

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LARECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة قاصدي مرباح – ورقلة
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Laboratoire de recherche Dynamique, interaction et réactivité des systèmes



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie de Raffinage

Présenté par :

Meddour Bilal

Rahmani Abdelhay

Thème :

**Biopiles microbienne à base de microalgues une
application pertinente des énergies renouvelable**

Soutenu publiquement le : 13 Juin 2022

Devant le jury composé de :

Mr. Djamal Zerrouki	Pr	Président	UKM Ouargla
Mr. Lati Moukhtar	MCB	Examineur	UKM Ouargla
Mr. Abdelatif Rahmani	MCB	Encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace

Avec l'aide d'ALLAH le tout puissant on a pu achever ce mémoire qui est le fruit de plusieurs années d'étude et que Je dédie à : Tous ceux qui se sont donné toutes les peines et les sacrifices pour me voir réussir dans la vie

- L'être le plus cher de ma vie ; Ma mère que Dieu la protège et La mémoire de mon père, que Dieu l'accorde par son infinie miséricorde

- Mes chers frères.

- Mes chères sœurs.

- Toute ma famille.

- A tous mes amies et mes collègues.

- Tous ceux que j'aime et je respecte.

Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant toutes mes années d'études.

MEDDOUR Bilal

*Quoi que de plus que de pouvoir partager les meilleurs moments
de sa vie avec*

Les êtres qu'on aime.

*Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand plaisir de dédier ce
modeste*

Travail à :

*- L'être le plus cher de ma vie ; L'être le plus cher de ma vie ;
Les deux personnes les plus chères à mon cœur, ma mère et
mon père*

*Qui m'ont donné de l'amour, du soutien et du confort tout au
long de mes études.*

Aux chers membres de ma famille.

A tous ceux qui me sont chères.

*Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant
toutes mes années d'études.*

RAHMANI Abdelhay

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions DIEU, le tout Puissant, qui nous a éclairé le bon chemin et nous a aidées à réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier on encadrant, monsieur **Abelatif Rahmani**, Docteur à l'Université Kasdi Merbah de Ouargla, qui m'a permis et aidé, sous sa direction, à réaliser ce travail, ainsi que pour ses précieux conseils tout au long de cette.

Nous voudrions également remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous tenons aussi à remercier tous les professeurs qui nous ont aidés et qui ont contribué à notre formation durant la période de nos études universitaires.

Finalement, je remercie tout le monde qui de loin ou de près à contribué à la réussite de ce mémoire.

À nos chers parents

À nos familles

À tous ceux qui nous sont chers ..

Résumé

Dans cette étude, nous avons évalué l'efficacité de la production d'électricité à partir de piles à combustible microbiennes.

La cellule comporte trois électrodes à plaque d'aluminium comme anode immergées dans l'électrolyte d'une solution de chlorure de sodium à une concentration de 1 mol par litre, Et deux plaques de charbon cathodique immergées dans des eaux usées urbaines avec des *chlorella pyrenoidosa*, C'était la partie immergée des électrodes 6 cm×2.5 cm×0.1cm.

Cette installation expérimentale nous a permis de produire de l'électricité grâce à des biofilms à activité électrique. Ce sont des consortiums bactériens qui ont la capacité d'échanger des électrons issus de leur métabolisme avec les surfaces solides conductrices des électrodes.

Les Caractéristiques de la cellule sont : La valeur de tension maximale était de 0,61 V et L'intensité maximale du courant est de 19,83 mA , La valeur de puissance maximale est de 12,09 mW. Ces résultats peuvent fournir un guide pour la mise en œuvre d'un processus complet de traitement des eaux usées et de production d'électricité

Les mots clés :

Traitement des eaux usées, Piles à combustible microbiennes, Production d'électricité, *Chlorella pyrenoidosa*

الملخص

في هذه الدراسة، قمنا بتقييم فعالية إنتاج الكهرباء انطلاقاً من خلايا الوقود الميكروبية. الخلية لها ثلاثة أقطاب صفيحة الألومنيوم كأنود مغمورة في الكتروليت محلول كلوريد الصوديوم بتركيز 1مول/ل وصفيحتين من الفحم ككتود مغمورتين في مياه الصرف الصحي الحضري مع الطحالب الدقيقة (*Chlorella pyrenoidosa*). وكان الجزء المغمور للأقطاب 6cmx2.5cmx0.1cm

سمح لنا هذا التركيب التجريبي بإنتاج الكهرباء من خلال الأغشية الحيوية ذات النشاط الكهربائي EA وهي عبارة عن اتحادات بكتيرية، لها القدرة على تبادل الإلكترونات من عملية التمثيل الغذائي الخاصة بها مع الأسطح الموصلة الصلبة للأقطاب الكهربائية. وفيما يلي خصائص الخلية: قيمة الجهد العظمى **0.61 فولت**، وقيمة شدة التيار العظمى **19.83 ملي أمبير** وقيمة الاستطاعة العظمى هي **12.09 ملي واط**. يمكن أن توفر هذه النتائج دليلاً لتنفيذ عملية كاملة لمعالجة مياه الصرف الصحي وإنتاج الكهرباء. **الكلمات المفتاحية:** معالجة مياه الصرف الصحي، خلايا الوقود الميكروبية، توليد الكهرباء، الكلوريلابيريونيدوزا

Abstract

In this study, we evaluated the efficiency of electricity generation from microbial fuel cells.

The cell has three aluminum plate electrodes as anode immersed in the electrolyte of sodium chloride solution at a concentration of 1 mol per liter, and two cathode carbon plates immersed in urban wastewater with *Chlorella pyrenoidosa*, the submerged part of the electrodes is 6cm×2.5cm×0.1cm.

This experimental installation allowed us to produce electricity from electrically active biofilms, These are bacterial consortia that have the ability to exchange electrons resulting from their metabolism with the solid conductive surfaces of the electrodes.

The Characteristics of the cell are : The maximum voltage value was 0.61 V and The maximum current intensity is 19.83 mA, The maximum power value is 12.09 mW, These results can provide a guide for the implementation of a complete wastewater treatment and Electricity generation process.

Keywords :

Wastewater Treatment, Microbial Fuel Cells, Electricity generation, *Chlorella pyrenoidosa*

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
الملخص	
Abstract	
Sommaire	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des annexes	VI
Liste des abréviations et des symboles	VII
Introduction générale	02

Partie bibliographique

Chapitre I : La production d'électricité par piles microbiennes à base de microalgue

I. Introduction	04
I.1. Pile à combustible	04
I.2. Pile à combustible microbienne	05
I.3. Principe de la PACM	05
I.4. Intérêt de la technologie et avantages	06
I.5. Le Biofilm	07
I.5.1. Étapes de formation d'un biofilm	08
I.5.2. Aspects négatifs/positifs	10
I.6. Composants d'une pile à combustible microbienne	11
6.1. Anodes	12
6.2. Cathode	12
6.3. Membrane échangeuse d'ions	12
6.4. Substrat	13
6.5. Résistance externe	13

I.7. Mécanismes de transfert des électrons	13
I.8. Architecture de la PCM	15
I.9. Utilisation de micro-organismes photosynthétiques dans les biopiles microbiennes	18
I .9.1. La biomasse algale comme substrat	18
I.9.2. Des microorganismes photosynthétiques comme catalyseur à l'anode	19
I.9.3. Des microorganismes photosynthétiques aidant les processus cathodiques	19
I.9.3.a. Production de dioxygène	20
9.3.b. Consommation de dioxyde de carbone	20
9.3.c. Production de biomasses valorisables	21
9.3.e. Dépollution d'effluents	21

Chapitre II : Généralités sur la culture des microalgues

II. Introduction	23
II.1. Les microalgues	24
II..2. Éléments majeurs constitutifs des microalgues	25
II.3. Caractéristiques de base des microalgues	26
II .4. Paramètres du développement des microalgues	26
II.5. Différents modes de production de biomasse microalgues	27
II.5.1. Systèmes ouverts	27
II.5.2. Systèmes fermés	29
II.5.3. Systèmes hybrides	29
II.5.4. Photobioréacteur (PBR)	30
II.6. Traitement des eaux usées par culture de microalgues et bactéries	31

Chapitre III : Expérimentale

III.1. Matériel et méthodes	33
III.1.1. Étude et analyse des expériences et des résultats	33
III.1.1.1. Matériels et produits utilisés	33
III.1.1.2. Le montage expérimental	34

III.2. Résultats et discussion	35
III.2.1. Choix de type d'électrodes	35
III.2.2. Les résultats de l'expérience sont présentés dans un tableau et un graphique	36
Conclusion générale	42
Références bibliographiques	44
Annexe	48

LISTE DES FIGURES

N° de figure	Nome de figure	N° P
01	Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible microbienne	5
02	Image MEB (microscopie électronique à balayage) d'un biofilm électroactif sur une anode en graphite	7
03	Les 5 étapes de maturation d'un biofilm	8
04	Mécanisme de transfert direct	14
05	Mécanisme de transfert indirect	14
06	Mécanisme de transfert par plis	15
07	Diverses formes de cellule à double compartiments	16
08	Diverses formes de la cellule mono-chambre	17
09	Diverses formes de la cellule à flux traversant	17
10	Unités individuelles des PCMs en mode continu empilées en parallèle ou en série avec électrode en granules de graphite	18
11	Pile à combustible microbienne à double compartiment, avec une cathode biotique reliée à un photoréacteur	20
12	Dispositif et son schéma du système photo bioélectrochimique intégré	21
13	Diversité des formes des microalgues.	25
14	Bassins : a) Culture de <i>Dunaliella salina</i> en bassins naturels de 200ha.	28
15	Photobioréacteur tubulaire de l'Université de Wageningen Algae Parc	30
16	Montage expérimentale de PACM	34
17	Les électrodes utilisées	34
18	Évolution de la puissance de certains binaires (Anode/ Cathode).	36
19	Évolution de la puissance de Cathode /Anode /Cathode	37
20	Évolution de la puissance en fonction de Trois expériences différentes	39
21	Évolution de la puissance en fonction de la température	40

LISTE DES TABLEAUX

N° de tableau	Nome de tableau	N° de page
01	Différents facteurs environnementaux et microbiologiques influençant l'attachement microbien et la structure du biofilm	10
02	Eléments majeurs constitutifs des microalgues	25
03	Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue	26
04	Matériels et produits utilisés pour dans ce travail expérimental	33
05	Résultat du courant électrique et le voltage et la puissance des différentes électrodes	51
06	Résultat du courant électrique et le voltage et la puissance des différentes électrodes (deux types d'électrodes)	52
07	Résultat du courant électrique et le voltage et la puissance des différentes électrodes (trois types d'électrodes)	52

Liste des annexes

N° d'Annexe	Nome de Annexe	N° de page
01	Multimètre	50
02	Étuve de laboratoire	50
03	Balance analytiques	50
04	Agitateur magnétique chauffant	50
05	Plaque chauffante	51
06	Membrane	51
07	Les algues	51
08	Eau usé	51
09	Électrode zinc	52
10	Électrode aluminium	52
11	Électrode Fer	52
12	Électrode cuivre	52
13	Électrode carbone	52

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

Abréviations	Signification
PBR	Photobioréacteur
PACM	Piles à Combustibles Microbiennes
MFC	Microbial Fuel Cell.
EA	Electroactives.
pH	Potentiel d'hydrogène
MEB	Microscopie électronique à balayage
DCO	Demande chimique en oxygène
NaCl	Chlorure de sodium

INTRODUCTION

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Parmi les sources d'énergie renouvelables aux quelles les scientifiques se sont intéressés récemment, la génération d'électricité par des microorganismes due à l'oxydation de toutes sortes de matières organiques par des biofilms électro active. Cette nouvelle technologie a pour objectif le développement de réacteurs biologiques générant de l'électricité. Ces réacteurs sont souvent appelés "Piles à Combustible Microbiennes" (PCM).

Les PCMs assurent une production de l'énergie en accord parfait avec les principes du développement durable puisque la matière première que les micro-organismes consomment est apportée par les eaux usées domestiques ou industrielles.

Ce qui est intéressant, c'est que souvent, ce système électrochimique et biologique permet de coupler le traitement des eaux usées riches en matière organique et inorganique à la production d'électricité. En effet, ces eaux usées sont également riches en microorganismes, notamment des bactéries, qui, en dégradant la matière organique ou inorganique, produisent des électrons via Pour remédier à ce problème aussi bien économique qu'écologique, l'utilisation des énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte comme une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'environnement. Leurs différentes réactions biochimiques. L'électricité est ainsi produite en captant ces électrons. Les PCM représente donc une solution pour deux grandes problématiques :

- La production d'une énergie verte et renouvelable.
- Traitement d'eau usée [1].

Dans notre projet de master, nous avons évalué l'efficacité d'utilisation des microalgues dans le traitement des eaux usées et la production d'électricité, en se basant sur le principe d'une biopile microbiennes ; Pour expliquer les différentes étapes de notre travail, ce manuscrit préparé selon les étapes suivant :

Ce travail évalue le potentiel de culture de la souche microalgue dans le traitement des eaux usées domestique. En mettant l'accent sur l'efficacité de la culture sur l'élimination des nutriments.

Le premier chapitre est destiné à l'étude de la performance de la biopile à microbienne à base de microalgues.

Le deuxième chapitre est consacré à une revue bibliographique sur la culture des microalgues.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation du procédé et les différents résultats obtenus.

Chapitre I
La production
d'électricité par piles
microbiennes à base
de microalgues

Chapitre I

I. Introduction

Les piles à combustibles microbiennes (PACM) appelées aussi biopiles microbiennes (ou Microbial Fuel Cell, MFC en anglais) sont des dispositifs de génération d'électricité. Elles fonctionnent sur le principe des piles à combustibles avec une partie anodique, productrice d'électrons et une partie cathodique consommatrice d'électrons. Ces transferts d'électrons sont réalisés par des micro-organismes vivants sous forme de biofilms. Ces biofilms qui se développent sur les deux électrodes permettent la multiplication de communautés bactériennes dites électroactives (EA). L'électroactivité bactérienne est définie pour un biofilm comme étant sa capacité à échanger des électrons avec une surface conductrice, sans avoir recours à des médiateurs extérieurs. Les électrons sont produits par leur métabolisme respiratoire (chaîne respiratoire d'oxydo-réduction), l'anode étant utilisée comme accepteur final. Dans leur métabolisme, toutes les bactéries doivent consommer un substrat qui peut être des sucres simples, complexes, mais également de la matière organique.

Le concept de production d'énergie par des bactéries a été lancé au cours du 20ème siècle. La première pile microbienne a été présentée par le botaniste Michael Cresse Potter en 1910. Il semble avoir réussi à produire de l'électricité grâce à des électrodes en platine trempées dans une suspension d'E. coli et de Saccharomyces. En 1931 Barnet Cohen a repris l'idée de Potter en connectant plusieurs piles microbiennes en séries pour augmenter la tension totale des piles microbiennes. [2]

En 2011, 504 articles scientifiques ont été publiés par rapport aux 13 articles scientifiques en 2000. Il faut noter que cette production scientifique qui augmente exponentiellement depuis 2002 est un signe fort du nouvel engouement pour la PACM. [3]

I.1. Pile à combustible

Le principal problème d'une pile ordinaire est l'épuisement progressif des réactifs. En effet, le fonctionnement d'une pile repose sur la mise en contact de deux milieux de composition chimique différente. De la même manière que deux solides de température différente en contact vont homogénéiser leur température par des transferts de chaleur, la pile consomme de part et d'autre ses composants chimiques afin de rétablir l'équilibre thermodynamique. La résolution de ce problème passe par la pile à combustible qui est "un dispositif électrochimique qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique tant qu'un combustible et un oxydant sont fournis.

Le premier exemple de ce genre est la pile à hydrogène, dont le principe de fonctionnement a été mis en évidence par William Grove en 1839, et mis en

pratique par Francis Bacon, qui réalisa en 1953 le premier prototype de capacité industrielle, susceptible de fournir une puissance de quelques kilowatts.

A l'anode, la réaction d'oxydation consomme le dihydrogène et libère des électrons dans le système électrique, tandis qu'à la cathode, la réduction consomme des électrons et du dioxygène de l'air pour produire de l'eau. Les ions H^+ qui traversent l'espace entre les électrodes sont produits lors de la décomposition du dihydrogène et consommés par la réduction. [4]

I.2. Pile à combustible microbienne

Les piles à combustible microbiennes sont caractérisées par "l'utilisation de microorganismes comme catalyseurs." Ceux-ci se déposent sur les surfaces d'échange, aux anodes, et produisent les électrons et les protons H^+ , en décomposant un substrat organique, issu des eaux usées, récupérées en station d'épuration. Si les mécanismes biologiques de décomposition du substrat sont complexes, on connaît néanmoins la réaction de réduction correspondante à la cathode

Le biofilm est l'agrégation de ces microorganismes sur la surface de l'anode, qui dégrade le substrat. Les protons libérés dans l'effluent (les eaux usées) se déplacent jusqu'à la cathode où ils sont consommés, pour produire de l'eau en présence de dioxygène. [4]

II.3. Principe de la PACM

Les piles à combustible microbiologiques (PCM), décrites précédemment, sont des piles galvanostatiques. Elles sont capables de fournir de l'énergie sous forme d'électricité.

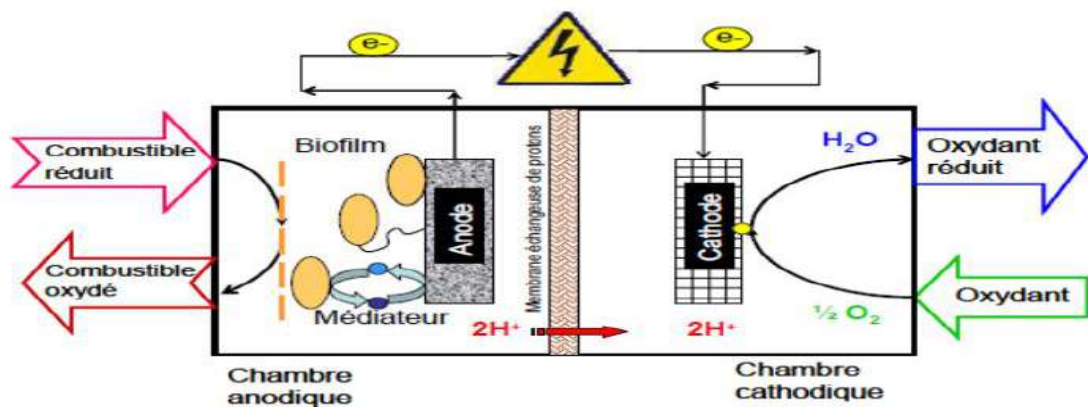
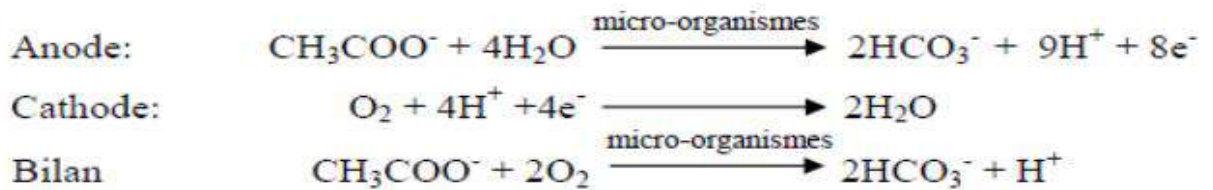


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible microbienne.

Le principe de fonctionnement d'une PCM est illustré sur la Figure 4 ci-dessus. Les bactéries adhérentes sur la surface de l'anode forment des films appelés biofilms électroactifs (EA), qui catalysent à l'anode le transfert des électrons issus de l'oxydation des composés organiques fournis en tant que substrats comme l'acétate, l'acide lactique, le glucose, etc... L'anode est alors appelée bioanode ou anode biologique. Les électrons circulent dans un circuit externe jusqu'à la cathode (biotique ou abiotique). A la cathode, les électrons sont utilisés dans des réactions de réduction catalysées (biotiques) ou non (abiotiques) par des bactéries. Ces deux compartiments (anodique et cathodique) sont séparés par une membrane échangeuse d'ions. L'anode et la cathode sont connectées par un circuit électrique externe représenté par une résistance électrique. Pour nos études, nous connectons une résistance électrique variable, habituellement fixée à 1 kΩ, aux bornes de la pile. [5]

Dans beaucoup de piles à combustible microbiologiques étudiées en laboratoire, la pile oxyde à l'anode l'acétate comme combustible et est équipée d'une cathode à air abiotique qui assure la réduction du dioxygène. Les réactions chimiques globales en jeu dans ce type de piles à combustible microbiologiques sont les suivantes : [3]



I.4. Intérêt de la technologie et avantages

Les piles microbiennes présentent des avantages majeurs, notamment

- La possibilité d'exploiter des déchets non-valorisés s'ils sont riches en micro-organismes tels que les effluents industriels, les effluents urbains, les déchets agricoles et des industries agro alimentaires, les eaux usées domestiques, les sédiments marins, etc.
- Le biofilm EA catalyseur est capable de se régénérer naturellement grâce aux constituants du milieu et peut ainsi être stable pendant de longues durées, plusieurs mois, voire quelques années.
- La production d'énergie électrique dans des conditions indépendantes des rythmes diurne/nocturne contrairement par exemple à l'énergie éolienne ou solaire. [6]

I.5. Le Biofilm

Généralement, les microorganismes vivent au sein de communautés microbiennes organisées sur des surfaces appelées biofilms (Figure 5). Les biofilms sont enrobés d'une matrice extracellulaire de substances polymériques, en général des exopolysaccharides comme principale composante, mais des protéines, des acides nucléiques et des lipides ont également été recensés. Il a été montré que plus de 99% des bactéries se développent en biofilms) sur une grande variété de surfaces, c'est-à-dire toutes les surfaces terrestres, les métaux, les plastiques, les surfaces minérales (pierres, bétons) et les tissus vivants (tissus humains, feuilles et racines des végétaux).

Lens et al (2003) ont montré aussi que tous les systèmes dans lesquels l'eau est en contact avec une surface solide sont susceptibles de servir de support à la formation d'un biofilm qui peut être constitué d'une seule espèce bactérienne ou de plusieurs espèces de bactéries.

En général, un biofilm est une communauté sessile plus ou moins complexe, adhérant à une surface des microorganismes d'une manière irréversible entre eux enrobés dans une matrice exopolymérique extracellulaire auto-produite.

Dans un biofilm, les cellules microbiennes ne présentent qu'environ 15% du volume total, 85% du reste du biofilm est une matrice d'exopolymères hydratée.
[5]

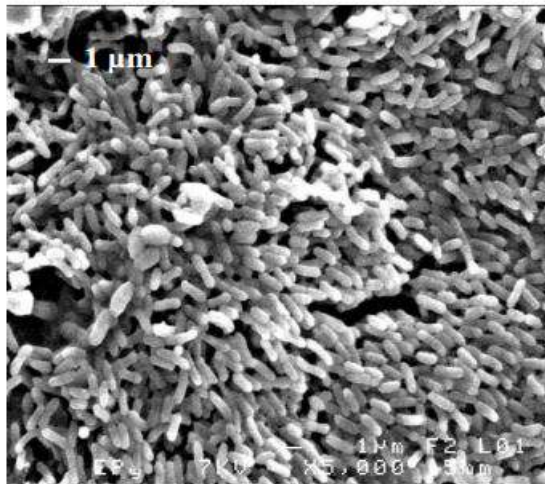


Figure 2 : Image MEB (microscopie électronique à balayage) d'un biofilm électroactif sur une anode en graphite.

I.5.1. Étapes de formation d'un biofilm

La formation d'un biofilm sur une surface est le résultat d'un ensemble de processus physiques, chimiques et biologiques. Elle se compose de cinq étapes successives

La formation des biofilms sur un support solide est actuellement bien connue et détaillée dans la Figure 3, simplifiée, ci-dessous. [5]

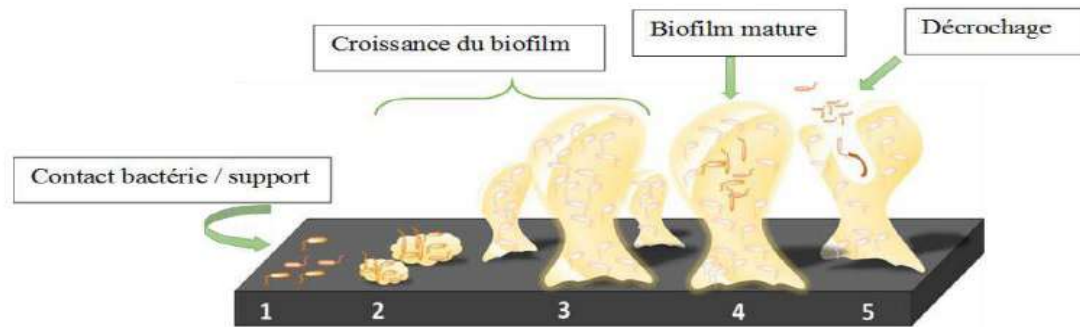


Figure 3 : Les 5 étapes de maturation d'un biofilm. 1 : transport et adsorption des microorganismes sur la surface inerte; 2: attachement irréversible; 3: colonisation et croissance; 4 : maturation ; 5: dispersion.

❖ Étape 1 : Transport et adsorption

Toute adsorption de microorganismes à une surface suppose le rapprochement de ces derniers avec le support. Le transport des particules de petites tailles (0.01 à 0.1 μm) vers la surface peut être décrit en termes de diffusion. Pour les particules de grandes tailles (0.5 à 10 μm), comme la plupart des microorganismes, elles se déplacent sous l'effet de l'hydrodynamique pour adhérer à la surface. Pendant cette étape, les liaisons mises en jeu sont des liaisons non covalentes ; des liaisons de type Van der Waals (pour des distances $> 50 \text{ nm}$), des interactions électrostatiques (entre 10 et 20 nm) et des interactions acide-base de Lewis ($< 1.5 \text{ nm}$), dépendant de la nature de la surface.

❖ Étape 2 : Attachement irréversible

Cette étape peut être considérée comme l'étape clef de la formation du biofilm. C'est l'étape de l'installation et de la fixation des cellules au support et entre elles. L'irréversibilité de l'adhésion fait appel au métabolisme bactérien. En effet, l'attachement des bactéries sur la surface est assuré par la sécrétion d'exopolysaccharides : l'adhésine, le lipopolysaccharide A dans le cas des surfaces hydrophobes et le lipopolysaccharide B dans le cas des surfaces hydrophiles (Makin and Beveridge, 1996). Cela leur permet de consolider leur adhésion en formant autour de la bactérie une enveloppe, appelée glycocalyx, d'une part, et par les interactions de faible énergie de nature électrostatique avec les groupements phosphate et carboxylate d'autre part. En 1994, Suci et al. ont

montré que cette matrice d'exopolymères peut représenter jusqu'à 59 à 75% du volume de biofilm.

❖ **Étape 3 : Colonisation et croissance**

Pendant cette étape, et lorsque les bactéries sont fixées de manière irréversible au support, les microorganismes se divisent pour former des micro-colonies qui vont recouvrir tout ou partie de la surface (en quelques heures ou quelques mois selon la nature et les propriétés de surface, la nature des bactéries et la quantité de matière organique biodégradable disponible). En plus de la multiplication de ces cellules, la croissance du biofilm peut également être attribuée à des cellules planctoniques venant se greffer à sa surface. Généralement, la croissance des bactéries se caractérise par le développement d'un biofilm plus épais.

❖ **Étape 4 : Maturation du biofilm**

La phase de maturation du biofilm se caractérise par une augmentation de la taille de la structure via la multiplication cellulaire jusqu'à acquérir une structure tridimensionnelle et l'évacuation importante des produits issus de l'activité métabolique. Lors de cette étape des canaux se forment pour permettre la circulation des nutriments et de l'oxygène ou autres molécules dans les régions profondes du biofilm. À ce stade, et après la maturité du biofilm, l'évolution de son épaisseur se ralentit jusqu'à stabilité.

❖ **Étape 5 : Dispersion du biofilm**

Après vieillissement du biofilm, ce dernier, ou un fragment de ce dernier, se détache et se disperse. C'est-à-dire que les formes planctoniques sont libérées à l'extérieur de la matrice formée et sont prêtes à coloniser de nouveau d'autres surfaces plus favorables.

L'attachement microbien et la structure du biofilm dépendent de nombreux facteurs environnementaux et microbiologiques.

De nombreux paramètres, présentés dans le Tableau 1, peuvent intervenir et affecter la structure du biofilm. Tous ces facteurs vont donc plus ou moins favoriser l'attachement, l'adhésion et la croissance de microorganismes pour former un biofilm.

Tableau 1 : Différents facteurs environnementaux et microbiologiques influençant l'attachement microbien et la structure du biofilm.

Effets de milieu	Effets de la composition microbiologique	Effets de de la surface ou de l'interface
- Température	- Surface cellulaire	- Nature de la surface
- pH	(protéines,	- Rugosité de la surface
- Intensité lumineuse	lipopolysaccharides,	- Hydrophobicité de la surface
- Concentration en substrat	exopolysaccharides, ...)	
- Vitesse d'écoulement de l'eau (hydrodynamique)	- Appendices extracellulaires (flagelles ou fimbriae (pili))	
	- Hydrophobicité de la surface cellulaire	

I.5.2. Aspects négatifs/positifs

5.2.1. Aspects négatifs

Les biofilms sont souvent dénoncés aux vues des conséquences qu'ils engendrent. Lutter contre le développement biofilms est, par exemple dans le domaine médical, un enjeu important. Les biofilms sont responsables de certains problèmes de santé publique. En effet, 65% des infections bactériennes chez l'homme impliquent des biofilms. Les biofilms peuvent se former au niveau de cathéters ou d'implants (valves cardiaques, prothèses de hanches), et attaquer des tissus corporels comme les dents, les yeux, les poumons, les oreilles ou le tractus urogénital. Ces infections dans les hôpitaux sont connues sous le terme d'infections nosocomiales. Le biofouling, la biocorrosion, l'endommagement des matériaux ainsi que la contamination lors de la fabrication de produits alimentaires sont des problèmes industriels constants et coûteux. Par exemple, les biofilms peuvent dégrader les propriétés organoleptiques de produits alimentaires. De plus, en se développant dans les circuits de refroidissement ils peuvent engendrer une diminution des capacités d'échange thermique. Les activités marines et portuaires font face à de graves problèmes liés aux biofilms marins. La corrosion induite par les micro-organismes (Microbiologically Influenced Corrosion : MIC) ou biocorrosion est estimée chaque année à 5 milliards d'euros en France et a fait l'objet de nombreuses études. [7]

5.2.2. Aspects positifs

Dans les eaux, sur et sous terre, les biofilms sont des composants essentiels des environnements naturels. Les micro-organismes constituent la majeure partie de la biomasse vivante terrestre et en tant que tel a un rôle majeur dans le recyclage des éléments essentiels à la vie³. Les bactéries ont été associées à la

formation de plusieurs types de rocs sédimentaires et de minéraux. D'autre part, les biofilms ont été utilisés depuis des siècles avec succès dans le traitement des eaux et des eaux usées. Des ingénieurs anglais ont développé le premier filtre à sable pour traiter les eaux dans les années 1860. Dans ce type de filtration, la surface du filtre joue le rôle de support pour l'adhésion des bactéries, qui forment ainsi un biofilm apte à dégrader la matière organique de l'eau. La biomasse immobilisée sur le filtre est évacuée durant le cycle de rétrolavage. Dans les sols, la morphologie des biofilms peut être très variable, allant de quelques colonies à d'épais biofilms, selon les conditions environnementales. Quand des contaminants toxiques (tel que le gasoil, l'essence, ou les solvants chlorés) sont accidentellement rejetés dans le sol, la population bactérienne doit s'adapter à la nouvelle composition du milieu afin d'utiliser ces contaminants comme substrat. Ce procédé est appelé bioremédiation et s'il fonctionne bien, il a la capacité de transformer les matières organiques toxiques en sous-produits inoffensifs. La biolixiviation est l'utilisation de micro-organismes pour extraire des métaux d'un minerai. La lixiviation consiste à séparer une substance soluble d'une structure solide. Pour cela, le solide est incorporé à une préparation liquide qui facilite son extraction. En ce qui concerne la biolixiviation, on utilise une solution bactérienne. La biolixiviation est un procédé utilisé actuellement à grande échelle, à des fins commerciales comme par exemple dans le cas de la biolixiviation du cuivre, ou d'une pyrite cobaltifère (Usine du Bureau de Recherches Géologiques et Minières en Ouganda). De nos jours, environ 10 à 20% des cuivres miniers des USA sont extraits par des procédés faisant intervenir des bactéries. Il existe un investissement considérable dans l'extension des procédés de biolixiviation aux métaux tels que l'uranium, l'argent, l'or et enfin le molybdène. Les micro-organismes sont aussi utilisés pour la biooxydation, non pour extraire les métaux mais pour les préparer en vue de cette opération. La biooxydation est principalement employée lors de l'extraction de l'or. Des micro-organismes capables de dégrader l'enrobage minéral des minerais d'or par oxydation avant le procédé d'extraction.

Ces interactions bactérie/éléments métalliques sont un point clé des piles à combustible microbiennes (PACMs). En effet, la plupart des bactéries isolées des PACMs sont des bactéries métallo-réductrices. [7]

II.6. Composants d'une pile à combustible microbienne

Les piles à combustible microbiennes sont généralement composées de :

- Anodes
- Cathodes
- Membrane échangeuse d'ions
- Substrat
- Résistance externe

6.1. Anodes

Les électrodes à l'anode doivent présenter un certain nombre de caractéristiques : La conductivité, la compatibilité biologique et la stabilité chimique dans l'électrolyte. Ils sont disponibles sous plusieurs formes : plaques, barres, granules ou encore sous forme de matériaux fibreux (feutre, tissu, papier, fibre, mousse) qui sont les plus fréquemment utilisés comme anodes même s'ils ont une résistivité au transfert d'électrons 1000 fois supérieure à celle des métaux.

En effet, ils sont stables dans les cultures microbiennes, moins chers, faciles à utiliser, et ils ont des grandes surfaces actives ce qui augmente le rendement pour les PCMs [8]

6.2. Cathode

Le fonctionnement de ce composant est influencé par plusieurs facteurs intrinsèques : les accepteurs d'électrons, les protons qui provenant de l'anode, la structure du catalyseur et ses performances. Le carbone est le graphite sont les composants les plus utilisés dans les matériaux de la cathode vue leurs prix et leurs performances et ils doivent être enrichis par des catalyseurs.

L'oxygène est l'oxydant le plus utilisé à la cathode vue sa présence dans l'air. Sa réduction à la cathode conduit à la production de H₂O qui a un important potentiel d'oxydation :



Pour que l'oxygène contenu dans l'électrolyte à la cathode soit bien transmis vers la surface de la cathode, un barbotage est nécessaire. Il est nécessaire de signaler que vue la faible solubilité de l'oxygène dans l'eau les performances des piles sont limitées par le transport de cet élément. Pour limiter l'effet de cela, les cathodes à air qui exposent l'une de leurs faces à l'air sont utilisées. Toutefois, et vue la faible cinétique de réduction de l'oxygène, et pour éviter les fortes surtensions enregistrées aux surfaces des électrodes, la recouverte des cathodes par une couche de catalyseur comme le platine est nécessaire. Le rôle de catalyseur joué par le platine est limité par la possibilité de son empoisonnement par les composés présents dans les eaux usées et par les valeurs neutres et alcalines du pH. [8]

6.3. Membrane échangeuse d'ions :

C'est le séparateur entre l'anode et la cathode. Elle doit se caractériser par une forte perméabilité aux ions et une faible perméabilité à l'oxygène. Elle aussi être non conductrice pour éviter passage des électrons en dehors du circuit externe. La membrane doit aussi arrêter la diffusion de l'oxygène sans avoir un effet remarquable sur la résistance interne de la pile, de plus elle doit assurer l'électro-neutralité du milieu en permettant le passage facile des protons.

Le Nafion® et l'Ultrex® représentent les membranes échangeuses les plus utilisées pour les piles à combustibles microbiennes. [8]

6.4. Substrat

Le substrat représente le combustible à la pile, c'est la source d'énergie (matières organiques) pour les microorganismes. La puissance et le rendement faradique de la PCM sont affectés par la nature du substrat à travers son influence sur la communauté bactérienne qui compose le biofilm. A l'anode des PCMs, le substrat de référence le plus utilisé est l'acétate car il est rapidement biodégradable et fermentescible ce qui assure donc qu'il ne soit pas consommé par d'autres voies métaboliques que la respiration de l'anode. [8]

6.5. Résistance externe

La résistance externe utilisée dans la PCM est variable pour pouvoir contrôler la différence de potentiel entre les deux électrodes, on procède donc à la mesure de la puissance produite pour chaque résistance.

Chaque système est caractérisé par sa résistance interne. L'efficacité du système en dépend inversement. Sa mesure se fait à partir de la courbe de polarisation du réacteur. Au moment où les résistances interne et externe ont les mêmes valeurs, la pile produit le maximum de puissance.

L'utilisation d'une résistance externe de 1000 ohms comme valeur standard est référencée dans plusieurs travaux de recherche et cela se justifie par le besoin de faire débiter les piles sur de longues périodes. D'autres travaux préfèrent l'utilisation de la valeur de la résistance que génère la puissance maximale. [8]

I.7. Mécanismes de transfert des électrons

On peut citer trois types de mécanismes de transfert des électrons entre les bactéries et les électrodes :

- ✓ **Le transfert direct** : Ce transfert a lieu dans le cas du contact direct entre la membrane de la cellule bactérienne et l'anode. Dans ce cas, il n'y a pas besoin d'espèces redox dissoutes pour le transport d'électrons. Les surfaces des cellules de certaines bactéries sont dotées des protéines qui ont un pouvoir redox (cytochrome), assurant le passage des électrons de l'intérieur vers l'extérieur de la cellule bactérienne, au niveau d'une anode ou accepteur solide d'électrons. Ce type de transfert ne peut fonctionner qu'avec la couche des bactéries qui a un contact direct avec le matériau de l'électrode. [9]

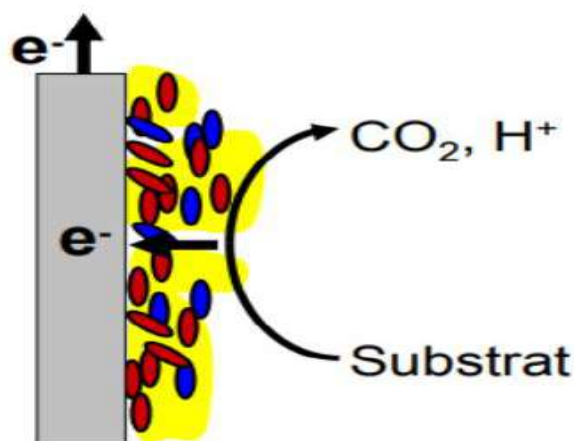


Figure 4 : Mécanisme de transfert direct

- ✓ **Le transfert indirect :** Ce transfert se fait par le biais d'un intermédiaire électrochimique (molécule) qui possède la capacité de s'oxyder et de se réduire en cycles successifs. Elle doit être capable de traverser la membrane cellulaire dans son état oxydé, d'accepter des électrons à l'intérieur de la cellule et de quitter cette dernière dans son état réduit pour accepter un électron à la surface de l'anode et se ré-oxyder. Ce transfert d'électrons a lieu grâce à des médiateurs exogènes comme le rouge neutre ou des médiateurs endogènes produits par les microorganismes eux-mêmes, tel que les phenazines. [10]

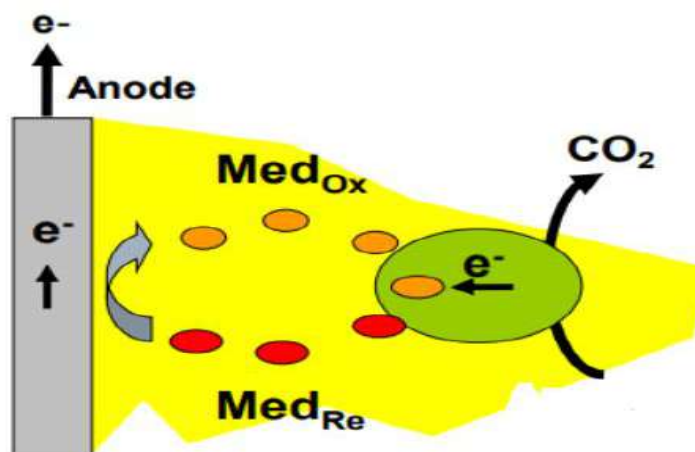


Figure 5 : Mécanisme de transfert indirect

- ✓ **Le transfert grâce à des Pilis :** Dans Certains cas, les bactéries produisent des pilis conducteurs. Ces pilis sont des nano-fils qui ont la possibilité de réaliser des connections électriques avec les bactéries primo-adhérentes ou directement avec l'électrode elle-même. Ces nano-fils permettent le développement de biofilms électro-actifs épais capables d'utiliser un accepteur même distant, ce qui augmente les performances anodiques. [11]

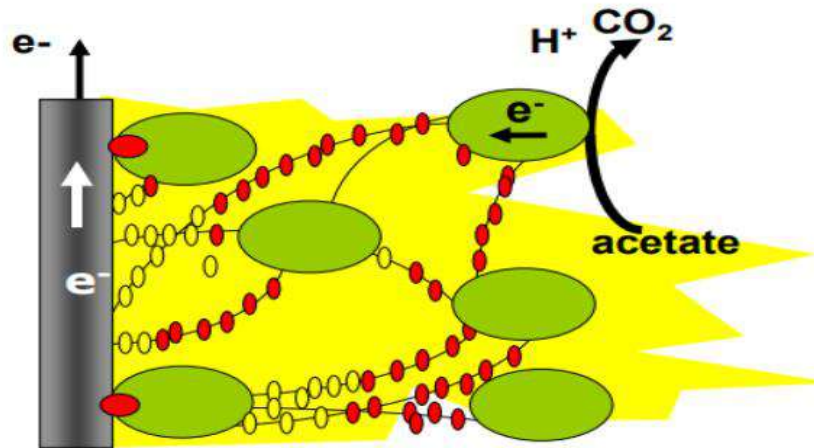


Figure 6 : Mécanisme de transfert par pilis

I.8. Architecture de la PCM

On peut citer quatre types de conception de cellule pour la PCM :

- Cellules à double-compartiment
- Cellules mono-compartiment
- Cellules à flux traversant
- Les empilements

a) Cellules à double-compartiment

Ce système est composé d'un compartiment anodique et un autre cathodique et un dispositif échangeur d'ions qui les sépare. Il prend différentes formes géométriques (cylindriques, rectangulaires, ou serpentin). Cette configuration est adaptée au cas de besoin de contrôler individuellement la composition de l'anode et de la cathode. La figure10 représente un ensemble de cellules à double compartiment de formes géométriques différentes. [12]

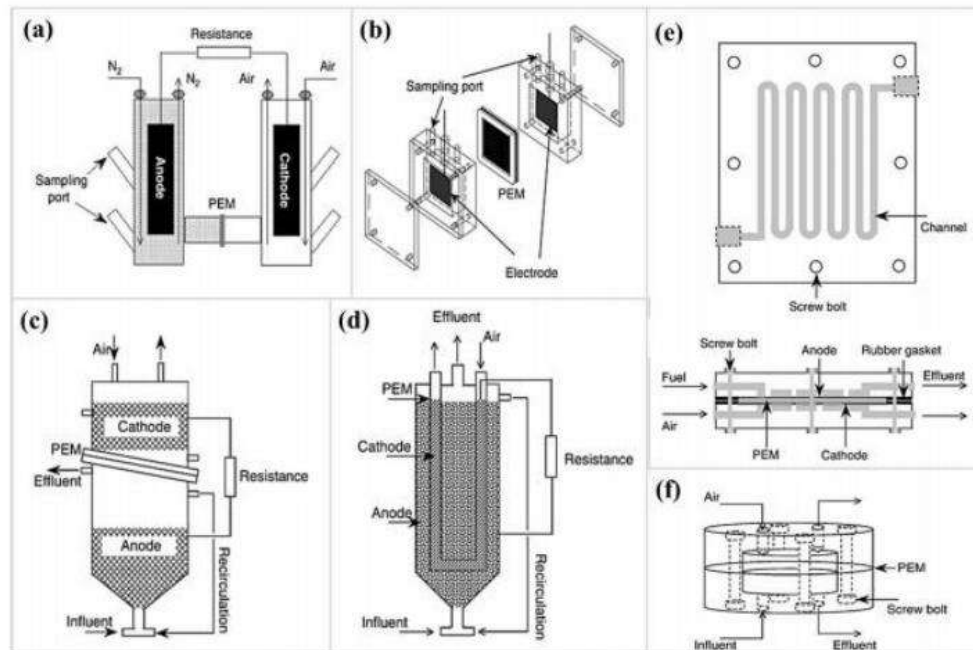


Figure 7 : Divers formes de cellule à double compartiments

b) Cellules mono-compartment

Les cellules à compartiment unique consistent à utiliser des cathodes à air c'est-à-dire que l'absence de catholyte rend le compartiment cathodique obsolète. Le catholyte où sont dissous les protons, diffuse directement de l'anolyte pour les systèmes sans membrane ou à travers un séparateur (Membrane d'échange ionique) vers la cathode.

Les PCMs à cathode à air possèdent plusieurs avantages qui sont :

- La cathode est aérée sans consommation d'énergie ;
- L'eau est produit par la réduction de l'oxygène ;
- Le design de ce type de système est non couteux ;
- Des valeurs élevées des puissances sont facilement atteintes vue la petite taille des cellules.

Cependant, ces deux derniers avantages sont discutables dans la bibliographie vue le cout élevé de la cathode et la perte de performance lors de l'exploitation. [13]

La figure 8 représente l'ensemble des figures de conception des cellules mono-compartment

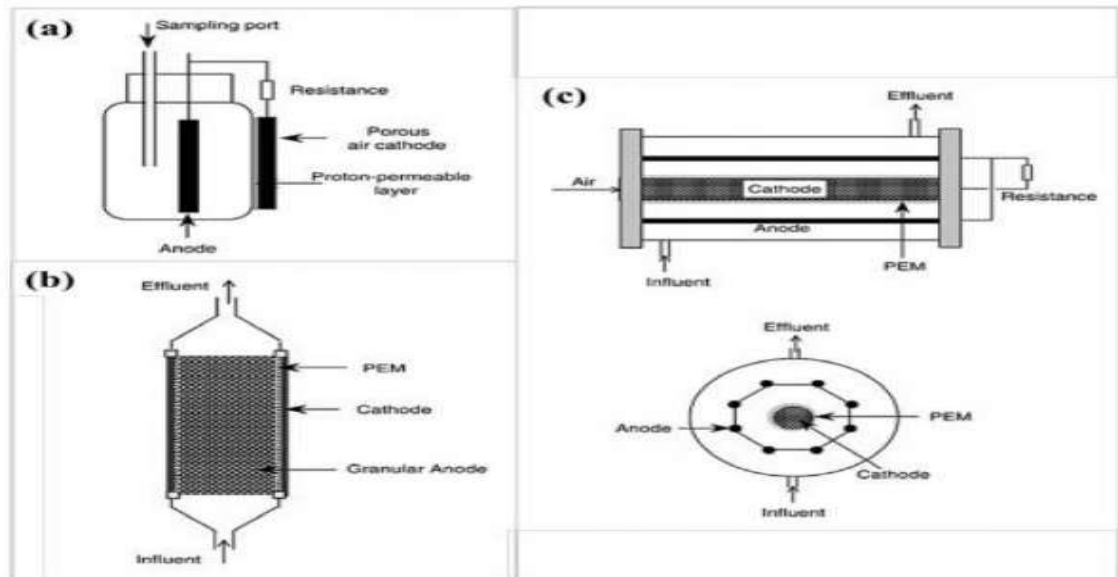


Figure 8 : Divers formes de la cellule mono-chambre

c) Cellule à flux transversal

Dans ce cas, l'électrolyte est en circulation continue de l'anode vers la cathode. Le transport des protons ne se fait plus par diffusion à travers une séparation perméable mais par convection forcée. Ce type de PCMs qui permet d'atteindre des densités de puissance relativement élevées est sans membrane, à faible coût et à configuration simple.

La figure 9 représente l'ensemble des cellules à flux transversal, les plans des figures (a) et (b) sont adoptés par Du et al, et le plan de la figure (c). [14]

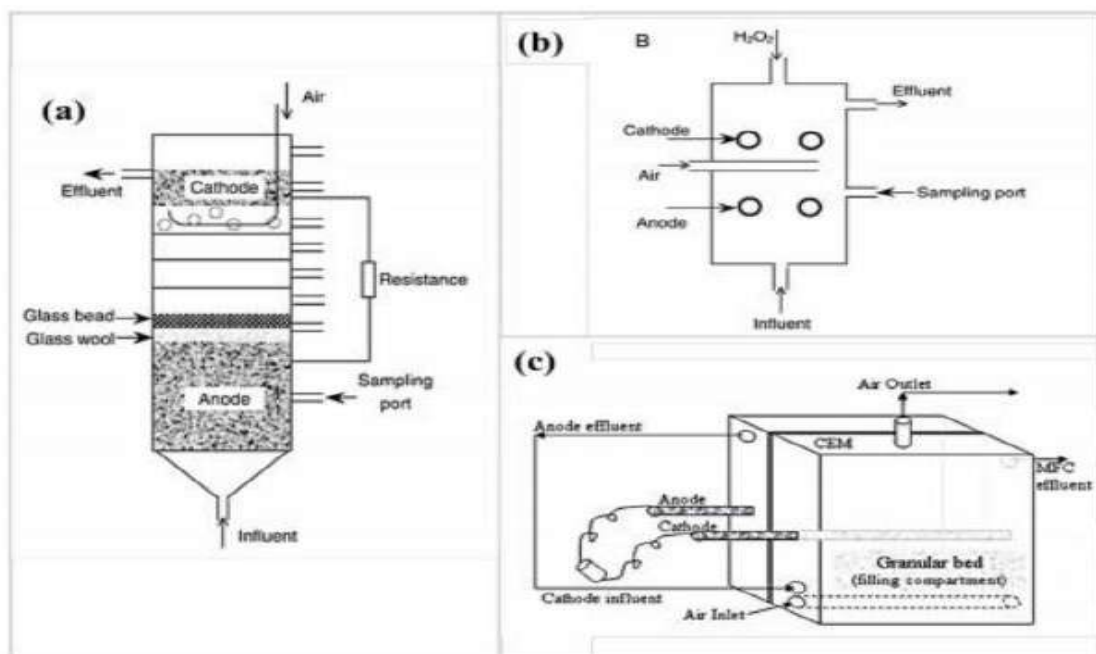


Figure 9 : Divers formes de la cellule à flux transversal

d) Empilements

Dans le but d'augmenter la tension et le courant, les PCMs sont connectées en série ou en parallèle. Les performances des systèmes obtenus après empilement dépendent des performances de chaque PCMs. C'est ainsi que dans le cas de la connexion des PCMs en série, la tension augmente et le courant circulant reste constant et dans le cas de la connexion en parallèle le courant augmente.

Le rendement faradique se varie d'une manière remarquable selon que les PCMs sont montées en série ou en parallèle. Dans les mêmes circonstances, la mise en parallèle des PCMs donne un rendement faradique près de 6 fois supérieur à celui obtenu à la mise en série. La connexion en parallèle permet de maximiser l'élimination de la demande chimique en oxygène (DCO). [3]

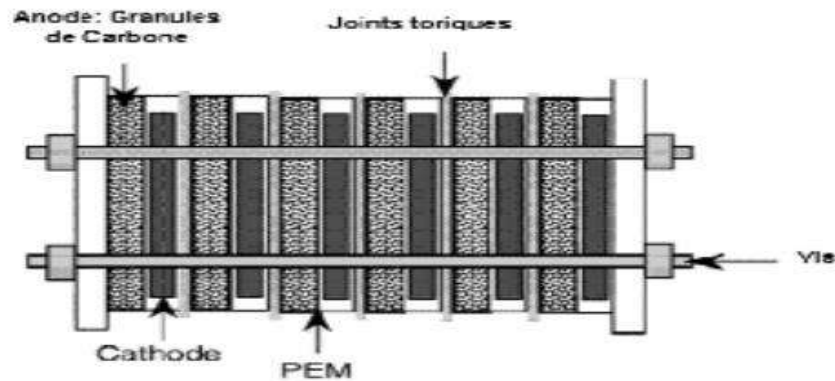


Figure 10 : Unités individuelles des PCMs en mode continu empilées en parallèle ou en série avec électrode en granules de graphite

I.9. Utilisation de micro-organismes photosynthétiques dans les biopiles microbiennes

L'intégration de micro-organismes photosynthétiques au sein de biopiles microbiennes pour aider la production électrique est en plein développement. Ces microorganismes peuvent être utilisés de trois manières différentes : (1) comme un substrat aux producteurs d'électrons, (2) en catalysant les réactions à l'anode, (3) en catalysant les réactions cathodiques.

9.1. La biomasse algale comme substrat

La plupart des bactéries sont hétérotrophes. C'est à dire que leur source de carbone est une molécule organique déjà existante comme par exemple des micro-algues. Les microalgues par contre, sont autotrophes, leurs sources de carbone sont le dioxyde de carbone de l'air ou les ions carbonates et bicarbonates du milieu aqueux.

La biomasse algale peut servir de source d'énergie lors de la digestion anaérobie à l'anode. Celle-ci peut être utilisée directement (après culture ou produit naturellement) ou sous forme de matière sèche. En 2008, Strik et son équipe ont connecté un photobioréacteur 7 à une biopile microbienne. Celui-ci fournit la biomasse algale comme substrat anodique. De l'électricité est produite mais l'efficacité reste faible avec 2,8 % d'efficacité coulombique (rendement faradique).

Dans une pile simple compartiment, la production d'électricité à partir de matière sèche issue de deux espèces différentes est comparée. La biomasse (microalgue) permet de récupérer plus d'énergie qu'avec la microalgue. [3]

9.2. Des microorganismes photosynthétiques comme catalyseur à l'anode

L'utilisation de biofilms mixtes contenant un ensemble de micro-organismes dont certains phototrophes 8 aérobies ou anaérobies passe par une compréhension plus approfondie de leurs rôles ainsi que leurs identifications. Certaines bactéries sont phototrophes et anaérobies. C'est par exemple le cas de la bactérie *Rhodo pseudomonas palustris* qui a été isolée d'un biofilm anodique et qui montre une grande capacité dans le transfert direct d'électrons vers l'anode.

L'équipe de Chandra et Subhash a montré que lors de l'utilisation d'un mélange de micro-algues au sein de la boue dans le milieu anodique, l'oxygène dissous limite les performances de la biopile microbienne. Une autre de leurs études montre qu'en utilisant un mélange de micro-organismes phototrophes aérobies et anaérobies, la génération d'électricité est plus importante à la lumière qu'à l'obscurité malgré l'augmentation de la concentration en dioxygène dissous à l'anode. Cela serait dû à la présence en plus grand nombre des phototrophes anaérobies gardant leurs conditions anaérobies dans leurs micro-environnements autour de l'anode.

L'analyse microbienne d'une étude menée par Badalamenti et al. En 2013 révèle que la famille des chlorobi, bactérie verte sulfureuse anaérobie est la famille dominante des photoautotrophes du biofilm anodique. Elles utilisent des ions sulfures, de l'hydrogène ou des ions ferreux comme donneurs d'électrons et produisent du soufre élémentaire. Des bactéries électroactives non phototrophes comme *Geobacter* ont également été retrouvées. Ces résultats suggèrent que les bactéries phototrophes jouent un rôle clé dans la production d'électricité au sein des biopiles microbiennes. [16]

9.3. Des microorganismes photosynthétiques aidant les processus cathodiques

L'ajout de microorganismes photoautotrophes dans le milieu cathodique Figure (6) permet plusieurs avantages : (a) la production de dioxygène, (b) la consommation du dioxyde de carbone, (c) la production de biomasses valorisables ou (iv) la dépollution d'effluents. [16]

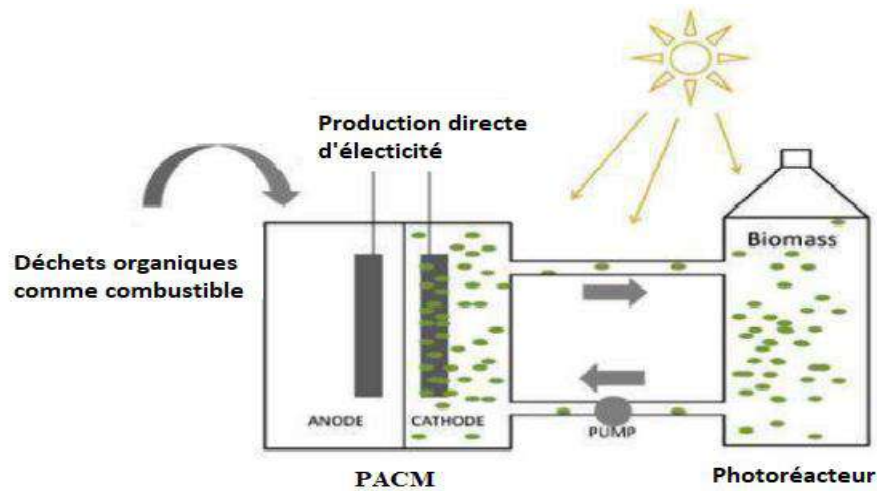


Figure 11 : Pile à combustible microbienne à double compartiment, avec une cathode biotique reliée à un photoréacteur

9.3.a. Production de dioxygène

Pour qu'une pile microbienne fonctionne, une différence de potentiel est nécessaire entre les deux électrodes (anode et cathode). La concentration en dioxygène peut aller jusqu'à 20 mg/L, ce qui est comparable et même plus important qu'avec une aération mécanique. Les résultats de différentes équipes montrent que la génération de courant dans des biopiles peut être stimulée par l'éclairage de micro-organismes photosynthétiques présents dans le milieu cathodique. De plus, les variations de la concentration en dioxygène simultanément à celles de la production d'électricité montre bien l'effet bénéfique de la production d'oxygène par photosynthèse.

Par des études avec des cultures pures de micro-algues (*C.vulgaris* par exemple), il est clairement identifié que les micro-organismes photosynthétiques fournissent de l'oxygène à la cathode et que cet oxygène est réduit en accepteur d'électrons. Il est également intéressant d'examiner si ces micro-organismes phototrophes ont plus de fonctions que juste l'apport en oxygène au milieu, comme être un biocatalyseur de la réduction de l'oxygène. E.E. Powell en 2009 a conclu dans son étude que *C.vulgaris* pouvait agir comme un accepteur d'électrons en présence d'un médiateur (le bleu de méthylène). [16]

9.3.b. Consommation de dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est la source carbonée pour les micro-organismes photosynthétiques et le procédé de photosynthèse implique la réduction du dioxyde de carbone. Les piles à combustibles microbiennes avec une biocathode photosynthétique peuvent donc — "fixer" du CO₂. Le dioxyde de carbone peut provenir d'une source extérieure (usines, combustion d'énergies fossiles...) et ainsi diminuer l'impact carbone de l'industrie. Le CO₂ peut également provenir du compartiment anodique de la pile à combustible microbienne, C'est le cas de l'étude réalisée par Wang et al. Dans cette —microbial carbone capture

cell, tout le CO₂ gazeux généré à l'anode est injecté et absorbé par la cathode pour la croissance des micro-algues.[16]

9.3.c. Production de biomasses valorisables

Par la photosynthèse, la biomasse de micro-organismes photosynthétiques croît. Cette biomasse peut être utilisée dans la production d'énergie (biodiesel, éthanol, hydrogène, méthane...) ou de composés à valeurs ajoutée (compléments alimentaire, pigments, molécules pharmaceutiques...). Les informations données dans les études sont principalement sur la quantité de la biomasse algale en suspension dans le milieu aqueux. La récolte d'énergie issue de biomasse algale produite dans les systèmes de piles à combustible microbiennes reste un challenge important. [16]

9.3.e. Dépollution d'effluents

Bien que la croissance de micro-algues alimentées par de l'eau usée peut permettre à la fois l'élimination de contaminants et la production de biomasse, dans la plupart des PCM avec une cathode photosynthétique, l'eau usée naturelle ou synthétique n'est introduite que dans le compartiment anodique. La corrélation entre dépollution et présence de micro-organismes photosynthétiques n'est donc pas bien étudiée. Certaines études suivent néanmoins les concentrations en matière organique, en azote et en phosphore. C'est par exemple le cas de Xiao et al. Ou de Zhang et al. Dans le cas de l'équipe de Xiao, leur dispositif IPB (pour Integrated Photo bioelectrochemical) permet une diminution en azote de 96% et en phosphore de 55% dans le compartiment cathodique. La matière organique est quant à elle consommée à l'anode à hauteur de 92%. L'eau transite de l'anode vers la cathode à travers la membrane échangeuse de cations figure 12. [16]

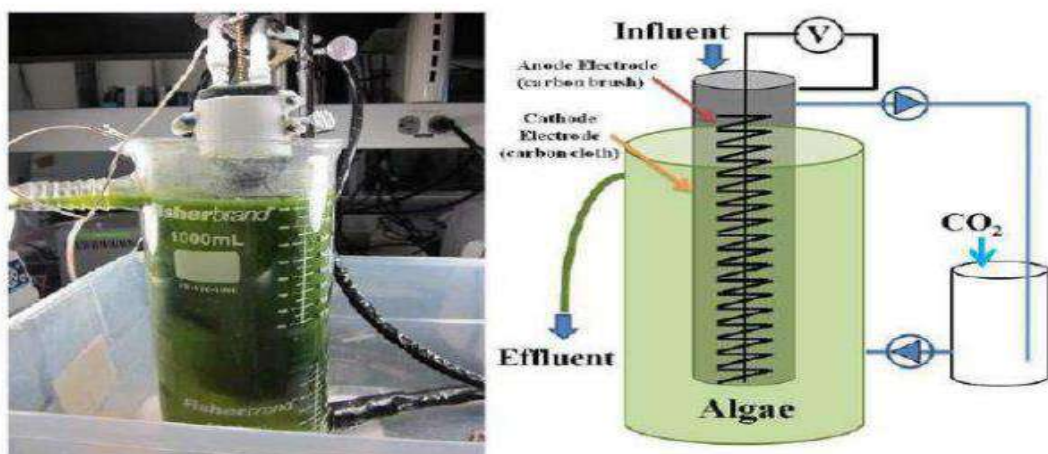


Figure 12 : Dispositif et son schéma du système photo bioélectrochimique intégré, anode en brosse de carbone séparés de la cathode par une membrane échangeuse de cations. Le milieu cathodique estensemencé avec la microalgue *Pseudokirchneriella subcapitata*.

Chapitre II
Généralités sur la
culture des
microalgues

Chapitre II

II.Introduction.

Aujourd'hui, les microorganismes photosynthétiques s'affirment comme l'une des alternatives convenables pour remplacer les énergies fossiles et suscitent un intérêt grandissant, en raison de leurs propriétés biologiques et métaboliques intéressantes. Le terme « micro-algues » s'est progressivement imposé dans les mondes scientifique et industriel. En effet, depuis quelques années, la biotechnologie micro-algale est devenue un thème de recherche privilégié permettant d'explorer et d'exploiter l'énorme potentiel de ces microorganismes intervenant au sein de nombreux systèmes et dans de multiples secteurs industriels comme les domaines énergétique, pharmaceutique, alimentaire et plus récemment environnemental : comme dépolluant d'effluents industriels gazeux (séquestration de CO₂) ou liquides (fixations de nitrates, phosphates, métaux...)[17]

Toutefois, le problème majeur expliquant le faible développement industriel de ce type de production vient entre autres de la nature des procédés de production. En effet, afin d'optimiser les protocoles les plus pertinents, il est impératif de concevoir et de développer des photo-bioréacteurs qui permettent une maîtrise poussée des paramètres de culture avec des géométries optimisées adaptées aux contraintes de la production : rentabilité du bioréacteur, la pureté d'algues produites, l'optimisation de l'espace et facilité de l'entretien.

Un photo-bioréacteur (PBR) est un système de culture clos (culture en milieu isolé de l'extérieur), dont on contrôle les paramètres de croissance (température, pH, composition du milieu de culture, apport en énergie lumineuse et mélange), et qui en présence d'énergie lumineuse assure le bon déroulement de réactions biologiques ; comme par exemple la production de microorganismes photosynthétiques en suspension dans l'eau, tels que les microalgues.

La notion de photo-bioréacteur date déjà de quelques décennies. Les premiers systèmes clos sont apparus à la fin des années 40 voyant dans les micro-algues une source de protéines, mais faute de moyens techniques leur développement a été interrompu et les cultures ont continué à être réalisées en bassins rudimentaires [18]

Au début des années 2000, la recherche de source d'énergie renouvelable a réitéré l'intérêt des chercheurs pour les micro-algues et de nombreux photo-bioréacteurs ont été réalisés et expérimentés avec des formes géométriques variées.

Conséquence directe, il existe aujourd'hui une grande diversité de photo-bioréacteurs (PBR) utilisés dans le cadre de cultures micro-algales, lesquels sont fabriqués dans des matériaux biocompatibles permettant à la fois le transfert de chaleur et une bonne perméabilité pour les faces optiques

II.1. Les microalgues

Les algues sont des organismes photosynthétiques et elles sont la source ultime de carbone cellulaire et d'énergie chimique pour d'autres organismes. Elles sont donc souvent appelées producteurs primaires et sont généralement classées en deux catégories : les macroalgues (algues marines) et les microalgues (unicellulaires). Pour leur croissance, les microalgues ont besoin de lumière, de dioxyde de carbone et de nutriments. Les microalgues sont cultivées et utilisées pour l'alimentation, pour la production de composés utiles, comme biofiltres pour éliminer les nutriments et autres polluants des eaux usées, dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique et dans l'aquaculture. Les microalgues sont également de bonnes sources potentielles pour la production de biocarburants en raison de leur forte teneur en huile et de la production rapide de biomasse. L'aquaculture est un secteur en pleine croissance et sa production augmente constamment. Les genres de microalgues les plus fréquemment utilisés en aquaculture sont la chlorelle, la tétrasélis, le *scenedesmus*, la pavlova, le phaeodactyle, le chaétocère, la *nannochloropsis*, le *skeletonema* et la thalassiosie. Ils ont des taux de croissance rapides et sont stables en culture face aux éventuelles variations de température, de lumière et de nutriments comme cela peut se produire dans les systèmes d'écloserie. Les microalgues doivent avoir une bonne composition en nutriments, y compris une absence de toxines qui pourraient être transférées vers le haut de la chaîne alimentaire.

La principale application des microalgues en aquaculture est liée à leur utilisation pour l'alimentation animale. Actuellement, 30 % de la production mondiale d'algues est utilisée pour l'alimentation animale, mais l'utilisation en aquaculture concerne principalement les larves de poissons, de mollusques et de crustacés. Les eaux usées des piscicultures intensives sont enrichies de particules solides et de nutriments dissous, principalement sous forme d'azote et de phosphore inorganiques. L'utilisation de microalgues vivantes pour éliminer l'excès de nutriments dissous des effluents aquacoles est une méthode de traitement des eaux usées efficace et rentable. Les microalgues contiennent de nombreux composés bioactifs qui peuvent être exploités à des fins commerciales. Le pigment responsable de la couleur rose du saumon et de la truite est l'astaxanthine, un caroténoïde, et l'une des sources naturelles d'astaxanthine est l'algue verte d'eau douce *Haematococcus pluvialis*. D'autre part, bien qu'un petit nombre de certaines microalgues libèrent des toxines qui peuvent causer des problèmes dans l'aquaculture en eau douce de vertébrés (poissons) et d'invertébrés (mollusques et crustacés). De graves efflorescences d'algues, même non toxiques, peuvent être désastreuses pour les hydrobiontes cultivés, car elles épuisent l'oxygène des eaux peu profondes de nombreux systèmes d'aquaculture. [19]

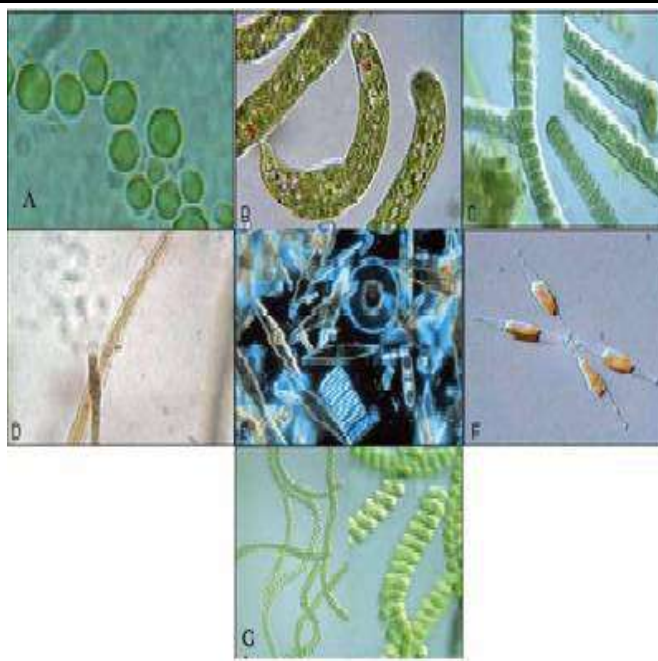


Figure 13 : Diversité des formes des microalgues.

II.2. Éléments majeurs constitutifs des microalgues

Les besoins nutritifs des microalgues sont similaires à ceux des plantes supérieures.

Redfield (1934) a proposé une composition élémentaire C : N : P de 106 :16 :1. Cette composition est relativement constante dans le milieu naturel. Défini par Vonshak (1986) le milieu de culture devra satisfaire les besoins en éléments majeurs (ou macroéléments) C, H, N, O, P, S et en micro-éléments encore appelés éléments traces. Le tableau suivant (tableau2) indique des ordres de grandeurs pour les éléments majeurs constitutifs des microalgues.

Tableau 2 : Éléments majeurs constitutifs des microalgues

Elément	Composition cellulaire µg/mg du poids sec	Elément	Composition cellulaire µg/mg du poids sec
C	176-650	Mg	0,5-75
O	205-330	Fe	0,2-34
H	29-100	Zn	0,005-1
N	10-140	Mn	0,02-0,24
Na	0,4-47	Si	0-230
K	1-75	B	0,001-0,25
P	0-80	Mo	0,0002-0,001
S	1,6-16	Cu	0,006-0,3
Co	0,0001-0,2		

Enfin, le fractionnement biochimique se répartit suivant 4 familles de molécules : protéines, lipides, sucres et acides nucléiques. Cette composition dépend des espèces et des conditions de culture. [20]

Tableau 3 : Répartition du fractionnement biochimique d'une cellule de microalgue (d'après Sialve and Steyer,2013)

Compartiment	Fonction	Ordre de grandeur (% massique)
Protéines	Structure et métabolisme	40-60
Lipides	Structure et réserve énergétique	5-60
Sucres	Structure et réserve énergétique	8-30
Acides nucléiques	Support, vecteur et régulateur de l'information génétique	5-10

II.3. Caractéristiques de base des microalgues

La majorité des microalgues sont dites photo-autotrophes ou autotrophes. Elles tirent leur énergie de la lumière par photosynthèse et leur principale source nutritive est le CO₂ en solution dans l'eau. Leur relative simplicité et la petitesse de leur taille permettent d'effectuer une photosynthèse très efficace. Elles convertissent ainsi l'énergie lumineuse en lipides et en hydrates de carbone, des formes plus condensées et stables d'énergie. De plus, leur condition aquatique leur donne un accès optimal à l'eau et en particulier aux nutriments comme le CO₂ dissout. Par exemple, ces petites plantes peuvent être de dix à trente fois plus productives en huiles par unité de surface de production en comparaison avec les cultures oléagineuses terrestres conventionnelles. Certaines espèces peuvent aussi être chémo-hétérotrophes ou hétérotrophes. Ainsi, au besoin, elles sont capables de puiser de l'énergie et des nutriments directement des matières organiques présentes dans le milieu aquatique. Par exemple, l'espèce *Agmenellum quadruplicatum* devient hétérotrophe en conditions de faible luminosité. On note que l'espèce hétérotrophe *Cryptocodium cohnii* est exploitée pour produire de l'huile DHA, l'acide gras oméga-3 dont l'importance est de plus en plus reconnue pour le maintien d'une bonne santé) [21]

II.4. Paramètres du développement des microalgues

Les conditions de culture telles que la lumière, le dioxyde de carbone, la température, le pH et les nutriments affectent les caractéristiques des microalgues.

La lumière fournit de l'énergie pour la photosynthèse et la croissance microbienne. Le dioxyde de carbone est une source de développement de cellules de microalgues. Afin de réduire le coût de la source de carbone, gaz de combustion peut être utilisé comme source de carbone de remplacement ; 1,8 kg de CO peut produire 1 kg de biomasse de microalgues. La température et le pH de la culture en croissance sont maintenus dans des conditions appropriées pour soutenir la croissance microbienne. Les nutriments nécessaires sont le phosphore

et l'azote ; cependant, l'utilisation de sources de nutriments peuvent causer de la pollution dans l'eau. Par conséquent, l'application la culture de microalgues est une alternative car elle contient généralement du phosphore et nutriments azotés. Non seulement fournir des nutriments pour la croissance des microalgues, en utilisant eaux usées peuvent également réduire les contaminants dans les eaux usées. Les constituants, le déséquilibre de la composition et les composés toxiques peuvent nuire à son utilisation pour la culture de microalgues. [22]

II.5. Différents modes de production de biomasse microalgale

La culture d'algues dans les systèmes de production en bassin ouvert a été utilisée depuis les années 1950 pour le traitement des eaux usées et la récupération des ressources Ces systèmes peuvent être catégorisés en eaux naturelles (lacs, lagunes et étangs) et en bassins artificiels ou en conteneurs. [20]

Divers systèmes de culture sont aujourd'hui utilisés pour produire les biomasses algales. On classe ces différents systèmes en deux catégories, les systèmes ouverts (les bassins) et fermés (les photobioréacteurs). Quel que soit le système de production, la culture d'algues nécessite une source d'énergie lumineuse, et un apport en dioxyde de carbone et sels inorganiques dans le milieu de culture. [23] [24]

II.5.1 Systèmes ouverts

Les systèmes ouverts sont les systèmes d'exploitation qui ont été majoritairement utilisés pour la culture industrielle des microalgues dans les dernières décennies. Les systèmes ouverts sont plus faciles et moins chers à construire et à exploiter que les réacteurs fermés. Ces systèmes sont les moins énergivores et ont une maintenance et un nettoyage facile C'est pour ces raisons qu'ils sont considérés à l'heure actuelle comme des systèmes de cultures viables, malgré leur faible productivité. Les systèmes ouverts utilisent généralement que la lumière naturelle, il n'y a donc pas de coût associé à l'apport de lumière. Cependant, les microalgues sont soumises aux variations journalières et saisonnières de la température et de l'intensité lumineuse, mais la principale contrainte reste le risque de contamination. C'est pourquoi les cultures actuelles se faisant à ciel ouvert concernent des espèces de microalgues poussant dans des milieux très sélectifs. Trois microalgues sont cultivées actuellement avec succès en milieu ouvert.

La spiruline (fort pH), la chlorelle (très riche en nutriment) ou la *Dunaliella salina* (milieu hypersalin). Le milieu de culture peut être contaminé par d'autres espèces de microalgues ou d'autres microorganismes comme des bactéries ou des protozoaires. Les bassins varient par leur forme, le type de matériaux utilisés, le système de mélange du milieu. Plusieurs familles de bassin existent.

a) Les bassins naturels

Ces bassins non mélangés, aux conditions climatiques et nutritionnelles nécessaires aux microalgues, sont souvent utilisés pour la culture de *Dunaliella salina* ou pour la Spiruline. Ils ont en général une faible productivité ($<1 \text{ g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$).

b) Les bassins circulaires

Principalement utilisés en Asie pour la culture de *Chlorella*, ils nécessitent un fort investissement en matériel et leur agitation, par un bras rotatif placé au centre, consomme beaucoup d'énergie.

c) Les raceways

Ce sont les bassins les plus utilisés depuis leur début dans les années 50 majoritairement pour la culture de Spiruline. Leur principe est de faire circuler les algues sur une faible largeur et profondeur (entre 15 et 50 cm) mais sur une grande distance. La circulation et le mélange s'effectuent grâce à des roues à aubes. La productivité de ces bassins est d'environ $20\text{-}25 \text{ g.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$, pour une concentration cellulaire inférieure à $0,6 \text{ g.L}^{-1}$. L'utilisation de CO_2 n'est pas efficace dans les raceway et il y a un faible mélange (figure 14) [25]



Figure 14 : Bassins : a) Culture de *Dunaliella salina* en bassins naturels de 200ha, Cognis nutrition (Australie) b) Culture de Spiruline en raceway, Californie

II.5.2. Systèmes fermés

Les photobioréacteurs sont des réacteurs fabriqués à partir de matériaux transparents. Leur conception est basée sur la surface éclairée, l'efficacité du mélange et le contrôle des paramètres de culture (température, teneur en dioxyde de carbone et en oxygène, pH), pour atteindre une productivité maximale. Les systèmes fermés ont été conçus pour pallier les problèmes des bassins. Ils offrent un environnement de culture clos, ils protègent la culture des contaminations directes, permettent un meilleur contrôle des conditions de cultures : la température est contrôlée efficacement, l'accès à la lumière est augmenté par rapport au bassin, l'évaporation du milieu de culture est minimisée, l'approvisionnement en CO₂ est facilité et ses pertes sont limitées. Le photobioréacteur permet la disposition efficace de la lumière mais aussi l'enlèvement de l'oxygène produit par la photosynthèse. Grâce à ce contrôle des paramètres, des microalgues plus fragiles peuvent y être cultivées. Les photobioréacteurs permettent la reproductibilité des conditions de culture ainsi qu'une forte concentration cellulaire et une forte productivité. Les bassins ont une faible productivité (0,05 à 0,1 g.L⁻¹. j⁻¹) et de faibles concentrations cellulaires (<1 g.L⁻¹) par rapport aux photobioréacteurs (concentration supérieure à 1 g.L⁻¹ et productivité supérieure à 0,8 à 1,3 g.L⁻¹.j⁻¹). Cependant, d'après Sierra et al., la conception des photobioréacteurs doit être optimisée pour chaque espèce de microalgues, par rapport à ses caractéristiques physiologiques et à ses caractéristiques de croissance. De plus, les photobioréacteurs restent très chers à produire et à exploiter.

Les photobioréacteurs existent sous de nombreuses formes, mais ils peuvent être séparés en plusieurs catégories : les photobioréacteurs plans,

les photobioréacteurs cylindriques, les photobioréacteurs « Plastic bag » et un type particulier de réacteurs pour la culture de microalgues en l'absence de lumière (les fermenteurs). [21]

II.5.3. Systèmes hybrides

Les systèmes de culture de microalgues peuvent être combinés afin d'optimiser le processus de production ; par conséquent, la majorité des bio-usines de microalgues travaillent avec des systèmes dits hybrides). Ces systèmes combinent principalement différents types de systèmes de culture, améliorant la performance globale du produit, combinant également deux stades de croissance. Dans la première étape de la culture se déroule dans un photobioréacteurs où les conditions sont contrôlées pour minimiser la contamination par les micro-organismes. La deuxième étape consiste à faire pousser la culture dans un bassin ouvert où les cellules sont exposées à un certain stress nutritionnel afin d'augmenter la synthèse d'un métabolite spécifique (lipide, protéine ou carbohydrate). [21]

II.5.4. Un photobioréacteur (PBR)

Un système de culture clos (culture en milieu isolé de l'extérieur), dont on contrôle les paramètres de croissance (température, pH, composition du milieu de culture, apport en énergie lumineuse et mélange), et qui en présence d'énergie lumineuse assure le bon déroulement de réactions biologiques ; comme par exemple la production de microorganismes photosynthétiques en suspension dans l'eau, tels que les microalgues. La notion de photobioréacteur date déjà de quelques décennies. Les premiers systèmes clos sont apparus à la fin des années 40 voyant dans les microalgues une source de protéines, mais faute de moyens techniques leur développement a été interrompu et les cultures ont continué à être réalisées en bassins rudimentaires (2). Au début des années 2000, la recherche de source d'énergie renouvelable a réitéré l'intérêt des chercheurs pour les microalgues et de nombreux photobioréacteurs ont été réalisés et expérimentés avec des formes géométriques variées. Conséquence directe, il existe aujourd'hui une grande diversité de photobioréacteurs (PBR) utilisés dans le cadre de cultures microalgales, lesquels sont fabriqués dans des matériaux biocompatibles permettant à la fois le transfert de chaleur et une bonne perméabilité pour les faces optiques. Dans le cadre de notre projet de recherche mené au niveau de l'équipe biomasse et technologie de l'hydrogène de l'URAER sur la valorisation de la biomasse algale, nous nous intéressons à la conception de PBR dédiés à la culture de microalgues et à la production de métabolites secondaires, comme l'hydrogène et les lipides. Toutefois, au vu des obstacles à surmonter nous avons jugé utile de dresser un état de l'art des avancées technologiques réalisées à ce jour dans le domaine de la conception des PBR. [26]



Figure 15 : Photobioréacteur tubulaire de l'Université de Wageningen Algae Parc (Nil 2016)

II.6. Traitement des eaux usées par culture de microalgues et bactéries

C'est le système le plus simple. Dans le bassin de ce système, on y trouve les bactéries et les algues microscopiques. La minéralisation de la matière organique soluble en suspension est assurée par les bactéries qui la transforment en eau, gaz carbonique, nitrates et phosphates. Ces composés vont être assimilés par les algues qui grâce à la lumière du soleil vont effectuer la photosynthèse pour assurer leur métabolisme et libérer de l'oxygène pour la vie des bactéries. Cette photosynthèse aboutit à la production de biomasse dans laquelle sont captés les composés organiques et les minéraux qui sont en excès dans l'eau : L'eau est ainsi épurée. Il a été mis en évidence que les algues et les bactéries avaient une relation symbiotique. [3]

Chapitre III

Expérimentale

Chapitre III : Expérimentale

III.1. Matériel et méthodes

La partie expérimentale de ce travail a été réalisée dans un laboratoire de recherche Dynamique, interaction et réactivité des systèmes (DIRS), Université Kasdi Merbah de Ouargla. Nous sommes fixés comme objectif le montage d'une pile à microbienne à base des microalgues avec les moyens disponibles. En effet, en raison du manque de la cellule électrochimiques et les dispositifs de mesure spécialisés, nous avons conçu un montage simplifié.

1- Le courant électrique et le voltage a été mesurés à l'aide d'un multimètre

2- L'appareillage, matériels et produits utilisées et Les protocoles d'expérimentation. Sont illustrés dans l'annexe

✚ Paramètre à mesurer tout les 24 h Au cours, de notre étude nous avons suivis l'évolution de deux paramètres, toutes les 24 heures :

Le courant électrique, le voltage.

III.1.1. Étude et analyse des expériences et des résultats :

Les expériences ont été effectuées dans le laboratoire selon un procédé électrochimique. Dans cette expérience, nous avons utilisé une pile à combustible microbienne PACM (réacteur discontinu)

Ci-dessous les matériaux et les outils qui ont été utilisés dans les expériences:

III.1.1.1. Matériels et produits utilisés

Tableau 4: Matériels et produits utilisés pour dans ce travail expérimental

Produits	Matériels
- Eau distillée	- Éprouvette
- Eau usée	- Membrane cylindrique
- NaCl	- Bécher de 250 ml préalablement lavé à l'eau distillée et séché.
-Les algues	

III.1.1.2. Le montage expérimental

Le montage expérimental représentant biopiles se compose d'un récipient en verre avec un récipient poreux à l'intérieur et des électrodes

- ✓ Dimensions des électrodes **10cmx2.5cmx0.1cm**
- ✓ La distance entre les électrodes est de **3 cm**
- ✓ La partie immergée des électrodes **6 cm.**

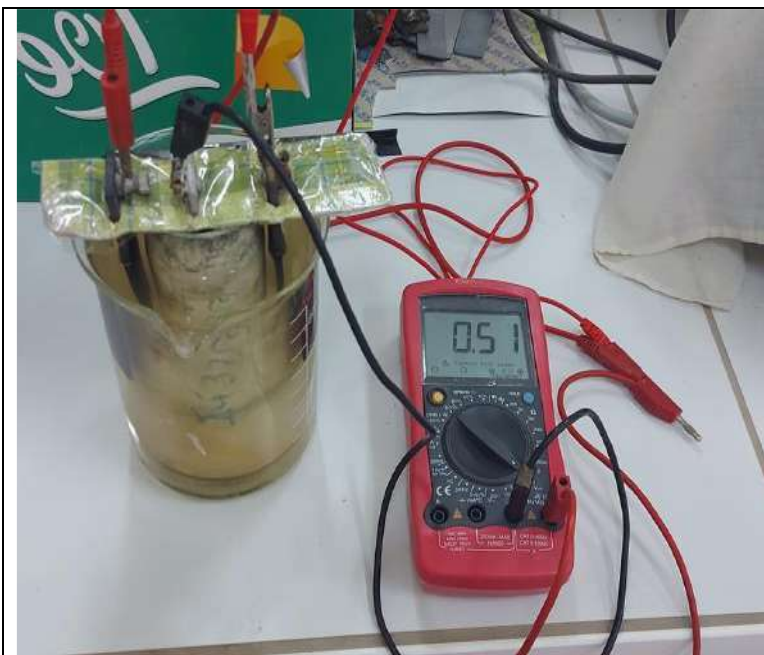


Figure III.16 : Montage expérimental de PACM



Figure III.17: les électrodes utilisées

1- Le protocole de la première expérience : (Deux types d'électrodes ont été utilisés)

L'expérience a été menée en présence d'eaux usées uniquement dans la chambre anodique et la chambre cathodique et utilisation de deux électrodes différentes les électrodes métalliques sont remplacées à chaque fois.

Et chaque fois que le type d'électrodes métalliques est remplacé) zinc, aluminium, fer, cuivre, et carbone) Afin de choisir les minéraux qui nous donnent les meilleurs résultats

2- Le protocole de la Deuxième expérience : (Trois types d'électrodes ont été utilisés

L'expérience a été menée en présence d'eaux usées uniquement dans la chambre anodique et la chambre cathodique et utilisation de trois électrodes différentes les électrodes métalliques sont remplacées à chaque fois.

Et chaque fois que le type d'électrodes métalliques est remplacé) zinc, aluminium, fer, cuivre, et carbone) Afin de choisir les minéraux qui nous donnent les meilleurs résultats

3- Le protocole de la troisième expérience : (Trois types d'électrodes ont été utilisés

L'expérience a été menée en présence d'eaux usées dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique, les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et les électrodes qui nous ont donné les meilleurs résultats étaient auparavant utilisées.

4- Le protocole de la quatrième expérience : (Trois types d'électrodes ont été utilisés

L'expérience a été menée

- 1- En présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte (Na^+ Cl^-) à une concentration à 1 mol/l.
- 2- En présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique et la chambre anodique,

Mais dans cette expérience, la température est modifiée à chaque fois pour voir comment cela affecte les résultats

III.2. Résultats et discussion

III.2.1. Choix de type d'électrodes

Cinq types d'électrodes zinc, aluminium, fer, cuivre, et carbone, ont été testés.

Après avoir mené des expériences afin de choisir les minéraux qui nous donnent la plus grande valeur du courant électrique et le voltage

Une série d'expérience effectuée en mesurant le courant électrique pour différentes électrodes, Les résultats représentés dans le tableau 6 montre qu'en cas Une électrode d'Aluminium a été choisie comme anode. Et le deuxième en Carbone a été utilisé comme cathode.

Dans cette expérience, l'intensité du courant électrique, du voltage et de la puissance ont été étudiées, et les résultats sont présentés dans des tableaux et des courbes pour chaque expérience.

III.2.2. Les résultats de l'expérience sont présentés dans (un tableau 5 annexe) et un graphique

L'expérience a été menée en présence d'eaux usées uniquement dans la chambre anodique et la chambre cathodique et utilisation de deux électrodes différentes les électrodes métalliques sont remplacées à chaque fois.

Les courbes suivantes sont les résultats de certains binaires (Anode/ Cathode).

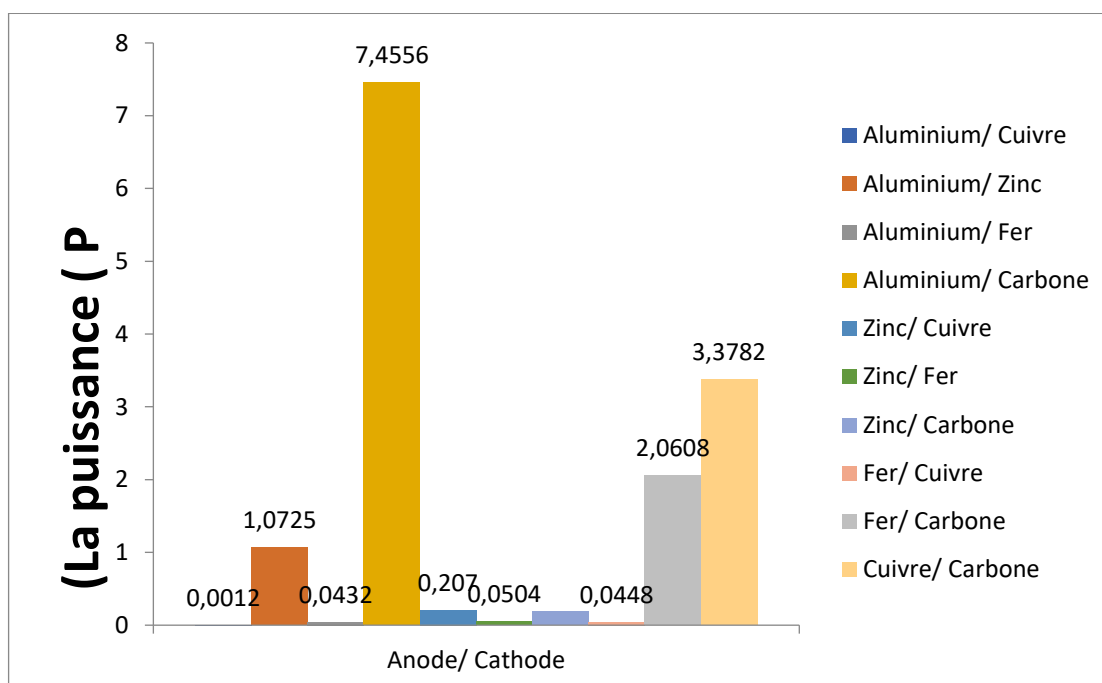


Figure 18 : Évolution de la puissance de certains binaires (Anode/ Cathode).

La courbe représente l'évolution de la puissance électrique (P_{max}) pour certains binaires (Anode/Cathode).

Où nous remarquons que la puissance électrique maximale change d'un binaire à l'autre à des degrés différents, mais la valeur maximale était au le binaire (Aluminium/ Carbone) estimé à 7.4556 mW

Parce que l'aluminium le métal le plus réducteur que les autres métaux, et pour cela, les diodes (aluminium / charbon) ont donné la plus grande puissance électrique par rapport aux autres diodes.

❖ Une courbe et (le tableau 6 annexe) montrant les résultats de l'expérience suivante

L'expérience a été menée en présence d'eaux usées dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique. Les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues.

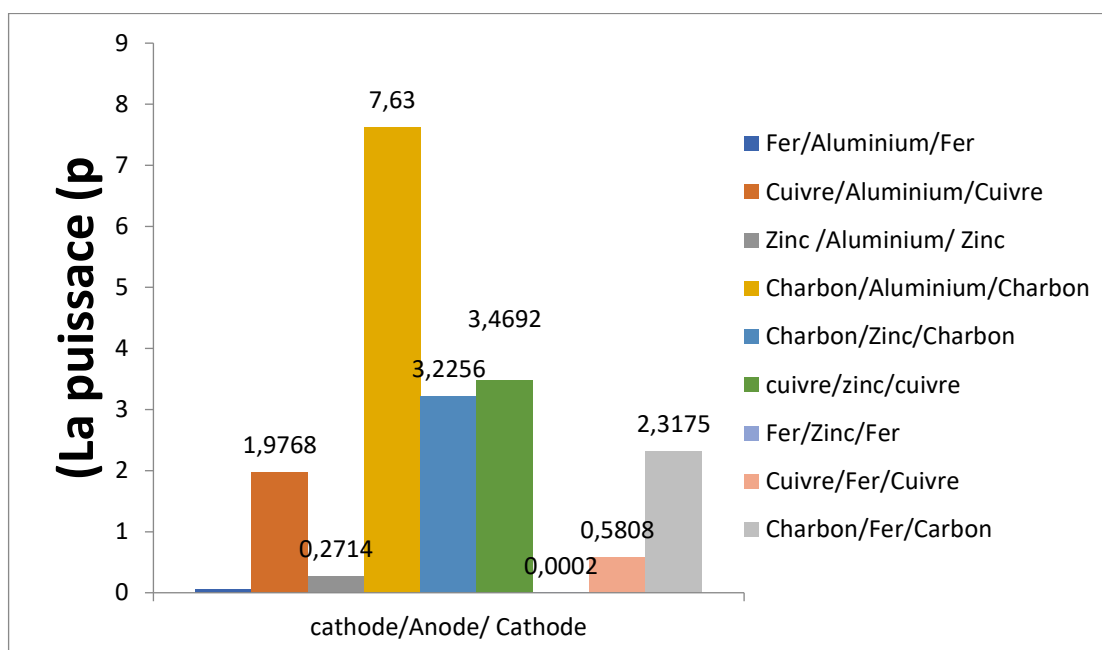


Figure 19 : Évolution de la puissance de Cathode /Anode /Cathode

La courbe représente l'évolution de la valeur énergétique avec l'évolution du type de trois électrodes utilisées

Où l'on constate que la valeur énergétique fluctue avec des valeurs différentes, sachant que la valeur maximale était au niveau des électrodes charbon/aluminium/charbon

Elle est estimée à 7,63 mw

Nous avons constaté que le binaire aluminium/charbon atteignait la plus grande valeur de potentiel électrique, et lors de l'ajout d'une autre cathode, la valeur de la puissance augmente car l'aluminium devient donnant à chaque cathode un électron.

❖ **Comparez les résultats des différentes expériences suivantes**

- 1- L'expérience a été menée en présence d'eaux usées dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique, les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues

Cathode / Anode/ Cathode	La puissance mW $P_{max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (max)	Voltage V (max)
Charbon/ Aluminium/Charbon	7.63	10.90	0.70

- 2- L'expérience a été menée en présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($Na^+ Cl^-$) à une concentration à 0.1 mol/l.

Cathode / Anode/ Cathode	La puissance mW $P_{max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (I max)	Voltage (V max)
Charbon/ Aluminium/ Charbon	9.4075	13.25	0.71

- 3- L'expérience a été menée en présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($Na^+ Cl^-$) à une concentration à 1 mol/l.

Cathode / Anode/ Cathode	La puissance mW $P_{max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (I max)	Voltage (V max)
Charbon/ Aluminium/ Charbon	12.0963	19.83	0.61

La courbe suivante montre les résultats de l'utilisation des électrodes (Charbon/ Aluminium/ Charbon) dans différentes expériences

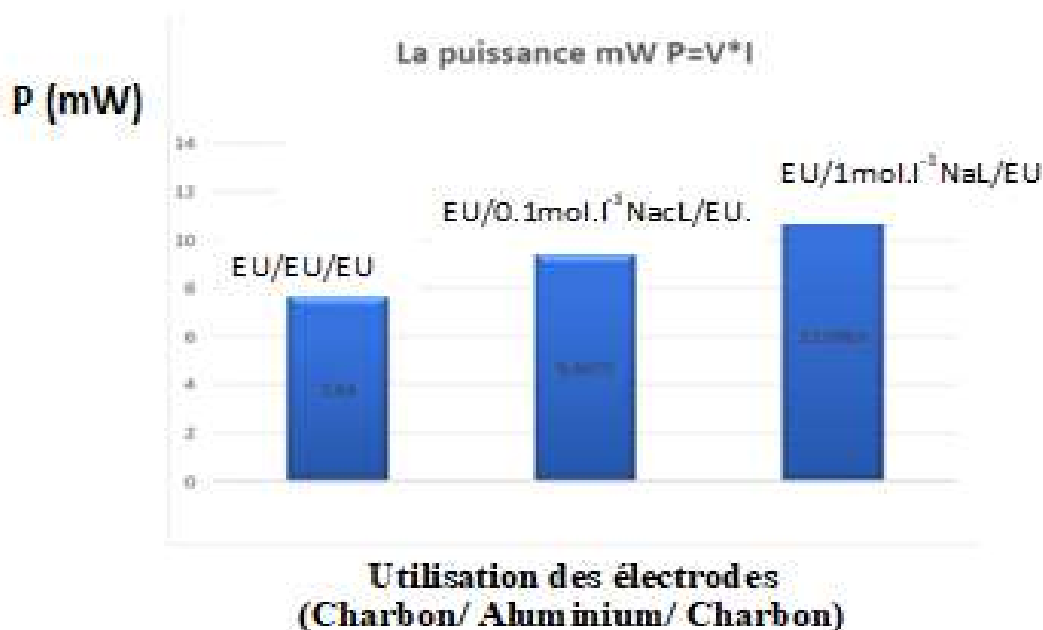


Figure 20 : Évolution de la puissance en fonction de Trois expériences différentes

On remarque sur la courbe que la puissance électrique maximale est différente dans les trois expériences précédentes.

Où l'on note que la plus grande valeur était dans la troisième expérience en présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$) à une concentration à 1 mol/l.

La valeur de la puissance était de 12.0963 mW

❖ **Les résultats de l'expérience sont présentés dans le tableau et le graphique suivants**

En présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($\text{Na}^+ \text{Cl}^-$) à une concentration à 1 mol/l.

Mais dans cette expérience, la température est modifiée à chaque fois pour voir comment cela affecte les résultats

$$T(K) = 273 + t (^{\circ}C)$$

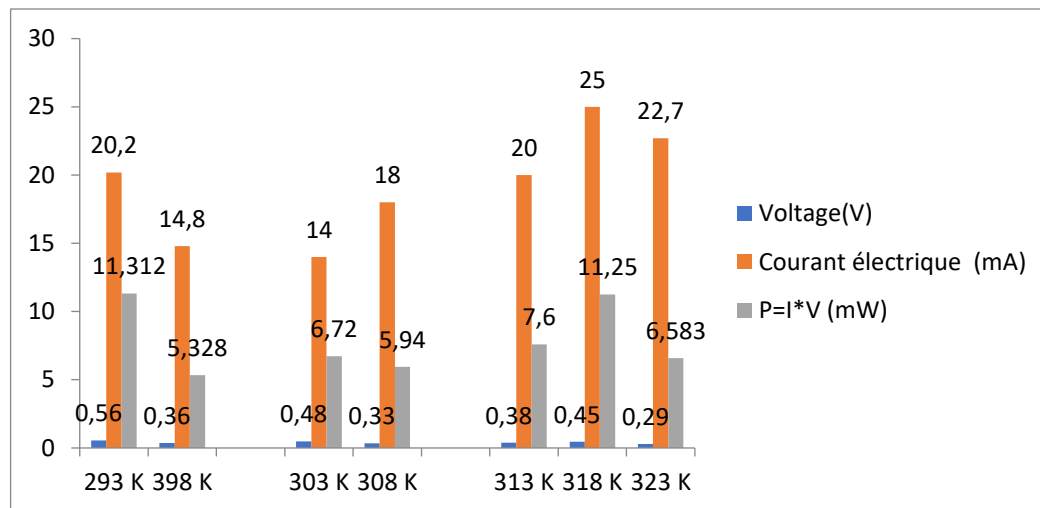


Figure 21 : Évolution de la puissance et la puissance et voltage et courant électrique en fonction de la température

La courbe représente le changement de la puissance et la puissance et voltage et courant électrique en fonction de la température.

Où nous notons que la valeur de chacun de la puissance, de la courant électrique et voltage change avec le changement de température.

D'où nous concluons que la température a un rôle dans la modification de la valeur de chacune de la puissance, voltage et courant électrique.

Conclusion

Conclusion
générale

Conclusion générale

Dans ce travail, Nous avons conclu qu'il est possible de produire d'électricité à l'aide de microalgue en utilisant une pile à combustible microbienne dans le milieu de culture (eau usée). Nous avons donc remarqué que le résultat de potentielle et le courant électrique, Obtenu sont de 0,588 V, et de 0,318 mA respectivement.

Ces travaux sur les piles à combustible microbienne montrent trois avantages, concrète :

- Une production d'électricité verte et inépuisable ;
- Une amélioration de la dépollution d'eau usée permettant une augmentation des volumes de traitement ;
- L'efficacité des petites entreprises dans l'exploitation de l'électricité de manière économique

Et pour obtenir une puissance importante, la zone de la partie immergée doit être agrandie et plusieurs électrodes doivent être connectées les unes aux autres.

Si nous voulons obtenir une grande tension, nous connectons les pôles en série, et si nous voulons un courant plus important, nous connectons les pôles en parallèle

La connexion peut également être mixte pour obtenir un courant et une tension importants

Les recherches effectuées dans ce travail et les perspectives que nous proposons pour les faire progresser devraient conduire à des avancées certaines dans la compréhension et l'amélioration de la technologie des PACMs, permettant d'avoir bon espoir de développer de tels systèmes au niveau industriel à moyen terme.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] HALIMI HADJER, HALDI SARA, 2018, Master en Biologie Moléculaire des Microorganismes « Élaboration d'une pile à combustible microbienne en utilisant les souches *Shewanella oneidensis* MR1 et *Exiguobacterium* sp », Université des Frères Mentouri Constantine.

[02] Nicolas HOURIZADEH, décembre 2015, Doctorat en chimie, « Valorisation du traitement d'eaux usées à partir de piles à combustibles microbiennes benthiques », Université des Antilles (École doctorale), p 20.

[03] Mohamed Rida Menea, 2019, MASTER, Evaluation d'une biopile microbiennes (microalgue), UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.

[04] Antoni Pierre, Averoux Cédric, Béasse Suzie, de Boisset Pierrick, Revellat Christian, Juin 2015, Rapport de Soutenance de PE PE n°88 : Pile à combustible microbienne, école centralelyon.

[05] Hassiba Smida, 2017, Doctorat « Modulation de l'interface entre biofilms microbiens électroactifs et surface d'électrode : modifications de surface et effets de milieux », UNIVERSITÉ DE RENNES 1.

[06] Diana POCAZNOI, juillet 2012, Doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement « Optimisation d'anodes microbiennes à partir de lixiviat de sol pour la conception de piles à combustible microbiennes », UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.

[07] Claire DUMAS, Décembre 2007, Doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement « Catalyse électro-microbienne dans les piles à combustible », L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE.

[08] Hasna ADDI, 2018, THÈSE DE DOCTORAT en Génie de l'environnement « APPLICATION DE LA PILE A COMBUSTIBLE MICROBIENNE AVEC UN SEPARATEUR A BASE DE LIQUIDES IONIQUES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES ET LA PRODUCTION D'ENERGIE », Université Mohammed V de Rabat.

[09] Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Aeltermann, P., Verstraete, W., Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5181-5192.

[10] Lovely, D.R., Stolz, J.F., and Nord, G.L. (1987). Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature* 330, 252 – 254.

- [11] Derek R, L. (2008). The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology* 19, 564-571.
- [12] Du, Z., Li, H., Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464-482.
- [13] Hong Liu et Bruce E. Logan, Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane, *Sci. Technol.*, 2004, 38 (14), pp 4040–4046.
- [14] Freguia, S., Rabaey, K., Yuan, Z., Keller, J., 2008. Sequential anode-cathode configuration improves cathodic oxygen reduction and effluent quality of microbial fuel cells. *Water Res.* 42, 1387–1396.
- [15] Kim, J. R., Oh, S. E., Cheng, S., Logan, B. E., Power Generation Using Different Cation, Anion, and Ultrafiltration Membranes in Microbial Fuel Cells, *Environ. Sci. Technol.* 41 (2007) 1004-1009
- [16] Nicolas HOURIZADEH, décembre 2015, Doctorat en chimie, « Valorisation du traitement d'eaux usées à partir de piles à combustibles microbiennes benthiques », Université des Antilles (École doctorale).
- [17] Laila BOUABDALAOUI, juillet 2013, THÈSE DE DOCTORAT en chimie, thèse « ETUDE DE MATERIAUX D'ANODES A BASE DE GRAPHITE MODIFIE PAR DES COMPOSES FER-SOUFRE : APPLICATIONS AUX PILES A COMBUSTIBLE MICROBIENNES », UNIVERSITÉ EVRY VAL D'ESSONNE, p 14 et p15.
- [18] T. R. c Enid J. Sullivan Grahamf., Cynthia A. Dean a, ThomasM. Yoshida a, Scott N. Twary b, MunehiroTeshima b, Mark A. Alvarez b, Tawanda Zidenga b, Jeffrey M. Heikoop c, George B. Perkins c and P. L. e Gregory L. Wagner d, “Oil and gas produced water as a growth medium for microalgae cultivation : A review and feasibility analysis,” *Algal Res.*, pp. 1–13, 2017.
- [19] Raymond A. and F. E. Okieimen, “Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation,” *Int. Sch. Research Netw. Ecol.*, vol. 2011, pp. 1–20, 2011.
- [20] Par. Meftah Saida.Mchegueg.Khaoula Thème Les microalgues, traitement des eaux usées et applications. MOHAMED BOUDIAF M’SILA, Page 2.
- [21] Mme ASFOURI Nadia Yasmine. Thème Production en masse de microalgues : optimisation des paramètres physico-chimiques Université Oran1 Ahmed Ben Bella, Oran –Algerie page.7.8

[22] Par François Doré-Deschênes. theme UTILISATION DES MICROALGUES COMME SOURCE D'ÉNERGIE DURABLE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE. Canada, juin 2009. Page 13

[23] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae beats bioethanol," *Biotechnol. Adv.*, vol. 26, no. 3, pp. 126–131, 2008.

[24] D. L. Sutherland, M. H. Turnbull, P. A. Broady, and R. J. Craggs, "Science Direct Wastewater microalgal production, nutrient removal and physiological adaptation in response to changes in mixing frequency," *Water Res.*, vol. 61, pp. 130–140, 2014.

[25] Oswald, "Biological Transformation of Solar Energy," *Div. Sanit. Eng. Sch. Public Heal. Univ. California. Berkeley. Calif.*, 1960.

[26] M. Bouchentouf Mohammed.M. Abdarrahmane Moussa. Thème : Traitement des eaux usées par les microalgues. Université Ahmed Draïa Adrar.

Annexe

1. Appareillages et les résultats obtenus dans ce travail expérimental

1.1. Appareillages



Annexe 01 : Multimètre



Annexe 02 : étuve de laboratoire



Annexe 03 : Balance analytiques



Annexe 04 : Agitateur magnétique chauffant



Annexe 05 : Plaque chauffante



Annexe 06 : Membrane



Annexe 07 : Les algues



Annexe 08 : Eau usé

- D'électrodes métalliques —zinc, aluminium, fer, cuivre, et carbone,



Annexe 09 : électrode zinc



Annexe 10 : électrode aluminium



Annexe 11 : électrode fer



Annexe 12 : électrode
cuivre



Annexe 13 : électrode
carbone

1.2. Les résultats obtenus dans ce travail expérimental

Tableau 5 : Résultat du courant électrique et le voltage et la puissance des différentes électrodes.

Anode	Cathode	Courant électrique mA	Voltage	La puissance $P=V*I$ mW
Cuivre	Cuivre	1.18	0.12	0.1416
Aluminium	Aluminium	1.20	0.12	1.224
Zinc	Zinc	0.18	0.01	0.0018
Fer	Fer	0.07	0.01	0.0007
Charbon	Charbon	0.48	0.05	0.024
Aluminium	Cuivre	0.03	0.04	0.0012
Aluminium	Zinc	1.43	0.75	1.0725
Aluminium	Fer	0.18	0.24	0.0432
Cuivre	Aluminium	6.53	0.30	1.959
Cuivre	Zinc	11.77	0.50	5.885
Cuivre	Fer	2.92	0.14	0.4088
Zinc	Cuivre	0.69	0.30	0.207
Zinc	Aluminium	1.74	0.20	0.348
Zinc	Fer	0.56	0.09	0.0504
Fer	Cuivre	0.16	0.28	0.0448
Fer	Aluminium	0.58	0.22	0.1276
Fer	Zinc	4.28	0.38	1.6264
Charbon	Fer	0.35	0.29	0.1015
Charbon	Zinc	0.16	0.30	0.048
Charbon	Cuivre	0.29	0.38	0.1102
Charbon	Aluminium	0.07	0.25	0.0175
Aluminium	Carbone	13.08	0.57	7.4556
Fer	Carbone	3.68	0.56	2.0608
Zinc	Carbone	0.66	0.28	0.1848
Cuivre	Carbone	8.89	0.38	3.3782

Tableau 06 : Résultat du courant électrique et le voltage et la puissance des différentes électrodes (deux types d'électrodes)

Anode/ Cathode	La puissance mW $P_{\max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (max)	Voltage V (max)
Aluminium/ Cuivre	0.0012	0.03	0.04
Aluminium/ Zinc	1.0725	1.43	0.75
Aluminium/ Fer	0.0432	0.18	0.24
Aluminium/ Carbone	7.4556	13.08	0.57
Zinc/ Cuivre	0.2070	0.69	0.30
Zinc/ Fer	0.0504	0.56	0.09
Zinc/ Carbone	0.1848	0.66	0.28
Fer/ Cuivre	0.0448	0.16	0.28
Fer/ Carbone	2.0608	3.68	0.56
Cuivre/ Carbone	3.3782	8.89	0.38

Tableau 07 : Résultat du courant électrique et le voltage et la puissance des différentes électrodes (trois types d'électrodes)

Cathode / Anode/ Cathode	La puissance mW $P_{\max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (max)	Voltage $V_{(\max)}$
Fer/ Aluminium/ Fer	0.064	0.32	0.20
Cuivre/ Aluminium/ Cuivre	1.9768	3.53	0.56
Zinc/ Aluminium/ Zinc	0.2714	0.59	0.46
Charbon/ Aluminium/ Charbon	7.63	10.90	0.70
Charbon/ Zinc/ Charbon	3.2256	6.72	0.48
Cuivre /Zinc/ Cuivre	3.4692	5.88	0.59
Fer/ Zinc/ Fer	0.0002	0.01	0.02
Cuivre/ Fer/ Cuivre	0.5808	2.42	0.24
Carbone/Fer/Carbone	2.3175	5.15	0.45

Grâce à l'expérience, nous avons choisi les meilleurs résultats pour compléter les expériences, et les électrodes appropriées ont été sélectionnées pour cela.

- 1- L'expérience a été menée en présence d'eaux usées dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique, les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues

Cathode / Anode/ Cathode	La puissance mW $P_{\max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (max)	Voltage V (max)
Charbon/ Aluminium/Charbon	7.63	10.90	0.70

- 2- L'expérience a été menée en présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($\text{Na}^+ \text{Cl}^-$) à une concentration à 0.1 mol/l.

Cathode / Anode/ athode	La puissance mW $P_{\max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (max)	Voltage V (max)
Charbon/ Aluminium/ Charbon	9.4075	13.25	0.71

- 3- L'expérience a été menée en présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($\text{Na}^+ \text{Cl}^-$) à une concentration à 1 mol/l.

Cathode / Anode/ athode	La puissance mW $P_{\max} = V \cdot I$	Courant électrique mA (max)	Voltage V (max)
Charbon/ Aluminium/ Charbon	12.0963	19.83	0.61

En présence d'eaux usées avec 100 ml de microalgues dans la chambre cathodique quant à la chambre anodique les eaux usées ont été placées avec 100 ml de microalgues et électrolyte ($\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$) à une concentration à 1 mol/l.

Mais dans cette expérience, la température est modifiée à chaque fois pour voir comment cela affecte les résultats

- EU/ NaCl / EU

$$T(\text{K}) = 273 + t (\text{°C})$$

La température(K)	293K	298K	303K	308K	313K	318K	323K
Voltage(V) (max)	0.56	0.36	0.48	0.33	0.38	0.45	0.29
Courant électrique (mA) (max)	20.2	14.8	14.00	18.00	20.00	25.00	22.7
P max =I*V (mW)	11.312	5.328	6.72	5.94	7.6	11.25	6.583