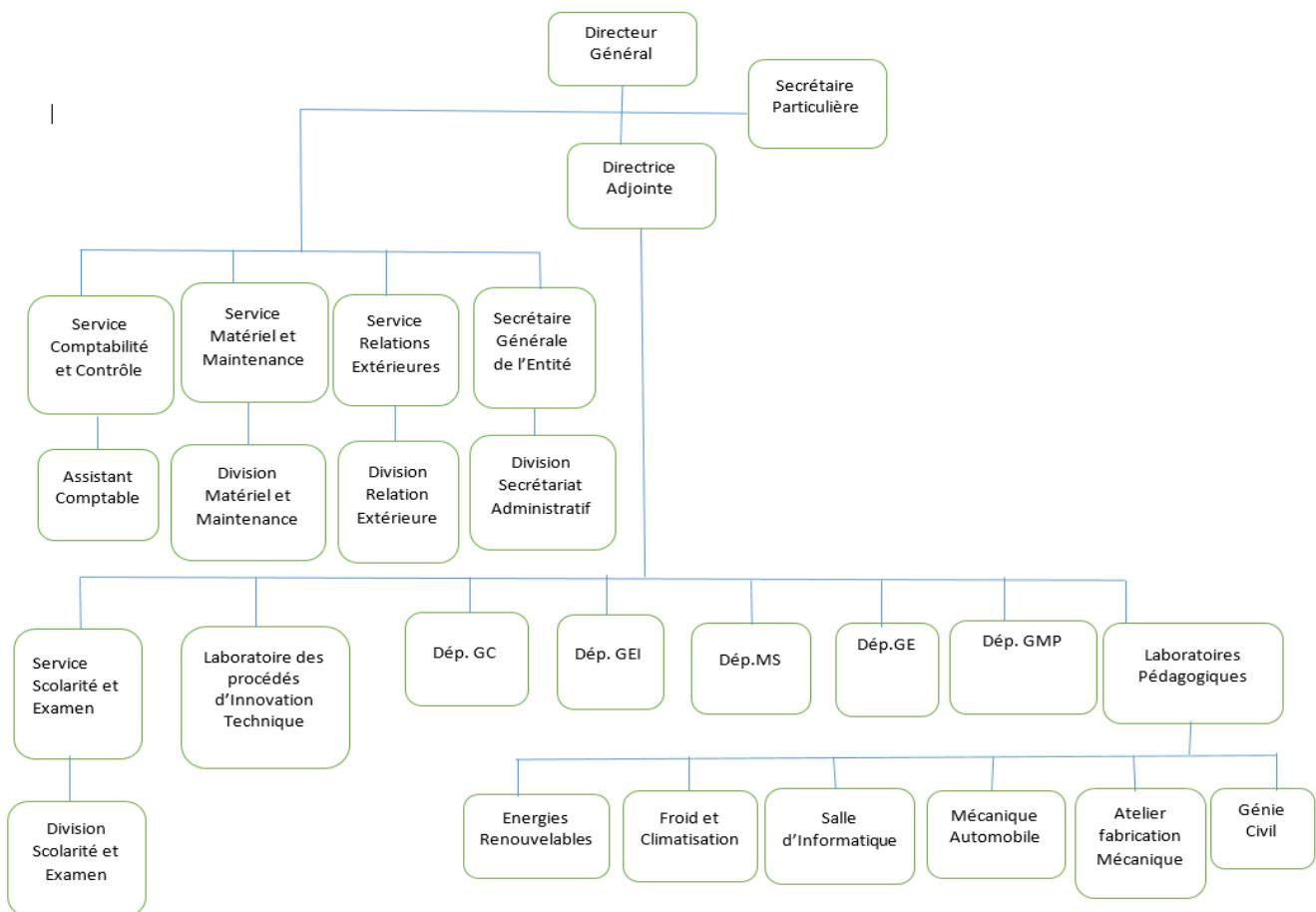


Figure 2: Organigramme de l'administration de l'INSTI-Lokossa

#### 4. Mission

Sa mission est de former des techniciens supérieurs dans le domaine de l'industrie suivant les filières qu'il offre.

#### 5. Formation

L'accès à l'Institut National Supérieur de Technologie Industrielle de Lokossa n'est possible que pour les étudiants titulaires d'un BAC C, D, E, F ou d'un DT/STI et se fait sur étude de dossiers au plan national et au niveau de l'établissement. Chaque candidat retenu est formé en un cycle de trois (03) ans dans l'un des cinq (05) départements suivant :

- Le département de Génie Civil (GC) ;
- Le département de Génie Electrique et Informatique (GEI) :
  - Options : Electrotechnique et Electronique (EE) / Informatique et Télécommunication (IT)
- Le département de Génie Energétique (GE)
  - Options : Energétique /Froid et Climatisation
- Le département de Maintenance des Systèmes (MS) :
  - Options : Maintenance Industrielle (MI) /Maintenance automobile (MA)
- Le département de Génie Mécanique et Productique (GMP)

La formation est constituée d'enseignements théoriques et de travaux pratiques qui s'étendent sur une période de trois (03) ans. Cette formation est donnée par :

- ✓ des enseignements théoriques ;
- ✓ des travaux pratiques en ateliers et laboratoires ;
- ✓ un stage à chaque fin d'année académique ;
- ✓ un stage de fin de formation de trois(03) mois ;
- ✓ enfin la soutenance d'un rapport de fin de formation.

## II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL

### 1. Lieu de déroulement du stage

Au-delà de son caractère formateur, l'INSTI-Lokossa représente également un centre d'accueil pour les stages professionnels et académiques. A cet effet, il met à la disposition de ses étudiants des ateliers de travaux pratiques adaptés aux filières respectives de chacun.

On distingue :

- ✓ Le laboratoire d'essai et de mesure en génie civil ;
- ✓ Le laboratoire de froid et climatisation ;

- ✓ Le laboratoire du génie électrique et informatique industrielle ;
- ✓ Le laboratoire de chimie ;
- ✓ Le laboratoire des énergies renouvelables ;
- ✓ L'atelier de mécanique ;
- ✓ La salle d'informatique ;
- ✓ Le laboratoire des procédés et des innovations technologiques ;

Chacun de ces ateliers est équipé d'appareils et d'outils didactiques permettant aux étudiants des travaux pratiques adéquats.

Dans le même temps, il met à la disposition de ses étudiants une bibliothèque très riche et diversifier en documents, accessibles à tous moments en cas de besoin de documentation scientifique ou d'informations complémentaires pour la compréhension d'un sujet.

## 2. Présentation des sections parcourues

Nous le savons bien que les étudiants de l'INSTI-Lokossa en fin de cycle sont invités à effectuer un stage professionnel de trois (03) mois pour l'obtention de la licence professionnelle. Eu égard de la spécificité de notre thème de fin d'étude sur l'expérimentation du module de pile végétale, nous avons effectué notre stage dans les locaux de l'INSTI-Lokossa principalement dans les sections du Froid et de la Climatisation puis de la Maintenance Industrielle.

- La section du Froid et de la Climatisation s'occupe de la maintenance et de l'installation de tous les éléments qui touchent au froid et à la climatisation, notamment des climatiseurs, des chambres froides, et des installations frigorifiques disponibles dans le complexe universitaire et ceux grâce aux divers outils de maintenance disponible au laboratoire du Froid et de la Climatisation.
- La section Maintenance Industrielle quant à elle s'occupe de l'ensemble des travaux de maintenance et de dépannage qui pourrait subvenir par

rapport à l'un ou l'autre des appareils et équipements présents dans l'enceinte de l'institut.

Les travaux effectués au cours de ce stage seront présentés dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE 2 :**

### **DÉROULEMENT DU STAGE**

## **TRAVAUX EFFECTUÉS AU COURS DU STAGE**

Au cours de notre stage à l'INSTI-Lokossa, nous avons eu à effectuer diverses tâches qui entrent dans le cadre des sections que nous avons parcourues. Nous exposerons dans un premier temps les travaux effectués dans le cadre la section du Froid et de la Climatisation puis dans un second temps, ceux qui appartiennent à la section de Maintenance Industrielle.

### **1. Travaux effectués dans la section du Froid et de la Climatisation**

Pour l'entretien du climatiseur, quelques gestes simples au niveau de l'unité intérieure et extérieure de l'appareil permettront d'optimiser son fonctionnement. Ici nous avons eu à effectuer au cours de notre stage :

- La maintenance des climatiseurs présents dans la salle d'informatique de l'INSTI ;

Le travail effectué consistait à entretenir les filtres à air de l'unité extérieure du climatiseur (Photo 2) qui retiennent les poussières et pollens avec un chiffon humide et de l'eau savonneuse. Nous avons sorti les filtres de leurs emplacements puis dépoussiérez avec un chiffon. Ensuite nous les avons laissé sécher avant de les replacer.



**Photo 2 : Unité intérieure d'un climatiseur de la salle d'informatique de l'INSTI**

Nous avons essayé de retirer la poussière sur l'unité extérieure de l'appareil (Photo 3) et sur les tuyaux à l'aide d'un chiffon légèrement humide ; dépoussiérez également les sorties d'air avec le chiffon humide et pour finir nous avons essuyé le tout avec un chiffon sec.



Photo 3 : Unité extérieure d'un climatiseur de la salle d'informatique de l'INSTI

- La maintenance des unités extérieures et intérieures des climatiseurs présents sur le bâtiment administratif de l'INSTI ;

A ce niveau nous avons videz et nettoyez le bac à condensats (à savoir les écoulements d'eau qui résultent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air lorsqu'il passe dans un échangeur froid) des unités extérieures des climatiseurs situés à l'arrière du bâtiment administratif (Photo 4)



Photo 4 : Unité extérieure d'un climatiseur situé à l'arrière du bâtiment administratif

- Nous avons également effectué la maintenance de l'unité extérieure du climatiseur de la bibliothèque de l'INSTI

Nous avons principalement nettoyé les filtres de l'unité extérieure du climatiseur (Photo 5) avec un chiffon et de l'eau savonneuse.



Photo 5 : Unité extérieure du climatiseur de la bibliothèque de l'INSTI

- Nous avons également effectué le tirage au vide puis l'apport de réfrigérant dans l'unité extérieure du climatiseur de la salle des professeurs de l'INSTI ;

Pour ce travail, nous avons utilisé un manifold (Photo 8) et une pompe à vide (Photo 9) pour effectuer le tire au vide du climatiseur puis une balance de précision et une bouteille de réfrigérant pour la charge de l'unité extérieure de climatiseur (Photo 6) en fluide frigorigène. Nous avons fini la tâche par le nettoyage complet de l'unité intérieure du climatiseur (Photo 7).



Photo 6 : Unité extérieure du climatiseur de la salle des professeurs



Photo 7 : Unité intérieure du climatiseur de la salle des professeurs



Photo 8 : Manifolds ayant servi à la charge du climatiseur



Photo 9 : Pompe à vide

## 2. Travaux effectués dans la section de la Maintenance Industrielle

En matière de maintenance industrielle, nous avons principalement effectué des travaux de dépannage sur les différentes armoires électriques présentes dans l'enceinte de l'INSTI.

Au titre de ces travaux nous pouvons citer :

- L'intervention sur l'armoire électrique présente près du Laboratoire de Génie mécanique et Energétique ;

Nous avons dû intervenir sur cette armoire électrique (Photo 10) pour résoudre le problème de non-fonctionnement des prises électriques et des lampes de la salle.

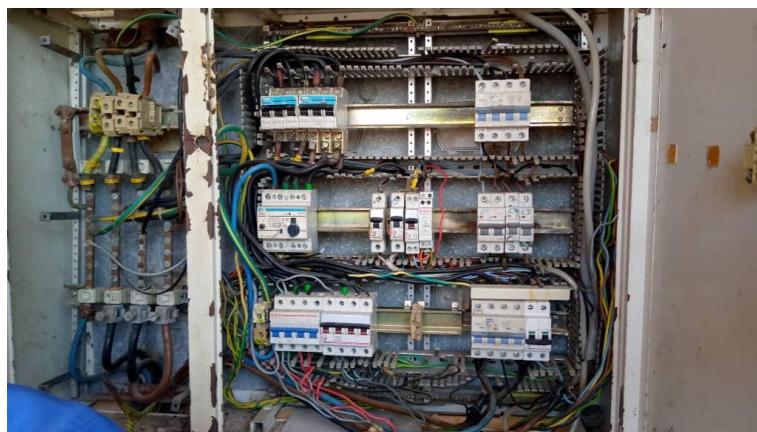


Photo 10 : Armoire électrique du Laboratoire de Génie mécanique et – Energétique

- L'intervention sur l'armoire électrique (Photo 11) à côté de la salle des professeurs ;

Ici notre tâche à consister au remplacement d'un disjoncteur non fonctionnel de l'armoire électrique. Ce disjoncteur contrôle le fonctionnement du climatiseur présent dans la salle. Ainsi son non-fonctionnement a occasionné un dysfonctionnement des climatiseurs ; ce que nous avons corrigé en le remplaçant par un autre disjoncteur (Photo 12).

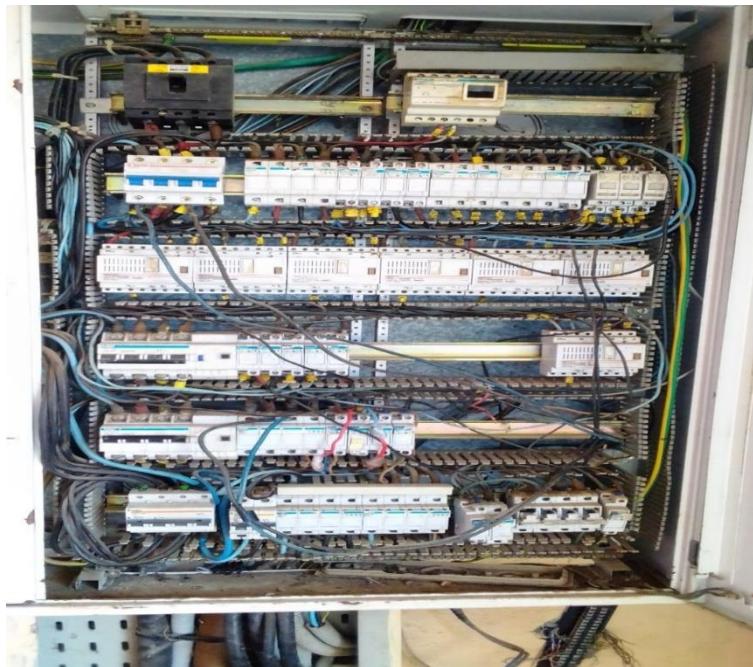


Photo 11 : Armoire électrique de la salle des professeurs

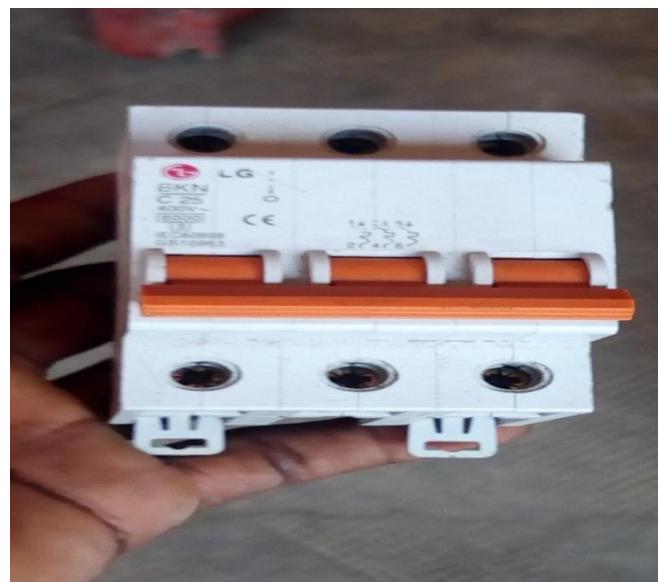


Photo 12 : Nouveau disjoncteur installé

- Intervention sur l'armoire électrique près de la bibliothèque de l'INSTI ;

Notre intervention sur cette armoire présentée dans la Photo 13, s'est faite dans le but de régler le problème de dysfonctionnement du climatiseur de la bibliothèque.

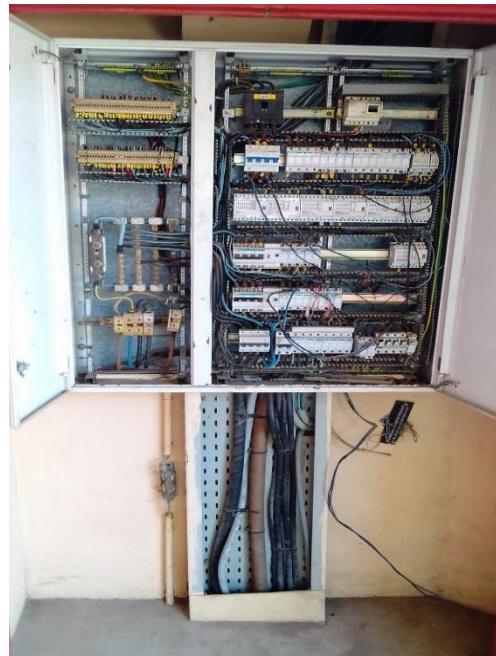


Photo 13 : Armoire électrique de la bibliothèque de l'INSTI

- Intervention sur l'armoire électrique de l'atelier de mécanique ;

Nous avons intervenus sur l'armoire électrique de l'atelier de mécanique (Photo 14) pour régler le problème d'allumage des lampes de l'atelier et du non-fonctionnement des prises électriques qui s'y trouve. Le diagnostic à montrer qu'il s'agissait d'un court-circuit au niveau de l'une des prises électriques de l'atelier. Chose que nous avons réglé et résolue dans le même temps le dysfonctionnement des lampes électriques de l'atelier.



Photo 14 : Armoire électrique de l'atelier de mécanique

### 3. Tache annexe

Au cours de notre période de stage, nous avons également participé à la réalisation des dispositifs de lavage des mains (Photo 15) installés un peu partout dans l’enceinte de l’INSTI et ce dans le but de lutter contre la propagation du COVID19 dans le complexe universitaire.



Photo 15 : Dispositif de lavage des mains réalisé à l’atelier de mécanique

## CHAPITRE 3 :

**PROJET DE FIN D'ÉTUDE :**  
**«EXPERIMENTATION D'UN MODULE DE PRODUCTION  
D'ÉLECTRICITÉ VERTE VIA LA TECHNOLOGIE DES  
PILE VÉGÉTALES »**

## **PRESENTATION DU PROJET DE FIN D'ETUDE**

L'énergie quel que soit sa forme, joue un rôle essentiel dans le monde moderne. Ainsi, la production d'énergie est devenue l'un des indicateurs de progrès à l'échelle des nations (Mohan et al.2008). Plusieurs technologies de production d'énergies renouvelables prometteuses existent de nos jours. Néanmoins nous avons tourné notre regard vers les bioénergies qui constituent une source d'énergie renouvelable dérivée d'organismes vivants ou de leurs sous-produits, autrement dit tirée de la transformation chimique de la biomasse. La technologie que nous étudierons en détail est celle de la pile végétale eue égard de ses nombreuses qualités écologiques intrinsèques qui entrent dans le cadre de la promotion des énergies renouvelables vertes non polluantes. Bien que plusieurs difficultés minent la vulgarisation du potentiel énergétique des piles végétales, le travail que nous effectuerons à travers cette réalisation devra susciter l'intérêt des piles végétales dans le développement des énergies renouvelables au Bénin.

### **I. CARACTERISATION D'UNE PILE VEGETALE**

#### **1. Historique**

Le principe de la pile à combustible fut découvert en 1839 par Sir William Grove, rapidement oublié après sa découverte, ce principe fut repris en 1935 par F.T. Bacon pour aboutir au premier prototype de 1 kW qui servit de modèle en 1961 à la pile hydrogène/oxygène de la mission spatiale Apollo. Elle peut être définie comme un dispositif électrochimique dans lequel l'énergie chimique d'un combustible et d'un comburant est transformée en énergie électrique, chaleur et autres produits de réactions lorsqu'il y'a un apport continu des réactifs.

La production d'électricité est possible grâce à l'échange d'électrons issus des réactions électrochimiques spontanées aux électrodes. Le combustible réducteur s'oxyde à l'anode et les électrons issus de cette oxydation circulent à travers un

circuit électrique externe vers la cathode où ils se combinent à un comburant, généralement l'oxygène, qui est réduit.

**En ce qui concerne la pile végétale**, Marjolein Helder de l'université de Wageningen (Pays-Bas) et David Strik pourraient avoir trouvé une source d'énergie originale. Ces chercheurs ont utilisé la photosynthèse pratiquée par des végétaux supérieurs pour nourrir des bactéries produisant des électrons. Le projet est certes toujours expérimental, mais des tests se sont montrés concluants. Le brevet de cette technologie innovante déposé en 2007 appartient désormais à l'entreprise Plante-e, cofondé par Marjolein Helder et David strik, l'un de ses collègues de l'université de Wageningen. D'ici quelques années, estiment-ils, des habitations pourraient être alimentées par des plantes cultivées sur les toits !

Les plantes ont recours à la photosynthèse pour fabriquer des sucres à partir d'eau, de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et de lumière. Or, 40 à 70 % de ces sucres ne sont pas utilisés par ces organismes. Ils sont donc rejetés dans l'environnement par les racines, pour le plus grand plaisir des bactéries du sol. Celles-ci dégradent ces composés pour se fournir en énergie. C'est sur cette étape que les chercheurs ont décidé d'agir.

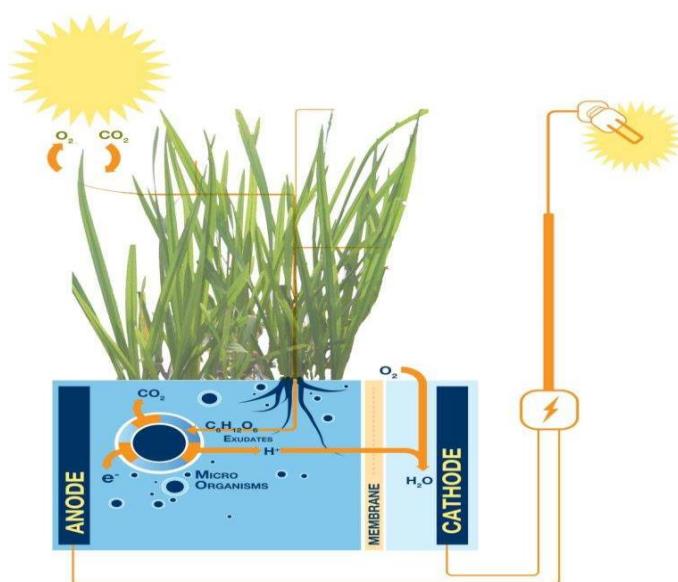


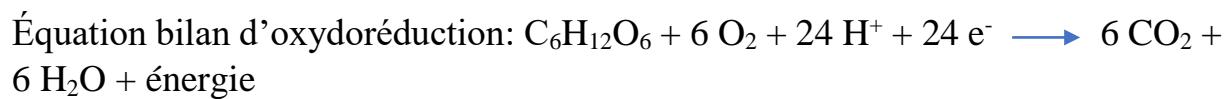
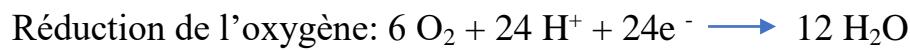
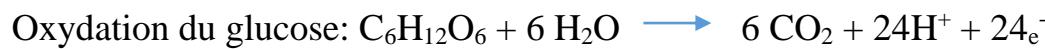
Figure 3 : Représentation d'une pile végétale

## 2. Principe de fonctionnement

Des végétaux ont été mis en culture dans un milieu contenant des micro-organismes. En dégradant les exsudats (les sucres libérés), ces bactéries produisent du CO<sub>2</sub>, des protons (H<sup>+</sup>) et des électrons récupérables par une anode placée à proximité des racines. La cathode est quant à elle fixée à l'intérieur d'un second compartiment séparé du premier par une membrane perméable aux protons. La différence de potentiel entre les deux milieux engendre un courant électrique. Au final, les protons arrivés dans le second compartiment par diffusion vont réagir avec des molécules de dioxygène (O<sub>2</sub>) et des électrons issus de la cathode pour former de l'eau (H<sub>2</sub>O).

Les microbes transfèrent leurs électrons sur l'anode par différentes voies : par des médiateurs, des pili, pendant des collisions et souvent par contact permanent. Dans la cathode, les protons et les électrons se lient à l'oxygène pour produire de l'électricité. Après cette combustion froide, l'eau est le seul déchet qui reste.

## 3. Bilan de la transformation du glucose moléculaire en énergie électrique



## **II. PRESENTATION DU MODULE DE PILE A REALISER ET EXPERIMENTER**

Lors des tests effectués par Plant-e, la production a atteint 0,4 watt par mètre carré (W/m<sup>2</sup>) de plantes en cours de croissance, soit plus que le courant généré par diverses autres piles microbiennes exploitant la fermentation de la biomasse. Dans le futur, la productivité du système pourrait atteindre 3,2 W/m<sup>2</sup>. Un toit plat de 100 m<sup>2</sup> fournirait alors suffisamment d'électricité à l'année pour alimenter une

habitation (soit en moyenne 2.500 kWh/an en France). Depuis 2009, le projet est développé par Plant-e, une spin-off créée par les deux chercheurs.

Eu égard de cela, notre problématique de travail sera de pouvoir générer grâce aux plantes, une tension de sortie continue témoin du fonctionnement de la pile végétale. D'où il faudra accroître la tension nominale générée par la plante en revoyant certains paramètres physico-chimiques tels que : la nature du sol, le type d'électrodes utilisé, le type et le nombre de plante utilisée, etc. Le module que nous souhaitons réaliser sera constitué de deux pieds de plantes de natures et d'espèces différentes cultivées en pots, d'électrodes, et d'autres petits composants, que nous exposerons en détail beaucoup plus bas. L'ensemble des expérimentations et tests de faisabilités effectués ainsi que les résultats obtenus seront également développés.

Pour finir, nous utiliserons de petits LED comme témoin pour s'assurer du fonctionnement effectif du module de pile végétale que nous aurons réalisé. Un graphe montrant l'évolution de la tension délivrée par le module de pile végétale sera également représenté en fonction de la période et de la durée des essais effectués. Pour cela nous utiliserons un multimètre et l'outil de travail Excel.

### 1. Schématisation et description

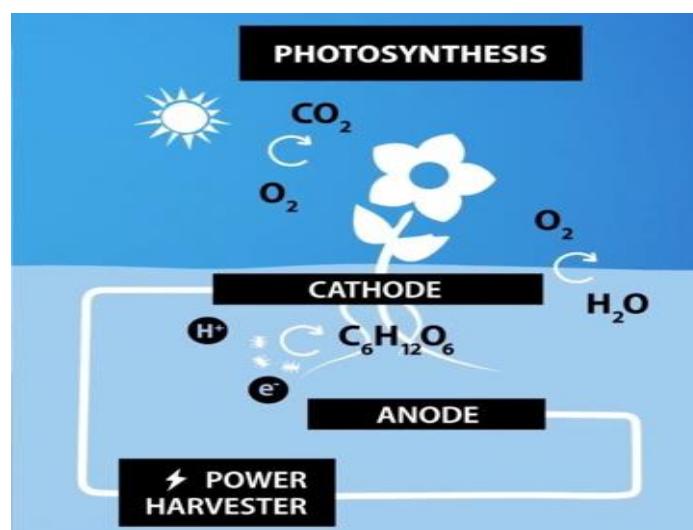


Figure 4 : Configuration adoptée pour la pile végétale réalisée

La figure 4 montre la configuration que nous avons adoptée pour le montage de notre pile végétale.

Dans cette configuration, le pot de culture des plantes sera constitué de terreau dans lequel seront plantés les différents pieds de plante qui y pousseront. Les deux électrodes (Anode et cathode) seront placées horizontalement et en parallèle l'une par rapport à l'autre dans le pot de culture. La distance entre les électrodes sera définie en fonction de la hauteur du pot.

La cathode sera mise à la surface du sol de culture dans le pot pour mieux être en contact avec l'air ambiant afin de capter le plus de dihydrogène ( $O_2$ ) possible. L'anode sera insérée horizontalement au milieu du pot de culture afin d'avoir non seulement une bonne surface de contact avec les racines de la plante, mais aussi pour être le plus près possible de la cathode qui sera située à la surface du sol.

**Remarque :** Nous avons été contraints d'utiliser cette configuration (Figure 4) différente de la configuration utilisée dans la figure 3 (où on pouvait clairement remarquer la présence d'une membrane échangeuse de protons qui devrait assurer la diffusion des électrons de l'anode vers la cathode), parce que nous n'avons pas pu nous procurer une membrane échangeuses de protons dans le matériel nécessaire. Cette membrane a pourtant une importance capitale dans le montage de la pile végétale eu égard du rôle qu'il y joue.

## 2. Les matériaux utilisés et leurs rôles

Pour la réalisation de notre pile végétale, nous avons utilisé le matériel suivant :

- Deux pots en plastique noir de 24 cm de longueur pour 26 cm de diamètre chacun ;

Ces deux pots de culture en plastique serviront de réceptacle à la plante. En d'autres termes, les différents pieds de plantes que nous utiliserons seront cultivés

dans les pots qui quant à eux seront remplis de terreau constitué de terres issues d'un tas d'ordure, de crottes de moutons et de lapins.

La base de chaque pot sera percée ou trouée afin de permettre une certaine aération et une bonne circulation de l'eau en cas d'arrosage sinon les racines des plantes risquent de pourrir.

- Quartes électrodes en graphite artisanaux (Deux anodes et deux cathodes) ;

Ces électrodes en graphites (Photo 17 et 18) ont été réalisées nous-mêmes grâce à des tiges de graphites récupérés dans des piles rondes de 1.5 V (Photo 16) et assemblés entre elles grâce à une colle forte pour avoir une surface d'échange aussi grande que possible. Il faut noter qu'elles sont très fragiles. Les anodes et cathodes utilisés sont donc du même matériau.



Photo 16 : Tige de graphite récupérer dans les piles rondes (elle mesure 5 cm de long pour 1,3 cm de large)

***Pourquoi le graphite ?***

Le graphite est une espèce minérale qui est l'un des allotropes naturels du carbone. Le graphite est la forme la plus stable du carbone à température et à pression ordinaire. L'apparence du graphique est celle d'un solide noir à l'éclat submétallique ; sa dureté est faible : entre 1 et 2 à l'échelle de Mohs. Sa formule

chimique est C, de plus en raison de sa structure intrinsèque, toutes ses propriétés physiques sont anisotropes en particulier sa conductivité électrique très élevée.

Notons que l'anisotropie est la propriété d'être dépendant de la direction, autrement dit quelque chose d'anisotrope pourra présenter différentes caractéristiques selon son orientation. Ainsi le graphite est beaucoup plus conducteur dans une orientation horizontale ou en plan.

En résumé la conductivité électrique du graphite fait de lui le matériau idéal pour servir d'électrode dans cette pile combustible où la conductivité des électrodes sera vraiment utile et surtout pour sa bonne résistance à la corrosion comme à l'oxydation. En effet, il est non seulement stable dans les cultures microbiennes, peu chères, faciles à utiliser, mais ils possèdent en outre de grandes surfaces actives qui permettent d'obtenir de meilleurs rendements pour les piles (Logan et al.2006; Watanabe 2008).

### Dimensions des électrodes :

Anodes : 6,5 cm de large pour 10 cm de long



Photo 17 : Anode en graphite utilisée

Cathodes : 5,2 cm de large pour 10 cm de long



Photo 18 : Cathode en graphite utilisé

Les anodes sont plus larges que les cathodes afin d'avoir une plus grande surface d'échange avec les racines de la plante parce qu'elles seront insérées dans le pot de culture près des racines des plantes.

Le rôle de l'anode sera de récupérer les protons ( $H^+$ ) et les électrons ( $e^-$ ) issus de la dégradation des sucres ( $C_6H_{12}O_6$ ) produits grâce à la photosynthèse des plantes par les micro-organismes présents dans le sol de culture de ces plantes.

Au niveau de la cathode, les protons et les électrons vont réagir avec les électrons et le dioxygène de l'air ( $O_2$ ) pour donner de l'eau ( $H_2O$ ).

C'est cette migration des électrons de l'anode vers la cathode qui va produire la différence de potentiel que nous allons récupérer sous forme de tension continue.

- L'engrais organique liquide « SuperGro » ;



Photo 19 : Engrais organique SuperGro dans un bidon de 1,5L

L'engrais organique SuperGro (Photo 19) est un engrais foliaire naturel qui contient les éléments nutritifs de très bonne qualité et en quantité suffisant pour l'alimentation des plantes. Il contient le NPK (Azote N, Phosphore P, Potassium K) qui est un engrais de fond et l'urée qui est un engrais de couverture ou surfaçant.

Il intervient ici dans le but d'augmenter la croissance des plantes en agissant directement sur les feuilles et les racines des plantes grâce aux éléments nutritifs qu'il lui apporte pour sa croissance. Grâce à cet engrais, la plante exploite le maximum des ressources nutritives présentes dans le sol. Ce qui favorise la production d'une grande quantité de sucres ( $C_6H_{12}O_6$ ) par la plante compte tenu de la richesse du sol. De plus l'impact de l'engrais organique sur le sol favorise l'activité et le développement des micro-organismes présents dans le sol et qui interviennent dans la dégradation des sucres pour la libération des électrons.

Les plantes ont donc été arrosées et enrichies par un dosage d'eau et d'engrais organique Super Gro. Le dosage effectué est de 1 ml de Super Gro pour 1L d'eau pour une fréquence d'arrosage régulière des plantes matin et soir afin de conserver une bonne humidité dans le sol.

- Les plantes utilisées :

Pour la réalisation de notre module de pile végétale, nous avons utilisé deux types de plantes à savoir : l'**aloès commun (*Aloe vera*) et la Citronnelle (*Cymbopogon citratus*)**.

*Aloe vera* (Photo 20) est une plante de la famille des liliacées, elle fait partie des monocotylédones. Le plant mesure environ 70 cm de hauteur, ses racines sont peu profondes, et il est constitué d'un nombre variable de feuilles charnues, de forme triangulaire et pointue aux extrémités. De petites épines jaune pâle sont souvent présentes sur le pourtour de ses feuilles. Sa floraison, jaune clair, se présente sur des hampes en forme de trompettes et son fruit est capsulaire. Son gel, une matière visqueuse vert pâle, est prélevé au centre de ses feuilles, tandis que son latex est extrait des petits canaux, présents dans sa tige. Cette plante pousse sur les sols neutres, dans une atmosphère chaude et plutôt bien drainée.



Photo 20 : Plante de *Aloe vera* dans le pot de culture

*Cymbopogon citratus* (Photo 21) est une plante herbacée tropicale de la famille des Poacées (graminées), sous-famille des Panicoideae, tribus des Andropogoneae, cultivée pour ses tiges et feuilles aux qualités aromatiques (à goût de citron). C'est une plante herbacée à longues feuilles linéaires, dressées, de 90 cm à 2m de long, à bords rugueux et coupants, de couleur verte bleutée assez pâle. Tiges creuses, bulbeuses à la base, enveloppées dans la gaine des feuilles. C'est une plante vivace par ses rhizomes qui présentent également de nombreuses vertus avec des utilisations diverses.



Photo 21 : Plante de citronnelle dans le pot de culture

Les critères qui justifient le choix de ses deux plantes pour la réalisation du module de pile végétale sont les suivantes :

-la culture en milieu ensoleillé : La plante devra supporter un ensoleillement régulier donc elle doit grandir en milieu ensoleillé puisque notre milieu de vie est assez ensoleillé. Ce paramètre devra à notre avis améliorer la photosynthèse et permettre une meilleure croissance de la plante d'où une meilleure performance.

-Le rythme : La sélection des plantes de catégories vivaces serait plus conseillées afin de favoriser non seulement une culture et un entretien plus facile, mais aussi pourra permettre une mobilité plus facile en cas de changement d'emplacement ou de déplacement quelconque du module à mettre en place dans le projet puisqu'elle s'autorise la culture en pot.

-Type de sol : La plante devra supporter un sol neutre, riche, frais et bien drainer en eau afin de permettre une activité optimale des micro-organismes dans le sol, et leurs développements.

La citronnelle et l'Aloès verra respectent chacune de ses conditions citées et en plus elles sont facilement cultivables en pot dans notre habitat en plus d'être disponible un peu partout sur le territoire, sans oublier leurs nombreuses vertus.

- Des fils conducteurs comme extensions des électrodes ;



Photo 22: Fil conducteur en cuivre de petite section

Aux bornes de ces fils conducteurs (Photo 22), nous avons mesuré la tension produite aux bornes des électrodes grâce à un multimètre. Elles seront reliées aux électrodes présentes dans le pot.

- Les témoins électroniques de fonctionnement ;

C'est l'ensemble des LEDs qui nous permettront de vérifier le fonctionnement de la pile végétale par leurs allumages (Photo 23), sans oublier le multimètre qui servira d'instrument de mesure du courant produit par notre module de pile végétale (Photo 24).

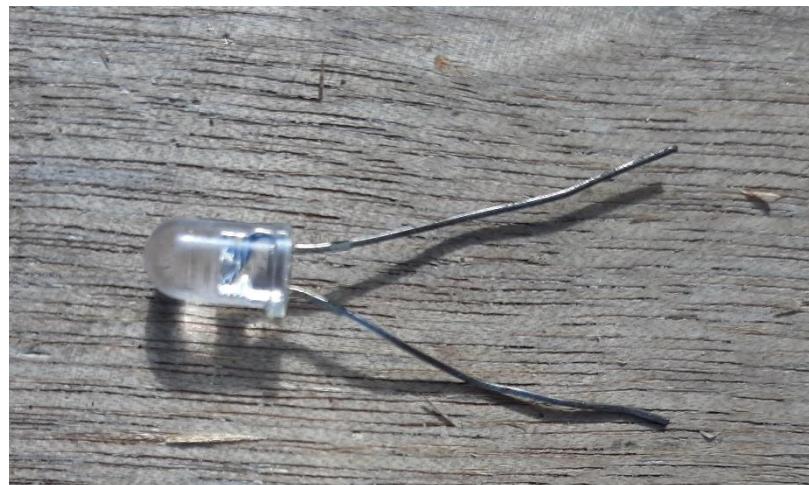


Photo 23 : LED de 1 Volt (V) devant servir de témoin



Photo 24 : Multimètre utilisé pour la mesure des tensions

- Autres matériels utilisés :

Nous avons en parallèle utilisé de l'adhésif noir pour maintenir les électrodes au pot après insertion, de la Super Glue pour maintenir les électrodes entre elles et enfin un fer à souder électrique pour les incisions à réaliser dans les pots de cultures et pour les trous à percer à leurs bases. Nous avons utilisé environ deux (02) rouleaux d'adhésif et six (06) pots de Super Glue pour maintenir les électrodes entre elles et aux pots de culture après insertion.

Nous nous sommes assuré que l'ensemble du matériel à utiliser soit facile d'accès, moins couteux, et biodégradable. Ainsi, le matériel utilisé n'a aucun inconvénient sur la plante, ni sur le sol de culture, encore moins sur l'environnement. Le dispositif sera donc totalement écologique.

### **III. REALISATION ET EXPERIMENTATION DU MODULE DE PILE VEGETALE**



Photo 25 : Modules de piles végétales réalisés

## 1. Description des tâches effectuées

Dans le but d'aboutir à la réalisation de notre pile végétale, nous avons effectué plusieurs tâches successives qui concourent dans ce sens.

- Après achat; de tout le matériel nous avons commencé par remplir les pots de terreau de terres composés de sable provenant d'un tas d'ordures, de crottes de moutons et de lapins. Puis nous avons planté dans chacun des deux pots les différents pieds de Citronnelle et de *Aloe verra*. Nous avons récupéré ces pieds de pantes chez un jardinier non loin de l'institut.

Les deux plantes sont arrosées régulièrement matin et soir par le dosage d'eau et d'engrais organique « SuperGro » pour conserver une bonne humidité dans le sol et assurer la bonne croissance des plantes. Il faut noter qu'une période de maturité et de croissance d'un (01) mois a été accordée aux plantes comme période d'adaptation et d'intégration au sol de culture en pot. Durant cette période les plantes ont pu pousser et ont eu une croissance assez conséquente pour servir dans la suite de la réalisation. Leur taille moyenne atteignait 30 cm de hauteur chacune.

Nous avons percé la base des pots avec un fer chaud pour permettre la circulation de l'eau et éviter qu'elle ne s'accumule dans le pot pour pourrir les racines des plantes.

- Dans un second temps, nous avons réalisé nos électrodes de travail en graphite ;

Pour cela nous avons commencé par récupérer des tiges de graphites dans des piles rondes de 1,5 V (Photo 16), que nous avons mises aux propres et ensuite associées entre elles grâce à de la colle forte (Super Glue). Une tige de graphite mesure 5 cm de long pour 1,3 cm de large.

Pour les anodes (Photo 17) nous avons utilisé en tout dix (10) tiges de graphite assemblées entre elles de la manière suivante : Cinq (05) en horizontal pour avoir une largeur totale de 6,5 cm puis deux (02) en vertical

pour une longueur de 10 cm. L'anode offre donc une surface d'échange de 65 cm<sup>2</sup> de chaque côté avec les racines des plantes.

Pour les cathodes (Photo 18) par contre nous avons utilisé huit (08) tiges de graphites dont quatre (4) assemblées en horizontal et deux (02) en vertical. Ainsi on a pu obtenir 5.2 cm de large pour 10 cm de long avec une surface d'échange de 52 cm<sup>2</sup> avec l'air ambiant.

Nous avons donc pu réaliser quatre (04) électrodes dont deux (02) anodes et deux (02) cathodes pour chaque plante.

***NB : Nous avons utilisé ce nombre de tiges pour la réalisation de nos électrodes pour des questions de résistance de l'ensemble .On aurait bien pu augmenter le nombre des tiges pour avoir une plus grande surface d'échange, mais plus le nombre de tiges augmente moins l'ensemble est solide et est susceptible de très vite se briser ce qui fait qu'elle est beaucoup moins résistante.***

- Ensuite nous avons procédé à l'introduction des électrodes dans les pots de cultures des plantes (Photo 26);

Pour cela, nous avons à l'aide d'un fer chaud réalisé une incision de 6 cm et de 7 cm de large respectivement pour les cathodes et les anodes (Photo 27). Celles des cathodes ont été effectuées à 4 cm en partant du haut du pot pour qu'une fois insérées, elles se posent exactement à la surface du sol. En ce qui concerne les anodes elles ont été introduites à 14 cm en partant du haut du pot soit à une distance de 10 cm de la cathode. On s'assure donc qu'à cette position elle soit en contact avec les racines des plantes dans le pot. Il faut rappeler que les électrodes ont été insérées dans le plan horizontal des pots pour une plus vaste surface d'échange. Autrement dit, elles ont été insérées horizontalement.



Photo 26 : Incision de 6 cm et 7 cm réalisée dans le pot de culture



Photo 27 : Electrodes introduites dans le pot de culture

- Pour finir nous avons relié les électrodes entre elles grâce à des fils conducteurs à l'extérieur du pot (Photo 28). Ces fils conducteurs vont serviront d'extensions pour les électrodes et c'est aux bornes de ces fils que nous mesurerons la tension produite par le module de pile végétal. De l'adhésif noir sera utilisé pour le maintien des fils conducteurs aux électrodes et des électrodes aux pots pour éviter qu'elles ne s'enlèvent.



Photo 28 : Connexions électriques réalisées entre les électrodes grâce aux fils conducteurs

*Ainsi s'achève donc la réalisation de notre module de pile végétale qui pourra maintenant passer à l'étape d'expérimentation, où le fonctionnement du système sera vérifier par la mesure de la tension produite par la pile végétale suivant une période de temps donné et cela grâce à un multimètre.*



Photo 29 : Module de pile végétale réalisé avec l'Aloe Vera



Photo 30 : Module de pile végétale réalisé avec la citronnelle

## 2. Expérimentation du module de pile végétale réalisé

Nous avons réalisé deux expérimentations distinctes pour étudier le fonctionnement de notre module de pile végétale. La première consiste à la mesure de la tension aux bornes de chaque module suivant une durée de sept (07) jours en 24 Heures. En ce qui concerne la seconde, nous essayerons d'allumer des LEDs avec les deux différents modules de pile végétale afin de pouvoir effectuer une analyse objective non seulement sur le potentiel de ces piles, mais aussi sur les caractéristiques qui définissent leur fonctionnement adéquat.

### 2.1. Première expérimentation : Mesure de tension aux bornes de chaque module.

Lors de cette expérimentation, nous avons mesuré la tension présente aux bornes des fils conducteurs reliées aux électrodes grâce à un multimètre .Les deux plantes ont été mises exactement dans les mêmes conditions d'expérimentation à savoir : la même fréquence d'arrosage (Matin et soir, sur toute la durée de l'expérimentation) et le même dosage (d'eau et d'engrais) pour l'arrosage. De plus elles ont toutes les deux été exposées au même endroit c'est-à-dire au balcon de jour comme de nuit (24h /24).Les mêmes électrodes ont également été utilisées et les tensions ont été mesurées dans les mêmes tranches d'heure suivant un total de sept (07) jours soit en une semaine d'expérimentation. Ces expérimentations ont été effectuées du Lundi 15 Juin 2020 au Dimanche 21 Juin 2020.

**Les tensions sont mesurées en volts (V) avec un multimètre calibré sur 20 volts (V).**

Les résultats des mesures obtenues sur chaque plante seront présents dans les tableaux qui suivent :

- Pot de plante 1 : Citronnelle**

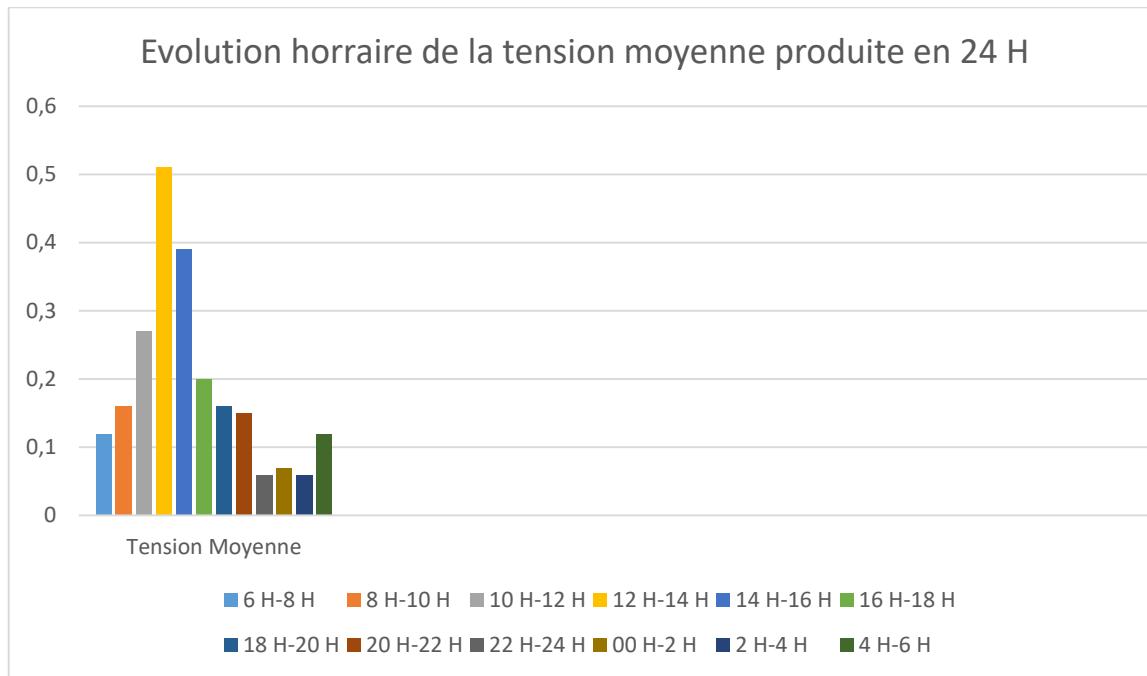
Le tableau 1 présente les valeurs des tensions mesurées dans un intervalle de 2 H de temps de 6 Heures à 6 Heures soit en 24 Heures pendant sept (07) jours. Dans la dernière ligne du tableau, nous ferons la moyenne des tensions obtenues par tranche horaire afin d'établir un graphe montrant l'évolution approximative de la tension produite durant les 24 Heures.

Tableau 1 : Mesure de la tension aux bornes du pot de Citronnelle sur sept (07) Jours en 24 H.

Horaires Jours \	6h - 8h	8h - 10h	10h - 12h	12- 14h	14- 16h	16- 18h	18h - 20h	20h - 22h	22h - 24h	24h - 2h	2h - 4h	4h - 6h
1	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
2	0,00	0,04	0,05	0,10	0,08	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01
3	0,04	0,10	0,12	0,30	0,22	0,07	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02	0,10
4	0,20	0,37	0,30	0,67	0,64	0,36	0,24	0,25	0,10	0,17	0,09	0,26
5	0,11	0,20	0,36	0,96	0,60	0,37	0,31	0,29	0,12	0,10	0,02	0,10
6	0,20	0,20	0,34	0,76	0,62	0,48	0,34	0,25	0,12	0,09	0,07	0,09
7	0,32	0,24	0,30	0,75	0,52	0,30	0,31	0,26	0,08	0,16	0,19	0,26
Moyenne	0,12	0,16	0,27	0,51	0,39	0,20	0,16	0,15	0,06	0,07	0,06	0,12

Comme l'on peut le constater, ces valeurs sont très variables en fonction des horaires ainsi qu'en fonction du temps d'expérimentation. Mais les tensions les plus importantes sont enregistrées progressivement au bout du troisième jour d'essai.

Les graphes qui suivent nous montrent une description exhaustive de l'évolution effective de la tension produite au cours de la période d'expérimentation.



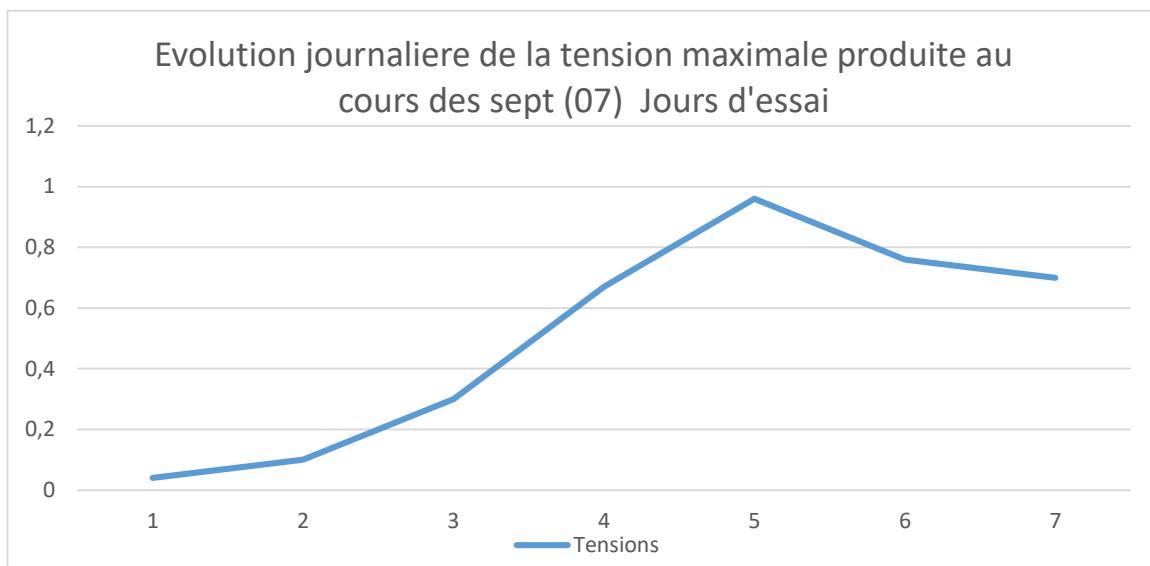
Graphe 1 : Evolution approximative de la tension produite durant 24 H par le pot de Citronnelle.

Le graphe 1 montre l'évolution moyenne de la tension produite par la pile végétale durant 24 Heures suivant la période des essais. On constate que cette tension est beaucoup plus élevée entre 12 H et 14 H.

Tableau 2 : Relevé des tensions maximales journalières enregistrer sur les sept (07) jours d'essai sur le pot de citronnelle

Jours.	Tension journalière maximale
1	0,04
2	0,10
3	0,30
4	0,67
5	0,96
6	0,76
7	0,75

Le tableau 2 va nous permettre de tracer l'évolution de la tension maximale produite par le module de pile végétale à base de Citronnelle durant la période des expérimentations.



Graphe 2 : Evolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot de citronnelle

L'analyse du graphe 2 nous montre une évolution croissante de la tension produite par la plante de citronnelle qui atteint un pic de 0.96 Volt (V) au bout du cinquième jour des essais entre 12 H et 14 H.

- Pot de plante 2 : *Aloe Vera***

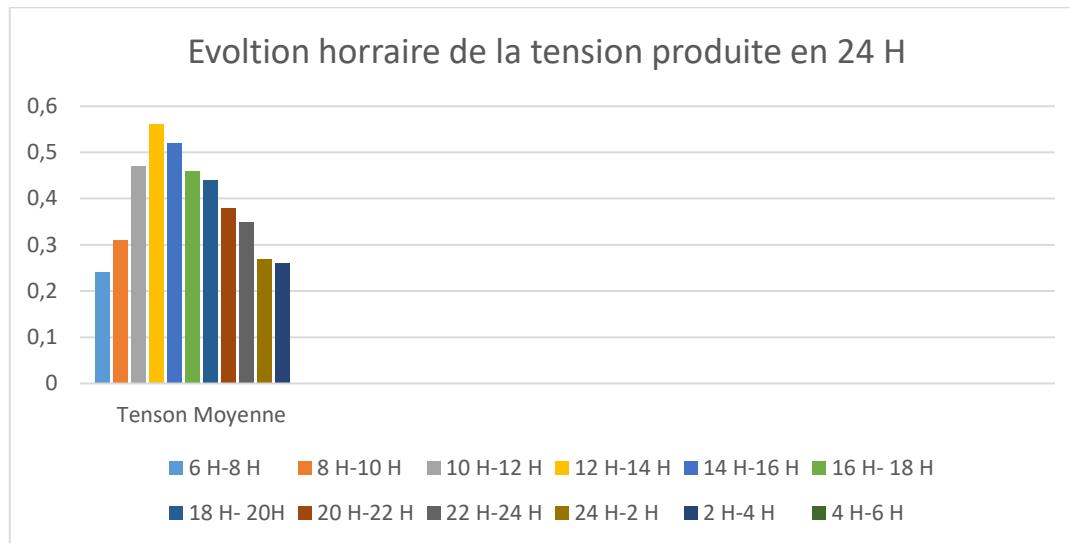
Le tableau 2, présente les résultats de mesures obtenues aux bornes des électrodes du pot de plante de *Aloe vera* mise dans les mêmes conditions d'expérimentation que la plante de Citronnelle.

Tableau 3 : Mesure de la tension aux bornes du pot de *Aloe Vera* sur sept (07) Jours en 24 H.

Horaires Jours \	6h - 8h	8h - 10h	10h - 12h	12- 14h	14- 16h	16- 18h	18h - 20h	20h - 22h	22h - 24h	24h - 2h	2h - 4h	4h - 6h
1	0,07	0,10	0,19	0,20	0,16	0,16	0,11	0,09	0,08	0,05	0,00	0,00
2	0,05	0,10	0,26	0,39	0,21	0,20	0,24	0,10	0,13	0,07	0,07	0,08
3	0,10	0,14	0,26	0,32	0,32	0,23	0,24	0,22	0,19	0,07	0,07	0,06
4	0,19	0,30	0,37	0,40	0,35	0,36	0,35	0,33	0,27	0,10	0,04	0,06
5	0,20	0,45	0,78	1,05	1,02	0,80	0,71	0,68	0,60	0,59	0,59	0,50
6	0,56	0,60	0,76	0,96	1,01	0,96	0,92	0,80	0,76	0,70	0,63	0,57
7	0,53	0,72	0,78	0,94	0,62	0,50	0,51	0,42	0,42	0,30	0,39	0,47
Moyenne	0,24	0,31	0,47	0,56	0,52	0,46	0,44	0,38	0,35	0,27	0,26	0,25

Les résultats présents dans le Tableau 3 sont à première vue nettement plus élevés que ceux obtenus avec la plante de Citronnelle. Ceci témoigne du meilleur fonctionnement de ce module comparé au premier, car on note une production de tension déjà au bout du deuxième jour des essais qui évolue progressivement sur toute la durée des essais.

Le graphe 3 montre en moyenne l'évolution de la tension produite par la plante sur une durée de 24 Heures.

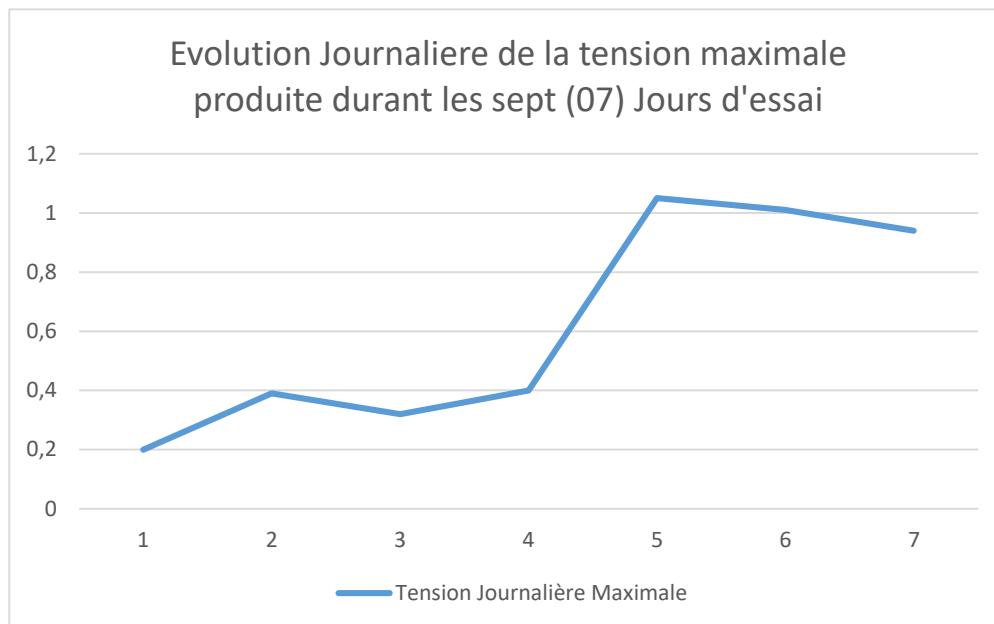


Graphe 3 : Evolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot de *Aloe vera*

L'évolution du graphe 3 témoigne de la forte productivité électrique de la plante de *Aloe vera* durant la période de 12 H à 14 H comme on devrait normalement s'y attendre. De plus, on note des pics de tensions plus importants en journée avec la plante de *Aloe vera* qu'on n'observe malheureusement pas avec la plante de Citronnelle. Ainsi, on n'en déduit que la plante de *Aloe vera* présente un rendement énergétique beaucoup plus intéressant que celui de la Citronnelle.

**Tableau 4 : Relevé des tensions maximales journalières enregistrer sur les sept (07) jours d'essai sur le pot de *Aloe vera***

Jours	Tension journalière maximale
1	0,20
2	0,39
3	0,32
4	0,40
5	1,05
6	1,01
7	0,94



**Graphe 4 : Evolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot de *Aloe vera***

Le graphe 4 qui obtenus grâce aux paramètres du tableau 4, montre l'évolution de la tension maximale journalière produite au cours des sept (07) jours d'essai par le pot de *Aloe vera*. L'analyse du graphe montre une évolution croissante de la tension produite dès le second jour des expérimentations atteignant un premier pic de 0,4 Volt (V) puis durant la période du deuxième au quatrième jour on note une certaine stabilisation de la tension produite qui croit progressivement au bout du

cinquième jour pour une tension maximale de 1,05 Volt (V) qui tend à se stabiliser au bout du septième jour après une légère décroissance observée au sixième jour.

On en retient donc que la tension maximale obtenue par ce module est de 1,05 Volt (V) au bout du cinquième jour d'essai entre 12 H et 14 H durant toute la période des essais.

- **Déduction globale**

Eu égard des résultats recueillis au cours de cette première expérimentation, nous pouvons nous assurer de la faisabilité des piles végétales et de leurs fonctionnements principalement à cause des données de tensions relevées aux bornes des électrodes de nos différents modules piles végétales.

De plus, l'analyse des données indique une production de tension quelque peu considérable au bout du troisième jour d'essai après introduction des électrodes pour le pot 1 (Plante de Citronnelle), mais au bout du deuxième jour d'essai pour le pot 2 (Plante de *Aloe vera*). Ce temps de latence peut s'expliquer par un temps d'adaptation des électrodes aux racines des plantes ou encore de la plante aux électrodes présente dans son milieu de culture. Cela dépend donc de l'interaction qui existe entre les racines des plantes, l'activité des microorganismes dans la dégradation des sucres présents dans le sol et la capacité des électrodes à capter le maximum d'électrons possibles via les différents mécanismes de transfert qui existent.

De plus, l'analyse des différents graphes qui indiquent l'évolution de la tension produite par les différents modules de pile végétale décrit une évolution progressive de la tension produite durant les sept (07) jours d'essai, ce qui nous permet d'affirmer que la production croissante de l'énergie est liée à la croissance de la plante dans le pot de culture. Ainsi, elle évoluera progressivement en fonction du temps jusqu'à se stabiliser lorsque la plante aura atteint sa maturité ou son régime normal de croissance.

Dans le même temps, on note après l'analyse des résultats que les tensions obtenues avec la plante de *Aloe vera* sont nettement supérieures à celles obtenues avec la plante de citronnelle. Néanmoins elles ont été placées dans les mêmes conditions d'expérimentation. Le seul paramètre variant étant la nature de la plante, on en déduit que là la quantité d'électricité produite varie en fonction du type de plante utilisé.

Pour finir, on note que les tensions maximales produites dans la journée ont été enregistrées dans la tranche horaire de 10 H à 16 H, ce qui témoigne de l'importance de l'ensoleillement dans le fonctionnement de la pile végétale. En d'autres termes, ce facteur indique l'influence de la photosynthèse sur la quantité d'énergie produite par la pile végétale, car la quantité d'énergie produite est directement liée aux électrons issus de la photosynthèse de la plante, qui n'est possible que par l'abondance des rayons solaires que capte la plante. Ces rayons solaires étant beaucoup plus intenses entre 12 H et 14 H compte tenu de l'orientation du soleil ce qui justifie clairement les résultats obtenus.

*En somme, on note que la tension maximale obtenue par le module de pile végétale à base de citronnelle est de 0,96 Volt (V) et celle obtenue par le module de pile végétale à base d'Aloe vera est de 1,05 Volt (V). Rappelons qu'elles ont été obtenues au bout du cinquième jour d'essai entre 12 H et 14 H. Ce qui nous permet donc d'affirmer de par nos expérimentations que la nature de la plante et l'influence du rayonnement solaire sur la photosynthèse de la plante sont deux facteurs très déterminants dans l'amélioration du potentiel énergétique des piles végétales. On en déduit au terme de cette première expérimentation que les résultats obtenus avec la plante de Aloe vera sont beaucoup plus convaincants que ceux obtenus avec la plante de citronnelle en termes de rendement énergétique.*

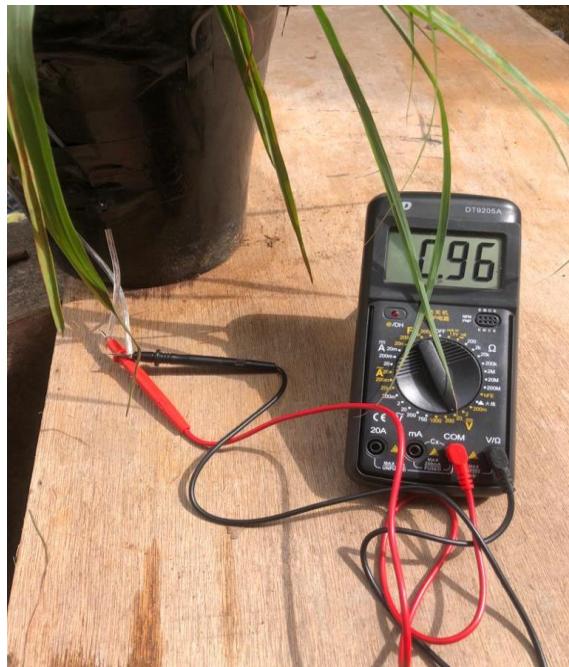


Photo 31 : Tension maximale mesurée aux bornes du Pot de plante de Citronnelle

## 2.2. Deuxième expérimentation : Essai d'allumage des LEDs

Dans cette seconde partie des expérimentations, nous allons essayer d'allumer avec nos deux modules de piles végétales, une petite LED de un (01) Volt (V). Ces expérimentations ont été réalisées dans la journée du Dimanche 21 Juin 2020 entre 12 H et 14 H.

- **Pot de plante 1 : Citronnelle**

Nous avons branché aux bornes des fils conducteurs reliés aux électrodes présentes dans le pot de culture de la citronnelle la LED devant servir de témoin, mais malheureusement à notre grande surprise aucun elle ne s'est pas allumé bien qu'il y a une tension aux bornes du dispositif.

La seule explication est que la tension produite par cette plante bien qu'elle soit assez faible et quelque peu variable n'était pas assez suffisante pour alimenter cette LED. L'amélioration de ce module s'impose donc à nous puisque ce test s'avère être un échec.



Photo 32 : Essai d'allumage de la LED sur le module de pile végétale avec la plante de Citronnelle.

- **Pot de plante 2 : Aloe Vera**

La même expérimentation a été effectuée avec la plante de *Aloe vera* où nous avons branché aux bornes des fils conducteurs reliés aux électrodes dans le pot, la LED de 1 Volt (V). Comme nous l'espérons tant, la LED s'est effectivement allumé pendant environ 40 Secondes. Ce test a donc été un franc succès avec le module de pile végétal réalisé avec la plante de *Aloe vera* contrairement à la Citronnelle. Nous devrions certes nous y attendre, car la tension qu'elle produisait était nettement supérieure à celle produite par la Citronnelle bien qu'elles ont été mises exactement dans les mêmes conditions.



Photo 33 : Essai d'allumage de la LED sur le module de pile végétale avec la plante de *Aloe vera*.

*Cette expérimentation nous permet de confirmer l'hypothèse suivant laquelle le potentiel énergétique des piles végétales varie d'une plante à l'autre.*

### 3. Mise en commun des résultats obtenus et Caractérisation du fonctionnement des piles végétales

La mise en commun des résultats issus des différentes expérimentations nous permet de retenir que le module de pile végétale réalisé avec la plante de *Aloe vera* possède un rendement énergétique nettement supérieur à celle du module réalisé avec la plante de Citronnelle bien qu'elles ont été mises dans les mêmes conditions d'expérimentation. Ainsi, grâce à ces résultats, nous pouvons énumérer les hypothèses suivantes qui caractérisent le bon fonctionnement de piles végétales et les facteurs à prendre en compte pour avoir un meilleur rendement. Il s'agit de :

- Le type de plante utilisé : La quantité d'énergie produite varie en fonction du type ou de l'espèce de plante utilisée en ce sens que les résultats obtenus varient d'une plante à l'autre. De plus pour la sélection des plantes, il faudra prendre en compte les critères que devra supporter la plante à savoir : Une exposition dans un milieu ensoleillé, un arrosage fréquent, un sol riche et bien drainé.
- Le sol de culture : Avoir un sol de culture bien riche en nutriment et en microorganismes afin de favoriser une bonne croissance de la plante, car la quantité d'énergie produite évolue en fonction de la croissance de la plante. De plus un sol bien riche va permettre une bonne activité des microorganismes dans la décomposition des sucres produits par la plante par photosynthèse pour la libération des électrons. L'humidité du sol est également à prendre en compte, car un sol bien drainé en eau va favoriser le déplacement des électrons de l'anode vers la cathode. Il faut penser à utiliser des engrains organiques s'il le faut afin de mieux enrichir le sol et favoriser la croissance de la plante.
- Les électrodes utilisées : Il faut penser à utiliser des électrodes de bonne qualité afin de leur permettre de pouvoir capter le maximum d'électrons possible et d'avoir une surface d'échange assez vaste que possible avec les racines des plantes (Anodes) comme avec le milieu extérieur (Cathode). Il est conseillé d'utiliser des électrodes en graphite pur, car ils sont non seulement stables dans les cultures microbiennes, peu chers, faciles à utiliser, mais ils possèdent en outre de grandes surfaces actives qui permettent d'obtenir de meilleurs rendements pour les piles. De plus leur présence n'a aucune influence sur la croissance de la plante.
- L'emplacement de la plante : Exposer la plante dans un milieu bien ensoleillé où elle aura un contact permanent avec les rayons du soleil et en quantité suffisante pour assurer sa photosynthèse. Ceci devrait nous rappeler que les tensions les plus grandes ayant été enregistrer ont été obtenues

dans les moments de la journée où l'ensoleillement était assez élevé (Entre 12 H et 14 H). L'ensoleillement a donc une influence capitale sur la quantité d'énergie produite par la plante.

- L'utilisation d'une membrane échangeuse de proton : L'utilisation d'une membrane échangeuse de proton dans la réalisation de la pile végétale va accroître considérablement la quantité d'énergie produite, car elle rendrait beaucoup plus facile et uniforme la circulation des électrons de l'anode vers la cathode. En d'autres termes la membrane permettra un transfert direct des électrons qui devront transiter au travers d'elle, ce qui faciliterait le mécanisme de transfert des électrons de l'anode vers la cathode et le rendement du système en serait beaucoup plus accru.

#### 4. Observations

Nos propres observations concernant le travail effectué sur nos modules de piles végétales réalisées et les résultats obtenus vont principalement à l'endroit du matériel utiliser en particulier des électrodes. Nous estimons qu'avec des électrodes de meilleure qualité, nous aurions certainement eu des résultats beaucoup plus intéressants. De plus l'absence d'une membrane échangeuse de proton dans notre module fragilise le transfert des électrons de l'anode vers la cathode et ainsi affecte le rendement des piles végétales. C'est pour dire qu'avec une membrane échangeuse de proton, nous aurions certainement eu de meilleurs résultats dans nos expérimentations. Sans oublier que si la durée des expérimentations avait été augmentée, nous aurions probablement eu des résultats assez différents qui pourraient nous aider à mieux comprendre les facteurs qui entourent le fonctionnement optimal des piles végétales.

## IV. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

### 1. Avantages

La technologie des piles végétale offre plusieurs avantages aux nombreux desquelles nous pouvons citer les suivantes :

- La valorisation de la végétation du pays, car grâce à cette technologie, les plantes seront beaucoup plus valorisées et plus entretenues.
- Cette technologie fonctionne avec beaucoup de types de plantes mêmes si les résultats obtenus varient d'une plante à une autre et plusieurs matériaux d'électrode sont encore à expérimentés pour un meilleur rendement.
- Elle peut être installée un peu partout tant que la plante a de quoi se nourrir et croître aisément.
- Elle est non polluante, discrète, très saine et durable.
- Elle n'a aucun impact sur l'environnement, sur la plante ou encore sur la couche d'ozone. Bien au contraire, elle s'intègre parfaitement à notre écosystème.
- C'est un système très écologique et recyclable compte tenu du matériel qui le compose.
- Elles sont faciles à réaliser même avec un matériel artisanal et donc moins cher.
- Elle peut servir d'isolation pour le toit ou pour collecter de l'eau si elle est utilisée à grande échelle sur une toiture végétalisée et ainsi favoriser la bonne croissance des plantes.
- Elle fonctionne 24h/24 en toutes saisons.
- Les matériaux utilisés dans la réalisation sont totalement écologiques et biocompatibles entre elles.
- Au-delà des toitures végétalisées, cette technologie pourrait devenir une source viable d'énergie renouvelable si elle était déployée à grande échelle

dans les zones humides comme les rizières ou les milieux marécageux pour produire plus d'électricité au mètre carré.

## 2. Inconvénient

Conscient qu'aucun système n'est parfait, cette technologie ne présente pourtant aucun inconvénient que ce soit sur la plante ou sur l'environnement. De plus ses composants sont tous écologiques et les électrodes utilisées sont biocompatibles à la végétation. C'est une technologie qui s'intègre totalement à l'environnement, mais son seul point néfaste reste la faible puissance obtenue jusqu'à ce jour. Ainsi, outre la faible tension produite par le système de pile végétale, elle n'a aucun inconvénient majeur bien au contraire elle reste très autonome et parfaitement écologique.

Cependant, quelques détails doivent encore être améliorés avant le développement à grande échelle de ce procédé et l'amélioration de son potentiel énergétique. Ainsi nous présenterons dans la rubrique suivante quelques perspectives d'amélioration de cette technologie très prometteuse.

## V. PERSPECTIVES D'AMELIORATIONS ET D'EXPLOITATION POSSIBLES

### 1. Perspectives d'améliorations

Le domaine des piles à combustible microbiennes est en plein essor depuis près de quelques années. Comme il a été mentionné plus haut, l'amélioration des performances de la pile végétale impose de revoir certains paramètres et facteurs qui influent sur le rendement du système notamment Les matériaux d'électrodes, la configuration du sol, le type de plante utilisé, ainsi que les paramètres physico-chimiques liées à l'activité des microorganismes dans le sol. Pour cela, les perspectives d'amélioration que nous proposons sont les suivantes :

- Procéder à l'identification des microorganismes présents dans le sol de culture des plantes puis déterminer toute leur caractéristique psycho chimique ainsi que tous les facteurs qui favorisent leur prolifération et leur activité organique dans le sol.
- Etudier les conditions environnementales liées à l'ensoleillement auquel est exposé la plante, le taux d'humidité du sol de culture, la nature du sol, le ph du sol, ou encore de la richesse du sol en nutriments.
- Procéder à la détermination et au choix des matériaux qui devront constituer les différentes électrodes (Anode et cathode) pour de meilleurs rendements.

Notons qu'elles sont généralement constituées de carbone, graphite, inox (Acier inoxydable), platine ou encore carbone vitreux réticulé et peuvent avoir diverses formes (ex : fil, grille, feuille (chiffonnée), plaque, structure conductrice en éponge ou feutre voire en granules, etc. L'objectif est d'avoir une aire de contact avec les micro-organismes aussi vaste que possible.

### - L'Anode

Les matériaux utilisés pour l'anode doivent être stables et surtout biocompatibles. Le cuivre est donc un matériau à proscrire à cause de sa toxicité envers les bactéries. Les anodes actuelles sont principalement à base de carbone, par exemple du graphite ou du carbone vitreux. Il existe diverses formes de graphite : les disques et barreaux sont les plus simples à utiliser et les moins couteux. Utiliser du feutre à base de graphite permet d'augmenter la surface active de l'électrode (Park et al. 1999; Gil et al. 2003). Les matériaux à base de carbone disponible sous forme de plaques, barres, granules ou encore sous forme de matériaux fibreux (feutre, tissu, papier, fibre, mousse) qui sont les plus fréquemment utilisés comme anodes (Pham et al. 2009). En effet, ils sont non seulement stables dans les cultures microbiennes, peu chers, faciles à utiliser, mais ils possèdent en outre de grandes surfaces actives qui permettent d'obtenir de

meilleurs rendements pour les piles (Logan et al. 2006; Watanabe 2008). Il a été démontré que la modification de la surface des anodes à base de carbone avec des polymères organiques conducteurs (la polyaniline étant le plus fréquemment utilisé) permet d'augmenter les densités de courant. (Qiao et al. (2007)). Tout en se servant de matériaux compacts tels que le carbone vitreux, il est possible d'accroître les surfaces actives, en utilisant différentes tailles de pores (par exemple 4 à 8 pores par cm (He et al. 2005)), ou des couches successives de granules de carbone (diamètres entre 1,5 et 5 mm) Rabacy et al. 2005b). Il faut veiller particulièrement à conserver une grande porosité afin d'assurer le transport et la disponibilité des éléments nutritifs pour les bactéries.

### - La Cathode

L'efficacité des réactions à la cathode dépend de la concentration de l'accepteur d'électrons, de la disponibilité des protons qui proviennent de l'anode, de la performance du catalyseur et de la structure de l'électrode. Comme avec les anodes, les matériaux à base de carbone et graphite sont les plus utilisés comme cathodes étant donné leurs prix et performances. Toutefois, l'accepteur d'électrons idéal reste l'oxygène du fait de son potentiel d'oxydoréduction ( $E^\circ = +0,818$  V/ESH (Thauer et al 1977), de sa gratuité et de sa disponibilité. À cause de la faible cinétique électrochimique de la réaction de réduction de l'oxygène sur le carbone, la présence de catalyseur tel que le platine est nécessaire. Le platine étant coûteux, en outre, quand la cathode est placée en milieu le platine est facilement empoisonné par les impuretés, du fait de la richesse en minéraux des milieux de culture utilisés. Cette inhibition intervient très rapidement et rend la cathode peu stable dans le temps. Actuellement, des matériaux moins nobles que le platine tel que le fer (11) pyrolytique, ou le cobalt (COTMPP : cobalt tetramethylphenylporphyrin) sont aussi employés sur la cathode pour la réduction de l'oxygène. Utiliser de tels matériaux à la place du carbone permet de multiplier la densité de puissance par trois ou cinq (Cheng et al. 2006). Il a été prouvé que

l'acier inoxydable permettait de réduire l'oxygène avec des puissances identiques à celles obtenues en présence de platine (Bergel et al. 2005).

**Il faudra donc expérimenter des anodes et des cathodes de matériaux différents pour ensuite comparer les résultats obtenus et déterminer les meilleures combinaisons de matériaux d'électrode possible pour l'obtention de meilleures performances énergétiques.**

- Etudier les différents mécanismes de transfert d'électrons vers l'anode.

Les micro-organismes oxydent différents substrats en produisant des électrons à l'intérieur de leurs cellules. Ces électrons sont ensuite utilisés dans une cascade de réactions via la chaîne de respiration jusqu'au dernier échange avec l'accepteur final d'électrons extracellulaire. Communément il est admis que cet accepteur d'électrons est une molécule soluble comme peut l'être l'oxygène, mais également des acides organiques, des ions minéraux tels que les nitrates, les sulfates ou encore des oxydes métalliques. (Cheng et al. 2006)

Ainsi il faudra identifier le mécanisme de transmission qu'utilisent les microorganismes du sol pour la migration des électrons de l'anode vers la cathode.

Trois mécanismes de transfert d'électrons des bactéries aux électrodes sont connus :

- **transfert direct**, il s'agit du contact physique entre la membrane cellulaire de la bactérie et l'électrode. L'électron est transporté par des complexes transporteurs d'électrons liés à la membrane bactérienne (ex : cytochromes)
- **transfert indirect**, via des médiateurs exogènes tels que du rouge neutre ou des médiateurs endogènes propres à la bactérie (ex : phénazines )
- **transfert via des pili** aussi dits « *nanowires* » qui font un pont conducteur entre l'électrode (ou d'autres cellules bactériennes) et la bactérie.

**Il faudra donc juger de la nécessité d'utiliser des médiateurs exogènes tels que : Le rouge neutre, le bleu de méthylène et la thionine, après identification du mécanisme exact de transfert d'électrons qu'utilisent les microorganismes dans les piles végétales.**

- Etudier l'importance et/ou l'influence de la membrane séparatrice de protons à utiliser pour la pile végétale.

La membrane séparatrice échangeuse de protons, évite le mélange de l'anolyte et du catholyte (s'ils sont différents) et empêche les produits de réaction d'une électrode de s'acheminer vers l'autre électrode. Elle doit être non conductrice, avoir une forte perméabilité aux ions et une faible perméabilité à l'oxygène. Les protons doivent facilement la traverser et elle doit limiter la diffusion de l'oxygène vers l'anode sans trop affecter la résistance interne de la pile (Fan et al.2007b).

En effet, pendant que les électrons se déplacent rapidement de l'anode vers la cathode par conduction électronique dans le circuit externe, les ions sont plus lents à équilibrer les charges par migration dans l'électrolyte. Ce transfert ionique est la cause majeure de la résistance interne. De plus, le transfert lent des protons, qui sont en faible concentration aux pH proches de la neutralité, crée des gradients de pH aux électrodes qui affectent les vitesses de réaction. L'accumulation des protons à l'anode provoque une acidification locale qui ralentit l'activité microbienne d'oxydation. Inversement, la faible disponibilité des protons au voisinage de la cathode réduit la vitesse de la réaction cathodique (Fan et al.2007b).

**Les membranes Nafion et Ultrex sont parmi les plus utilisées dans les piles microbiennes. D'où il faudra expérimenter différentes configurations de pile végétales avec ces différentes membranes afin d'analyser et de comparer les résultats obtenus dans chaque cas.**

- Pensez à une amplification de la tension produite par des convertisseurs de tension continue (DC-DC) ou à la mise en commun de plusieurs pieds de plante en série pour obtenir une tension beaucoup plus importante.

Nous estimons que la prise en compte de ces paramètres devrait permettre d'accroître le rendement des piles végétales encore en expérimentation jusqu'à nos jours pour une meilleure adaptation à nos petits besoins quotidiens en énergie électrique.

## 2. Perspectives d'utilisations possibles

Les perspectives d'utilisations qu'offre cette technologie sont assez diverses. Au nombre de celles-ci nous pouvons citer :

- La mise de point de petites lampes de chevet alimenté par cette technologie de pile végétale, car bien que la tension produite soit assez faible, elle est quand même assez suffisante pour allumer des LEDs.
- La création de parcs verts pouvant éclairer des lampadaires le long de nos routes et ainsi augmenter les espaces verts présents dans le pays.
- L'exploitation des zones marécageuses et des rizeries comme petites centrales de piles végétales pour la production d'électricité et par ricochet produire du riz dans le même temps.
- On pourrait également utiliser les toitures des maisons comme jardinières pour y planter des plantes et dans le même temps produire de l'électricité pour l'alimentation de nos lampes ou la charge de nos téléphones portables. Ainsi les toitures végétalisent seraient de plus en plus vulgarisés et permettrait dans le même temps une isolation thermique pour les toitures, mais aussi représenteraient de petites centrales autonomes de production d'énergie.
- Nos jardins et jardinières domestiques pourraient également servir de sources de production d'énergie grâce à cette technologie très prometteuse.

En gros, cette technologie offre de très grandes perspectives, car elle s'applique à tous les endroits où la végétation est présente. D'où il faudra vraiment penser à son amélioration et aussi à sa vulgarisation dans notre habitat pour son adaptation progressive à nos besoins énergétiques.

## CONCLUSION

Ce travail pourrait contribuer à l'amélioration et la valorisation du potentiel énergétique qu'offre la technologie des piles végétales à combustible microbienne. Toutefois, de multiples facteurs restent à explorer autour du fonctionnement de cette technologie avant une adaptation effective à notre quotidien. Ainsi plusieurs pistes se dressent à nous quant aux possibilités futures d'améliorations et d'implantations des piles végétales à combustible microbiennes dans notre cadre de vies, notamment, en ce qui concerne nos besoins en énergie électrique.

Compte tenu des atouts majeurs que présente cette technologie en expérimentation (Caractère sain, non polluant, discret, écologique, renouvelable et autonome), le gouvernement devrait encourager la promotion des recherches autour d'elle, car elle met en valeur la végétation qui nous entoure tout en conservant l'intégrité de notre écosystème. Elle pourra ainsi faciliter la production de l'énergie dans les zones rurales où la végétation est assez abondante et diversifiée, sans oublier les zones marécageuses où la végétation et l'humidité du sol pourront être exploitées comme petites centrales énergétiques pour les besoins de la population. Cela contribuerait efficacement à la valorisation de la biodiversité puis au développement des énergies vertes, saines, non polluantes, et renouvelables, dans notre pays le bénin.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [A] H. Marjolein, 'Design Criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell: Electricity Generation With Living Plants-From Lab to Application', PhD thesis, 148 p., 2012.
- [B] Ruud A. Timmers, David P.B.T.B. Strick, H.V.M. Hamelers and C.J.N. Buisman, Long-Term Performance of a Plant Microbial Fuel Cell with *Spartina anglica*', Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 86, N°3, pp. 973 - 981, 201
- [C] B. Logan and J. Logan, 'Electricity Producing Bacterial Communities in Microbial Fuel Cells', Trends Microbiology, Vol. 14, N°12, pp. 512 - 518, 2006.
- [D] E. Emly, 'Generating Electricity by 'Nature's', Salt 'B' Online Magazine, Vol. 1, 2012.
- [E] D. Strick, H. Hamelers, J. Snel and C. Buisman, 'Green Electricity Production with Living Plants and Bacteria in a Fuel Cell', International Journal of Energy Research, Vol. 32, N°9, pp. 870 - 876, 2008.
- [F] K. Smalla, G. Wieland, A. Buchner, A. Zock, J. Parzy , S. Kaiser, N. Roskot and H. Heuer, 'Bulk and Rhizosphere Soil Bacterial Communities Studied by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis: Plant Dependent Enrichment and Seasonal Shifts Revealed', Applied and Environmental Microbiology, Vol. 67, N°10, pp. 4742 –4751, 2001.
- [G] E. Baudoin, E. Benizri and A. Guckert, 'Impact of Artificial Root Exudates on the Bacterial Community Structure in Bulk Soil and Maize Rhizosphere', Soil Biology Biochemistry, Vol. 35, N°9, pp. 1183 - 1192, 2003.
- [H] H. Bais, T. Weir, L. Perry, S. Gilroy and J. Vivanco, 'The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms', Annual Review of Plant Biology , Vol. 57, pp. 233–266, 2006.
- [I] P. Chiranjeevi, 'Rhizosphere Mediated Electro-genesis with the Function of Anode Placement for Harnessing Bioenergy through CO<sub>2</sub> Sequestration', Bioresource Technology Journal, Vol. 124, pp. 264 - 370, 2012.
- [J] L. Schampheire, L. Bossche, H. Dang, M. Hoftt, N. Boon, K. Rabaey and W. Verstraete, 'Microbial Fuel Cells Generating Electricity from Rhizodeposits

of Rice Plants', Environmental Science and Technology, Vol. 42, N°8, pp. 3053 - 3058, 2008.

[K] F. Warembourg, 'Le Dégagement de CO<sub>2</sub> dans la Rhizosphère des Plantes', Société Botanique française, Collection Rhizosphère, pp. 77 - 78, 1955.

[L] P. Chiranjeevi, G. Mohanakrishna and S. Venkata Mohan, 'Rhizosphere Mediated Electro-Genesis with the Function of Anode Placement for Harnessing Bioenergy through CO<sub>2</sub> Sequestration', Bioressource Technology Journal, Vol. 124, pp. 364 -370, 2012.

[M] C. Waligora, 'Racines et Sol: un Monde de Communication et d'Equilibres', Techniques Culturales Simplifiées, Vol. 57, pp. 18 – 28, 2010.

[N] David P.B.T.B. Strick, H.V.M. Hamelers, J.F.H. Snel and C.J.N. Buisman, 'Green Electricity Production with Living Plants and Bacteria in a Fuel Cell', International Journal of Energy Research, Vol. 32, pp. 870 – 876, 2008.

[O] D.S. Liesje, 'Microbial Fuel Cell Generating Electricity from Rhizodeposits of Rice Plants', Environmental Science and Technology Journal, Vol. 42, N°8, pp. 3053 –3058, 2008.

[P] X.M. Lozano, S. Hortal, C. Armas and F.I. Pugnaire, 'Interactions Among Soil, Plants and Micro Organisms Drive Secondary Succession in a Dry Environment', Soil biology and biochemistry, Vol. 78, pp. 298 – 306, 2014.

[Q] H. Rismani-Yazdi, S.M. Carver, A.D. Christy and I.H. Tuovinen, 'Cathodic Limitations in Microbial Fuel Cells: An Overview', Journal of Power Sources, Vol., N°2, pp. 683 - 694, 2008.

[R] B.E. Logan, S. Cheng, V. Watson and G. Estadt, 'Graphite Fiber Brush Anodes for Increased Power Production in Air-Cathode Microbial Fuel Cells', Environmental Science and Technology, Vol. 41, N°9, pp. 3341 - 3346, 2007.

[S] B.E. Logan, 'Microbial Fuel Cells', The Pennsylvania State University, WileyInterscience, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

[T] B.E. Logan and J.M. Regan, 'Electricity - Production Bacterial Communities in Microbial Fuel Cells', Trends Microbial, Vol. 14, N°12, pp. 512 - 518, 2006

[U] P. Salvin, 'Etude des Biofilms Electroactifs issus des Milieux humides de la Guyane française- Application aux Piles à Combustible Microbiennes', Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, Cayenne, 2012.