

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département génie de l'environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : *Génie des procédés.*

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement.

Par

- ❖ **Tibourtine Sara**
- ❖ **Logsair Hind**

Intitulé

*Valorisation des eaux usées domestiques de la STEP Bordj
Bou Arreridj pour la production durable d'hydrogène vert
grâce à la technologie électro-microbienne*

Soutenu le : 21/06/2025

Devant le Jury composé de :

<u><i>Nom & Prénom</i></u>	<u><i>Grade</i></u>	<u><i>Qualité</i></u>	<u><i>Etablissement</i></u>
Mr. A. Benmakhlouf	M.C.B	Président	Univ-BBA
Mr. A. Dilmi	M.C.A	Encadreur	Univ-BBA
Mr. A. Bahloul	Pr	Co-Encadreur	Univ-M'sila
Mr. A. Hellati	Pr	Examineur	Univ-BBA
Mr. K. Rebai	Master	Membre Invité	Univ-BBA

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tiendrons à exprimer nos gratitudees envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tout d'abord [Mr A. Dilmi], pour sa disponibilité, ses conseils avisés, sa bienveillance et son encadrement tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et son soutien m'ont été d'une aide précieuse.

Nous tiendrons également à remercier l'ensemble des enseignants et membres de l'équipe pédagogique de [la faculté des génies de l'environnement] pour la qualité de leur enseignement et leur accompagnement durant toute ma formation.

Un grand merci à [Mr Khalil] pour son accueil dans un cadre propice à l'apprentissage et à la recherche.

Nous remercions aussi nos collègues, ami(e)s et camarades pour leur soutien moral, leurs échanges enrichissants et leur présence bienveillante.

Enfin, nos pensées les plus sincères vont à nos familles, et tout particulièrement aux [pères, mères, frères, sœurs...], pour leurs amours inconditionnels, leurs encouragements et leur soutien tout au long de ce parcours.

Dédicaces

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

A Tous ceux qui se sont donnés toutes les peines et tous les sacrifices pour me voir réussir dans la 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.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore

A mes enseignants qui m'ont soutenu durant toutes mes années d'études.

Nous tenons à remercier également notre cher encadreur Mr Dilmi, Abdelkader, pour sa disponibilité et pour toute sa gentillesse et sa serviabilité.

A Mon cher frère et mes chères sœurs pour leur encouragement indéfectible.

A ma chère nièce Miral que j'adore énormément

A Toute ma famille

A ma chère copine et binôme Hind et à mes chères cousines, Norine et Alla et à toutes mes amies : Nessrine, Djihen, Kenza, Lynda, Fatima ...

Merci mes chéries pour l'amitié et tous les moments agréables que nous avons passés ensemble.

A toute la promotion GP 2025

Je vous aime du fond du cœur

Sara Tibourtine

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله والصلاة والسلام على رسول الله (وأخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين)
الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات
(وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا)
ما سلكنَا البدايات إلا بتيسيره وما بلغنا النهايات إلا بتوفيقه وما حققنا الغايات إلا
بفضله...

بعد سنوات من الجهد، الدموع والفرح!
لا شيء يضاهي لذة الوصول بعد التعب
أقف الان على عتبة الحياة أحمل شهادة
وقلبًا امتلأ بالعبر وعيونا امتلأت بالدموع، قبل كل شيء أشكر الأستاذ ديلمي الذي لم
يبخل علينا بشيء بل كان معنا في كل كبيرة وصغيرة شكرًا لإرشادنا. والآن لا أقول ألف
مبروك لي بل ألف مبروك لعائلتي لأمي وأبي اللذان سهرا على تربيتي وتعليمي للوصول
لما أنا عليه اليوم

أهدي تخرجي هذا لأبي الغالي وأمي حبيبتي، لإخوتي وأختي هدى خاصة لرفيقات
دربي وصديقاتي وئام وبثينة من كنا معي في فرحي وحزني لمن عرفتنني عليها الجامعة
سارة لجميع زميلاتي وزملائي لأساتذتي الكرام من علمونا ولم يبخلوا علينا من طور
الابتدائي للجامعي.. وأخيرا

أسأل الله ان يجعل هذا التخرج بداية خير لي في حياتي وان يوفقتني لما فيه صلاح
ديني ودنياي وان يرزقني القدرة على رد الجميل لكل من كان له فضل علي.

Hind logsair

Résumé

La transition vers des sources d'énergie durables et la nécessité de traiter efficacement les eaux usées ont conduit à l'émergence de solutions technologiques innovantes, parmi lesquelles la technologie électro-microbienne (Microbial Electrolysis Cell – MEC) occupe une place prometteuse. Le principe des MEC repose sur l'activité de bactéries électrogènes capables d'oxyder la matière organique contenue dans les eaux usées, générant ainsi des électrons et des protons. Sous l'effet d'un faible voltage externe, ces électrons sont transférés à une électrode où ils réduisent les protons en hydrogène gazeux. Ce procédé offre une double valorisation : d'une part, une production propre d'hydrogène sans émission directe de CO₂, et d'autre part, un traitement biologique des eaux chargées en polluants organiques.

Cette étude analyse les paramètres influençant le rendement d'une MEC (type de substrat, nature des électrodes, potentiel appliqué, température, pH...), et discute les performances obtenues en termes de taux d'épuration et de volume d'hydrogène produit. Des résultats expérimentaux réalisés au laboratoire sont mobilisés pour évaluer la viabilité de cette technologie à l'échelle industrielle.

Mots clés : Hydrogène vert-Cellule d'électrolyse microbienne (MEC)-Énergie durable-Traitement des eaux usées-Bactéries électrogènes

المخلص

أدى التحول نحو مصادر الطاقة المستدامة والحاجة الملحة إلى معالجة فعالة لمياه الصرف الصحي إلى ظهور حلول تكنولوجية مبتكرة، من أبرزها تكنولوجيا التحليل. ويوجد جهد كهربائي خارجي منخفض، تنتقل هذه الإلكترونات إلى قطب كهربائي الميكروبي (Microbial Electrolysis Cell – MEC)، التي تُعد من بين الحلول الواعدة. تعتمد آلية عمل خلايا MEC على نشاط البكتيريا الكهرو حيوية القادرة على أكسدة المادة العضوية الموجودة في مياه الصرف، مما يؤدي إلى إنتاج إلكترونات وبروتونات حيث تختزل البروتونات لإنتاج غاز الهيدروجين.

يوفر هذا المسار فائدة مزدوجة: من جهة، إنتاج نظيف للهيدروجين دون انبعاث مباشر لثاني أكسيد الكربون، ومن جهة أخرى، معالجة بيولوجية فعالة لمياه ملوثة بالمواد العضوية.

تتناول هذه الدراسة تحليل العوامل التي تؤثر على مردودية خلايا MEC، مثل نوع الركيزة، طبيعة الأقطاب، الجهد المطبق، درجة الحرارة، ودرجة الحموضة (pH)، كما تناقش الأداء المحققة من حيث نسب التنقية وحجم الهيدروجين المنتج. وقد تم الاستعانة بنتائج تجريبية منجزة في المختبر لتقييم قابلية تطبيق هذه التقنية على النطاق الصناعي.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين الأخضر - خلية التحليل الكهربائي الميكروبي (MEC) - طاقة مستدامة - معالجة مياه الصرف الصحي - بكتيريا كهر وحيوية.

abstract

The transition to sustainable energy sources and the need for efficient wastewater treatment have led to the emergence of innovative technological solutions, among which microbial electrolysis cell (MEC) technology holds promising potential. The principle of MECs relies on the activity of electrogenic bacteria capable of oxidizing the organic matter contained in wastewater, thereby generating electrons and protons. Under the effect of a low external voltage, these electrons are transferred to an electrode where they reduce protons into hydrogen gas. This process offers dual valorization: on one hand, the clean production of hydrogen without direct CO₂ emissions, and on the other hand, the biological treatment of wastewater loaded with organic pollutants.

This study analyzes the parameters influencing the performance of an MEC (substrate type, nature of the electrodes, applied potential, temperature, pH, etc.) and discusses the results obtained in terms of purification rates and volume of hydrogen produced. Experimental results obtained in the laboratory are used to evaluate the viability of this technology on an industrial scale.

Keywords: Green hydrogen – Microbial Electrolysis Cell (MEC) – Sustainable energy – Wastewater treatment – Electrogenic bacteria

Table des matières :

<i>Remerciements</i>	I
<i>Dédicaces</i>	II
<i>Dédicace</i>	III
Résumé.....	IV
Table des matières :	V
Liste des figures :.....	IX
Liste des tableaux :	XI
Liste des abréviations :.....	XII
Introduction générale :	1

Chapitre I : Différentes voies de production de l'hydrogène

I.1. Introduction :.....	4
I.2. Définition de l'hydrogène vert	4
I.3. Classification et « couleurs » de l'hydrogène.....	4
I.4. Caractéristiques physico chimiques et énergétiques de l'hydrogène	5
I.5. Les différentes utilisations de l'hydrogène vert :	5
I.5.1. Dans le Secteur du transport :.....	5
I.5.2. Dans le Secteur aérospatial :	6
I.5.3. Dans le secteur de la Production d'électricité :.....	6
I.6. Production industrielle de l'hydrogène.....	7
I.6.1. Production à partir d'hydrocarbures :.....	8
I.6.1.1. Vaporeformage d'hydrocarbure :.....	8
I.6.1.2. Production d'hydrogène par gazéification du charbon :.....	8
I.6.1.3. Production d'hydrogène par oxydation partielle des hydrocarbures :.....	9
I.6.2. Production d'hydrogène par électrolyse.....	10
I.7. L'électrolyse de l'eau :.....	11
I.7.1. Électrolyse alcaline :	12
I.8. Procédés biologiques de production de l'hydrogène :	13
I.8.1. Fermentation :.....	13
I.8.2. Les photo-bioprocédés.....	14
Références bibliographiques.....	15

Chapitre II : Technologies -électro-microbiennes pour la production de l'hydrogène vert

II.1. Introduction :.....	17
II.2. Conductivité des électrolytes :.....	17

II.2.1 Tension d'électrolyse	18
II.3. La cathode : siège de l'électrosynthèse microbienne	19
II.4. La bio anode :	19
II.4.1. Mécanismes de transfert d'électrons entre les substrats et l'anode :	20
II.4.1.1. Transfert indirect.....	21
II.4.1.2. Transfert direct.....	21
II.4.2. Rendement faradique	21
II.4.3. Stratégie de préparation de la bioanode	22
II.5. Les technologies électro-microbiennes pour la valorisation des résidus de L'assainissement : ...	23
II.5.1. Valorisation des bio déchets :	24
II.5.2. Matériaux supports de bio anodes :	24
II.5.2.1. Support en Téflon :	24
II.5.2.2. Support en PCB (Circuit imprimé) :	25
II.6. Les électrodes tridimensionnelles pour augmenter les performances anodiques :.....	25
II.7. Membranes (échangeuse de protons) :	26
II.8. Taille et géométrie des réacteurs.....	27
II. 8.1. Réacteurs à simple ou double compartiment :	27
II. 8.2. Les différentes configurations de réacteurs :	29
II. 8.3. Les études en CEM à différentes échelles :	30
Reference :	31

Chapitre III : Etude expérimentale

III.1. Introduction:	33
III.2. Présentation de milieu d'étude.....	33
III.2.1. Présentation de l'ONA.....	33
III.3. Etapes de traitement des eaux usées au niveau de la STEP à boue activé de BBA.....	34
III.3.1. Prétraitement.....	34
III.3.1.1. Dégrillage.....	34
III.3.1.2. Déshuilage et dégraissage.....	35
III.3.1.3. Dessablage.....	36
III.3.2. Traitement primaire	36
III.3.3. Traitement biologique (secondaire).....	37
III.3.3.1. Clarification.....	38
III.3.3.2. Traitement des boues.....	39
III.3.4. Epaissement	40
III.3.5. La déshydratation.....	40

III.3.6. Le séchage	40
III.3.7. Stabiliser la matière organique	41
III.3.7.1. La stabilisation biologique.....	41
III.4. Echantillonnage	41
III.4.1. Importance du prélèvement	41
III.4.2. Matériel utilisé	42
III.4.3. Méthodologie de prélèvement	42
III.4.4. Transport et conservation des échantillons.....	42
III.5. Méthodes d'analyses des eaux usées de la Steep de BBA.....	42
III.5.1. Température (T) :	42
III.5.2. Potentiel hydrogène (pH) :	42
III.5.3. Conductivité électrique (CE) :	43
III.5.4. Turbidité.....	44
III.5.5. Matières en suspension (MES) :	45
III.5.6. demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO ₅)	47
III.5.7. Demande chimique en oxygène (DCO)	48
III.5.8. Concentration en nitrites (NO ₂ ⁻)	49
III.5.9. Concentration en nitrates (NO ₃ ⁻)	50
III.5.10. Concentration en azote ammoniacal (NH ₃ -N).....	51
III.5.11. Matériel et Méthodes d'analyses bactériologiques des eaux usées de la STEEP	52
III.6. Production d'hydrogène vert à partir des eaux usées à l'aide d'une cellule microbienne à double compartiment :	59
III.6.1. Protocole D'activation de la membrane Nafion 117 :	59
III.6.2. Elaboration de la cellule microbienne :	60
Référence :	64

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction	67
IV.2. Analyse des paramètres physico-chimique des eaux usées à l'entrée de la station d'épuration de BBA	67
IV.2.1. La température(T) :	67
IV.2.2. Potentiel d'hydrogène (pH).....	68
IV.2.3. La conductivité électrique.....	68
IV.2.4. La turbidité	69
IV.2.5. Salinité.....	69
IV.2.6. TDS (Total Dissolved Solids)	70
IV.2.7. Demande biochimique en oxygène (DBO ₅).....	71

IV.2.8. Demande chimique en oxygène DCO	71
IV.2.9. Nitrate	72
IV.2.10. Nitrites	73
IV.2.11. L'analyse bactériologique des eaux usées avant traitement :	73
IV.2.11.1. Coliforme fécaux à 44°C.....	74
IV.2.11.2. La flore totale aérobie mésophile (FTAM)	75
IV.2.11.3. Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C.....	76
IV.2.11.4. Coliforme totaux à 37°C.....	77
IV.3. Analyse des paramètres physico-chimique des eaux usées après traitement par les procédés electromicrobienne	78
IV.3.1. Température	78
IV.3.2. Potentiel d'hydrogène (PH).....	79
IV.3.3. La turbidité.....	81
IV.3.4. Salinité.....	82
IV.3.5. TDS (Total Dissolved Solids)	83
IV.3.6. Demande biochimique en oxygène (DBO ₅).....	84
IV.3.7. Demande chimique en oxygène DCO	85
IV.3.8. Nitrate	86
IV.3.9. Nitrite	87
IV.3.10. L'analyse bactériologique des eaux usées après traitement :	89
IV.3.10.1. Coliforme fécaux à 44°C.....	89
IV.3.10.2. Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C.....	89
IV.3.10.3. Coliforme totaux à 37°C.....	90
IV.4. Suivi du comportement électrochimique des microorganismes	91
IV.5. Production de l'hydrogène vert par la technologie électro microbienne	93
Conclusion générale	99

Liste des figures :

Titre	Page
Figure.I.1 : Production d'hydrogène vert [9]	7
Figure. I.2 : Vaporeformage de l'hydrocarbure [11].	8
Figure.I.3 : Mécanisme de la gazéification[13].	9
Figure.I.4. Principe de l'électrolyse [16]	12
Figure.I.5. Principe de l'électrolyse alcaline [19]	13
Figure.I.6. Principe de photo-bioprocédé pour la production de l'hydrogène [22]	14
Figure.II.1. Procédés électrolytiques pour la production d'hydrogène par les eaux usées[3]	18
Figure.II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse microbienne [5]	19
Figure.II.3. L'anode siège de l'oxydation microbienne [7]	20
Figure.II.4. Mécanismes de transfert d'électrons entre les substrats et l'anode [10]	21
Figure.II.5. Rendement faradique anodique [13]	22
Figure II.6 : Etapes de formation d'un biofilm microbien. Schématique (gauche) et par observations au microscope électronique à balayage et microscope confocal (droite). Modifié d'après [15]	23
Figure .II.7. Photographies de structures d'électrodes 3D en microscopie électronique à balayage[19]	26
Figure.II.8 : Membrane permselective et principe de fonctionnement [22]	27
Figure.II.9. Electrolyseur microbien a un seule compartiment	27
Figure.II.10. Dispositif à deux compartiments ou cellule « en H » . [24]	28
Figure.II.11. Configurations récentes de cellules d'électrolyse microbienne . [28]	29
Figure III.1 <i>Station d'épuration des eaux usées de la ville de Bordj Bou Arreridj</i>	33
Figure III.2 : <i>Dégrilleurs (STEP BBA)</i>	35
Figure III.3 : <i>Déshuileur et dégraisseur (STEP BBA)</i>	36
Figure III.4 : <i>Dessaleur (STEP BBA)</i>	36
Figure III.5 : <i>Décanteur primaire (STEP BBA).</i>	37
Figure III.6 : Bassin d'aération	38
Figure III.7 : <i>Décanteur secondaire (STEP BBA)</i>	39
Figure III.8 : <i>Air de stockage des boues déshydratées (STEP BBA)</i>	40
Figure III.9 : mesure du pH	43
Figure.III.11 : mesure Turbidité	44
Figure.III.12 : mesure de l'OD	45
Figure.III.13 : mesure le DBO5	47
Figure.III.14 : mesure de la DCO	48
Figure.III.15 : préparation de solution de nitrite	49
Figure.III.16 : préparation de solution de NO ₃ ⁻	50
Figure.III.17 : mesure NO ₃ ⁻	51
Figure.III.18 : préparation de PCA	51
Figure.III.19 : Tubes de culture stériles contenant du PCA pour analyses microbiologiques	53
Figure.III.20 : préparation de milieu Rothe	53
Figure. III.21: préparation de milieu de lits Key Lecture	55
Figure. III. 22 : test de lits Key	56
Figure.III.23 : préparation de milieu	57
Figure.III.24 : milieu préparé pour test fécaux	58
Figure.III.25 : test de CF	58
Figure III.26 : Cellule microbienne à double compartiment	59
FigureIII.27 : Préparation de la cellule microbienne à double Compartiment .	59
FigureIII.28: Electrode en carbone.	61

FigureIII.29 : Electrodes en cuivre .	61
Figure.III.30 : Piège à hydrogène pour mesurer le débit.	61
FigureIII.31 : Un générateur de courant régler sur 0,8 V.	62
FigureIII.32 : Le montage final.	62
Figure.IV.1. Température de l'eau usée avant et après traitement	79
Figure.IV.2. pH de l'eau usée avant et après traitement	80
Figure.IV.3. Conductivité de l'eau usée avant et après traitement	81
Figure.IV.4. Turbidité de l'eau usée avant et après traitement	82
Figure.IV.5. Salinité de l'eau usée avant et après traitement	83
Figure.IV.6.TDS de l'eau usée avant et après traitement	84
Figure.IV.7. DBO ₅ de l'eau usée avant et après traitement	85
Figure.IV.8. DCO de l'eau usée avant et après traitement	86
Figure.IV.9. Nitrate de l'eau usée avant et après traitement	87
Figure.IV.10. Nitrite de l'eau usée avant et après traitement	88
Figure.IV.11. Variation de l'intensité du courant en fonction du temps pour un électrolyseur microbienne	92
Figure. IV.12. Evolution de la quantité d'hydrogène produite au cours du temps (05 jours)	95

Liste des tableaux :

Titre	Page
Tableau I.1. Classification et « couleurs » d'hydrogène [3]	4
Tableaux I.2. Caractéristiques physico chimiques de l'hydrogène [4]	5
Tableaux I.3. Caractéristiques énergétiques de l'hydrogène [5]	5
Tableau.IV.1. Résultats de dénombrement des coliformes fécaux à 44 °C :	74
Tableau.IV.2. Résultats de dénombrement de la flore totale aérobique mésophile (FTAM),	75
Tableau.IV.3. Résultats de dénombrement de coliformes fécaux à 44 °C avant et après traitement	89
Tableau.IV.4. Résultats de la Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C avant et après traitement	90
Tableau.IV.5. Résultat du suivi du courant électrique sur cinq jours	91
Tableau. IV.6. Evolution de la quantité d'hydrogène produite au cours du temps (05 jours)	95

Liste des abréviations :

BBA: Bordj Bou Arreridj.

CE : Conductivité électrique.

CEM: cellule électrolytique microbienne.

CF: coliformes fécaux.

CT: coliformes totaux.

DBOs : Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours.

DCO : demander chimique en oxygène

MES : Matières en Suspensions.

Mg/l: Mili gramme par litre.

MO : Matière organique.

NO₂ - : Nitrite.

NO₃ - : Nitrate.

OD: oxygène dissous.

ONA: Office National de l'Assainissement.

SF: streptocoques fécaux

STEP: station d'épuration.

TEM: technologie électro-microbienne.

Introduction
générale

Introduction générale :

La crise énergétique mondiale, conjuguée à l'urgence climatique croissante, appelle à une transformation en profondeur des modes de production et de consommation d'énergie. Dans ce contexte, l'hydrogène émerge comme un vecteur énergétique stratégique, capable de jouer un rôle central dans la décarbonation de nombreux secteurs : transports, industrie lourde, production d'électricité ou encore stockage des énergies renouvelables intermittentes. Contrairement aux énergies fossiles, dont l'exploitation engendre d'importantes émissions de gaz à effet de serre, l'hydrogène, lorsqu'il est produit à partir de sources renouvelables, ne génère aucune émission directe de CO₂. Il représente ainsi une solution sérieuse aux défis environnementaux actuels, tout en offrant des performances énergétiques prometteuses.

Il convient cependant de rappeler que l'hydrogène n'est pas une source primaire d'énergie, mais un vecteur, nécessitant une étape de production préalable. L'impact environnemental de cette production dépend fortement de la technologie mise en œuvre. À ce jour, la majeure partie de l'hydrogène industriel provient encore de procédés conventionnels fortement émetteurs de carbone, tels que le vaporeformage du méthane, la gazéification du charbon ou l'oxydation partielle des hydrocarbures. Bien que ces méthodes soient techniquement maîtrisées et économiquement compétitives, elles posent d'importants problèmes de durabilité, en raison de leur bilan carbone élevé et de leur dépendance aux ressources fossiles.

Dans cette optique, le développement de procédés alternatifs, plus respectueux de l'environnement, devient indispensable. Parmi ceux-ci, l'électrolyse de l'eau – lorsqu'elle est alimentée par des énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien ou l'hydroélectricité – permet la production d'un hydrogène dit "vert". Bien qu'en plein essor, cette technologie se heurte encore à des obstacles technico-économiques majeurs : coût de l'électricité verte, rendement global, durabilité des composants (électrodes, membranes), etc.

C'est dans le prolongement de cette recherche d'alternatives durables qu'émergent les technologies électro-microbiennes, un champ innovant en pleine expansion. Ces procédés s'appuient sur des systèmes bio électrochimiques, tels que les cellules électrolytiques microbiennes (Microbial Electrolysis Cells, MECs), qui mobilisent des micro-organismes électroactifs pour catalyser des réactions d'oxydation et de réduction. En exploitant des substrats organiques, souvent issus de déchets ou de biomasse, ces systèmes permettent la production d'hydrogène à faible consommation énergétique, dans des conditions opérationnelles douces (température et pression modérées).

Les MECs présentent ainsi un double avantage : la valorisation de matières organiques biodégradables (eaux usées, effluents industriels, biomasse) et la production d'un hydrogène propre, avec des émissions très faibles, voire nulles, de polluants. Leur originalité réside dans leur approche intégrée et circulaire, à la croisée de la production énergétique et du traitement des déchets, contribuant à une économie plus durable et résiliente.

Toutefois, ces technologies restent aujourd'hui majoritairement à un stade expérimental ou semi-pilote, et plusieurs verrous technologiques subsistent : faible rendement global, cinétique microbienne lente, coût des matériaux, stabilité des électrodes, ou encore complexité des systèmes de pilotage.

Ce travail vise donc à proposer un panorama complet des technologies actuelles de production d'hydrogène, en abordant les procédés conventionnels, électrochimiques et biologiques. Une attention particulière sera portée aux technologies électro-microbiennes, considérées comme l'une des voies les plus prometteuses pour la production d'hydrogène vert à long terme. L'objectif est d'en comprendre le fonctionnement, d'évaluer leurs atouts, d'identifier leurs limites, et d'examiner leur potentiel d'intégration à grande échelle dans des systèmes énergétiques hybrides, en cohérence avec les enjeux de transition énergétique et d'économie circulaire.

Notre mémoire est présenté dans trois chapitres :

Le chapitre I résume les différentes voies de production de l'hydrogène vert

Dans le deuxième chapitre, on a développé un peu les technologies électro-microbiennes pour la production de l'hydrogène vert

Un troisième chapitre comporte notre procédure expérimentale

Un autre chapitre est consacré pour l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

*différentes voies de production de
l'hydrogène*

I.1. Introduction :

L'hydrogène, si on peut dire, déchaîne les passions tant du côté des scientifiques que du côté des industriels. Certains voient, en effet, en lui la solution ultime pour tous les problèmes environnementaux et énergétiques à venir, tandis que d'autres estiment qu'il ne s'agit que d'une vaine espérance. L'hydrogène est un vecteur énergétique et non une énergie primaire, comme l'est par exemple l'électricité. Il est donc nécessaire de posséder des technologies capables de le produire. Il en existe plusieurs, existantes et en cours de recherche, comme celles basées sur les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, etc.), le nucléaire ou encore les énergies renouvelables. D'autre part, une attention considérable a été prêtée au chauffage global dû à l'effet de serre chaude. La réduction et l'utilisation des gaz de serre chaude comme l'anhydride carbonique et le méthane deviennent donc plus en plus important. Toutefois, la route vers "l'économie de l'hydrogène" comprend encore de nombreux obstacles technique et économique tel que le stockage [1].

I.2. Définition de l'hydrogène vert





Le nom "Hydrogène" est composé de "hydro" eau et "Genno" engendrer. C'est l'élément le plus simple, le plus léger et le plus abondant dans l'univers, il occupe la première case du tableau périodique, et est utilisé comme source d'énergie. [2]

I.3. Classification et « couleurs » de l'hydrogène

L'hydrogène est classé en différentes catégories selon ses méthodes de production.

Des couleurs lui sont parfois associées (de façon plus ou moins fréquente) en fonction de ce mode de production et l'impact environnemental (Voir Tableau.II.1) :

Tableau I.1. Classification et « couleurs » d'hydrogène [3]

Type d'hydrogène	Source d'énergie	Caractéristiques
Hydrogène vert 	Énergie renouvelable (soleil, vent)	Production propre, sans émission de CO ₂
Hydrogène gris 	Charbon ou gaz naturel	Emet du CO ₂ , procédé polluant
Hydrogène bleu 	Charbon ou gaz + captage CO ₂	CO ₂ capté et stocké, impact réduit
Hydrogène jaune 	Électricité nucléaire	Electrolyse via nucléaire (surtout en France)

I.4. Caractéristiques physico chimiques et énergétiques de l'hydrogène

L'hydrogène possède des propriétés physico-chimiques uniques qui en font un élément clé dans de nombreux domaines, notamment l'énergie et la chimie. Il est un gaz incolore et inodore, extrêmement léger et très réactif. Il est également très énergétique, avec un potentiel calorifique élevé.

Les tableaux I.2 et II.3 résument ces différentes caractéristiques

Tableaux I.2. Caractéristiques physico chimiques de l'hydrogène [2]

Propriété	Valeur
Nom	Hydrogène
Symbole	H
Numéro atomique	1
Densité	0,08988g/L
Point de fusion	-259,14°C
Point d'ébullition	-252,87°C
Vitesse du son (27°C)	1310m/s

Tableaux I.3. Caractéristiques énergétiques de l'hydrogène [2]

Propriété	Valeur
Energie par kg	33kWh (vs 12 kWh pour pétrole)
Energie de liaison (H-H)	432kJ/mol
Enthalpie de formation (H ₂)	0kJ/mol
Ionisation	1312kJ/mol
Affinité électronique	0,754 eV

I.5. Les différentes utilisations de l'hydrogène vert :

L'hydrogène est aujourd'hui au cœur des solutions envisagées pour une transition énergétique propre. Ses applications s'étendent à plusieurs domaines, en particulier :

I.5.1. Dans le Secteur du transport :

De nombreux projets de démonstration de véhicules à hydrogène sont en cours dans le monde. Ces projets visent à tester la faisabilité et les performances de la technologie, pas encore son efficacité maximale. Les coûts actuels sont élevés, mais ils ne reflètent pas les coûts futurs, car la technologie évoluera avec le temps, comme ce fut le cas pour l'automobile au cours du dernier siècle.

Les carburants renouvelables comme l'hydrogène et les biocarburants sont coûteux aujourd'hui, mais pourraient devenir plus compétitifs si l'on prend en compte les coûts environnementaux et les taxes sur le CO₂. Pour être économiquement viables, les véhicules à hydrogène doivent être deux fois plus efficaces que les moteurs à combustion interne. Ils ont aujourd'hui des performances similaires aux véhicules électriques à batterie.

Quelques exemples d'utilisations actuelles :

- UPS utilise depuis 2003 des véhicules de livraison à pile à combustible.
- La Toyota FCHV, avec une pile à combustible PEM de 90 kW, atteint 155 km/h et 300 km d'autonomie.
- MAN a livré des bus à hydrogène à l'aéroport de Munich en 2004.
- Hambourg exploite des bus à hydrogène, comme Madrid et Reykjavik auparavant. [4]

I.5.2. Dans le Secteur aérospatial :

Le kérosène, utilisé actuellement dans l'aviation, génère d'importantes émissions de SO₂ et NO_x, tant lors de son **raffinage** que de sa **combustion**. En comparaison, l'**hydrogène renouvelable** est beaucoup plus respectueux de l'environnement et représente une solution prometteuse pour un transport aérien durable.

L'intégration à grande échelle de l'hydrogène dans l'aviation est **techniquement possible**, mais plusieurs défis doivent être relevés :

- Étude approfondie des **systèmes cryogéniques** (réservoirs, tuyauterie, isolation).
- Mise en place de **systèmes de détection de fuites**.
- Prise en compte du **volume important** nécessaire au stockage de l'hydrogène (impact sur l'aérodynamique).
- Optimisation du **flux laminaire** pour améliorer les performances.
- **Réduction des émissions de NO_x** même avec l'hydrogène.
- Meilleure compréhension des **cristaux de glace en altitude**. [4]

I.5.3. Dans le secteur de la Production d'électricité :

L'hydrogène est utilisé depuis longtemps dans l'industrie (chimie, électronique, métallurgie, verre) et dans le secteur spatial comme carburant. Aujourd'hui, il se positionne comme une solution prometteuse pour décarboner l'économie. Il peut servir à produire de la chaleur, alimenter des moyens de transport, ou encore stocker de l'énergie. En tant que vecteur énergétique, l'hydrogène permet de stocker l'électricité produite en excès par des sources renouvelables (comme le solaire ou l'éolien), grâce à l'électrolyse de l'eau. Cette méthode

convertit l'électricité verte en hydrogène, qui peut être stocké et réutilisé plus tard. Ce procédé, appelé Power to Gas, aide à réguler la production intermittente des énergies renouvelables. L'hydrogène peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité via des piles à combustible, qui ne rejettent que de l'eau et de la chaleur. Ce mode de production est propre, silencieux et utile dans les véhicules à hydrogène ou dans des lieux isolés.

I.6. Production industrielle de l'hydrogène

Ces dernières années, l'hydrogène s'impose progressivement comme l'un des carburants les plus prometteurs, en tant que source et vecteur d'énergie alternatif aux énergies fossiles classiques. Ce gaz présente plusieurs atouts par rapport à d'autres formes d'énergie renouvelable. Tout d'abord, l'hydrogène se distingue par une combustion propre, n'engendrant ni gaz à effet de serre, ni appauvrissement de la couche d'ozone, ni pluies acides, car son unique résidu est la vapeur d'eau. Ensuite, il possède un pouvoir énergétique élevé. Comparé aux autres gaz combustibles, l'hydrogène affiche la plus grande densité énergétique par masse : entre 120 et 142 MJ/kg, contre 50 MJ/kg pour le méthane, 26,8 MJ/kg pour l'éthanol et 44 MJ/kg pour l'essence. De nos jours, l'hydrogène joue un rôle clé dans l'industrie chimique, en particulier pour la fabrication de l'ammoniac via le procédé Haber-Bosch — une substance utilisée pour produire des engrais — ainsi que dans le secteur métallurgique, où il est employé comme gaz protecteur lors des traitements thermiques à haute température. [5]

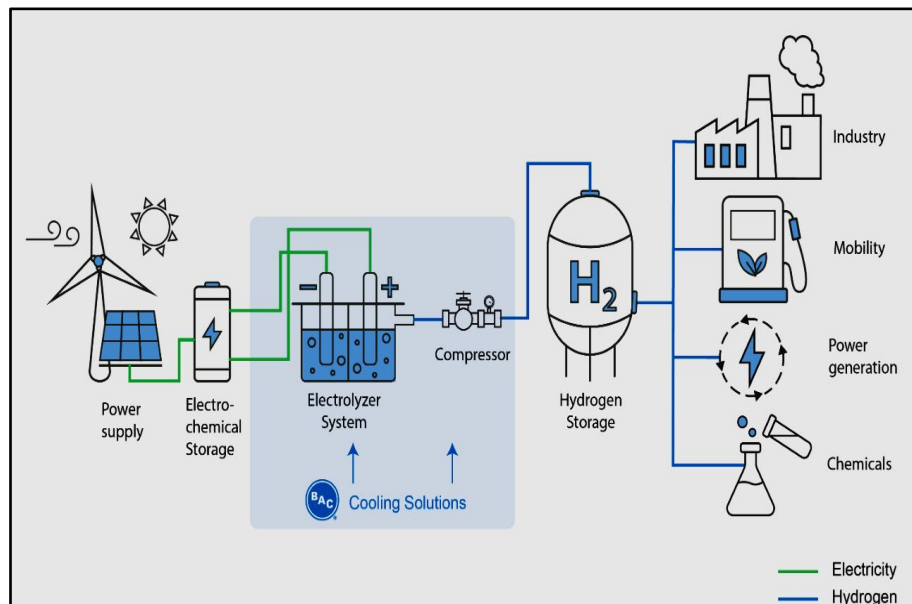
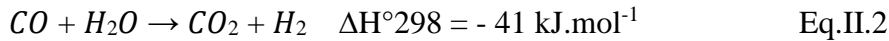
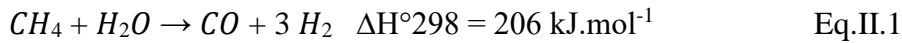


Figure.I.1 : Production d'hydrogène vert [5]

I.6.1. Production à partir d'hydrocarbures :

I.6.1.1. Vaporeformage d'hydrocarbure :

Ce procédé consiste à réduire la vapeur d'eau par les hydrocarbures, majoritairement le méthane issu du gaz naturel. Dans ce cas-là, les réactions mises en jeu sont les suivantes :



La réaction (**Eq.II.1**) étant très endothermique, le réacteur doit être maintenu à très haute température (800-1000°C) et à une pression comprise entre 1,5 et 3 MPa pour obtenir des conversions élevées de méthane. La réaction (**Eq.II.2**), dite de vaporeformage ou water gas shift, est légèrement exothermique et plus ou moins complète, selon qu'elle est effectuée en une ou deux étapes. Néanmoins, la réaction globale reste endothermique. Un catalyseur à base de nickel est utilisé pour les deux réactions.

L'hydrogène produit par ce procédé est majoritairement utilisé pour la production d'ammoniac et le raffinage des résidus de distillation de produits pétroliers. Le bilan carbone du procédé est de 10 à 11 tonnes de CO₂ par tonne d'hydrogène produite, avec une efficacité énergétique de 65% [5].

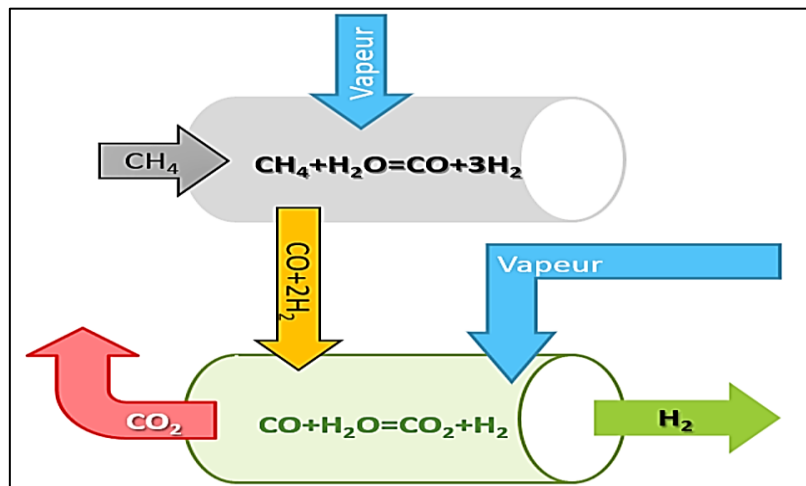


Figure. I.2 : Vaporeformage de l'hydrocarbure [5].

I.6.1.2. Production d'hydrogène par gazéification du charbon :

La production d'hydrogène par gazéification du charbon est un processus qui implique la conversion du charbon en gaz de synthèse, un mélange principalement composé d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone. Ce processus se déroule à haute température et en présence d'un agent gazéifiant, tel que la vapeur d'eau, l'oxygène ou l'air. Le gaz de

synthèse peut ensuite être utilisé pour produire de l'hydrogène par le biais de réactions supplémentaires, telles que la réaction de déplacement eau-gaz.

Voici les étapes clés de la production d'hydrogène par gazéification du charbon :

1. Gazéification : Le charbon est introduit dans un gazéificateur où il réagit avec l'agent gazéifiant à haute température. Les réactions chimiques transforment le charbon en gaz de synthèse.
2. Purification : Le gaz de synthèse est purifié pour éliminer les impuretés telles que le soufre, les particules et d'autres contaminants.
3. Réaction de déplacement eau-gaz : Le monoxyde de carbone réagit avec la vapeur d'eau en présence d'un catalyseur pour produire du dioxyde de carbone et de l'hydrogène.
4. Séparation de l'hydrogène : L'hydrogène est séparé du dioxyde de carbone et d'autres gaz par des techniques telles que l'adsorption ou la membrane. [6].

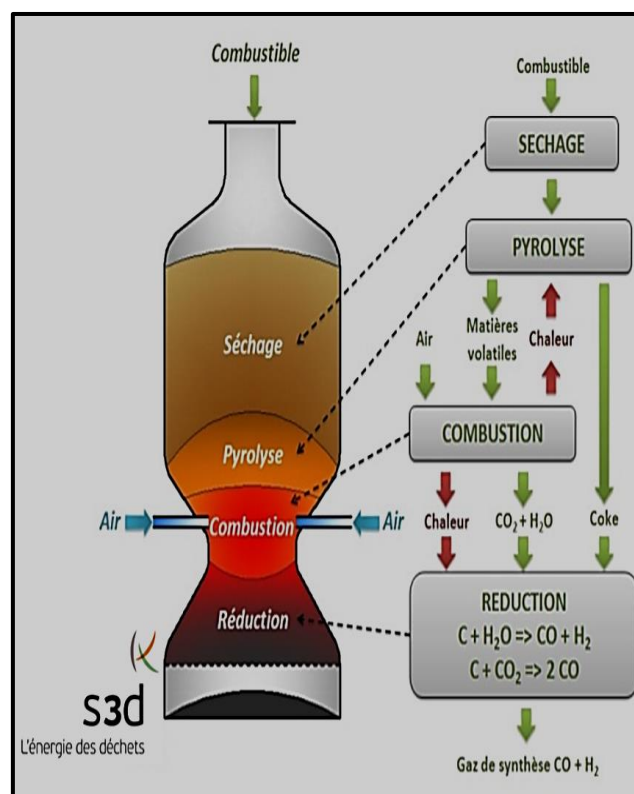


Figure.I.3 : Mécanisme de la gazéification [6].

I.6.1.3. Production d'hydrogène par oxydation partielle des hydrocarbures :

Lors de l'oxydation partielle, le méthane ainsi que les autres hydrocarbures présents dans le gaz naturel réagissent avec une quantité limitée d'oxygène, souvent apportée par l'air. Cette quantité d'oxygène, inférieure à celle requise pour une combustion complète, ne permet pas

d'oxyder totalement les hydrocarbures en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau. En conséquence, la réaction produit principalement du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, accompagnés d'azote si l'air est utilisé au lieu de l'oxygène pur. On observe également la formation de faibles quantités de dioxyde de carbone et d'autres sous-produits. Ensuite, une étape de conversion eau-gaz permet au monoxyde de carbone de réagir avec la vapeur d'eau pour générer du dioxyde de carbone supplémentaire ainsi que davantage d'hydrogène [7].

I.6.2. Production d'hydrogène par électrolyse

La méthode d'électrolyse de l'eau, notamment en milieu alcalin, constitue la première technologie développée à grande échelle pour produire de l'hydrogène industriellement. Ce procédé consiste à séparer les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'un courant électrique.

Cependant, cette technique présente une contrainte majeure : sa forte consommation d'énergie, estimée entre 4,5 et 5 kWh pour produire un Nm³ d'hydrogène, ce qui rend le processus coûteux. Ce facteur économique limite son application, à moins de disposer d'une source d'électricité à faible coût, ce qui est le cas dans certains pays.

Afin de rendre cette technologie plus performante et rentable, plusieurs pistes d'innovation sont actuellement explorées :

- La mise au point de membranes plus efficaces,
- La création de cellules sans écart inter-électrode (cellules à « intervalle zéro »),
- L'élaboration de nouveaux électrolytes plus conducteurs,
- Le développement de matériaux avancés pour les électrodes, ainsi que l'utilisation de catalyseurs métalliques appelés activateurs d'ions, à base de cobalt, molybdène, etc., permettant de réduire l'énergie requise pour l'électrolyse jusqu'à 10 %.

L'un des principaux avantages de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir un hydrogène très pur et respectueux de l'environnement, à condition que l'électricité utilisée soit issue de sources renouvelables. Dans ce contexte, l'hydrogène produit est qualifié de « vert », car il ne génère pas d'émissions de gaz à effet de serre.

De plus, l'utilisation de l'électricité durant les périodes creuses (heures de faible demande) permet de réduire les coûts de production, tout en optimisant le fonctionnement des centrales électriques. Cela contribue indirectement à une diminution globale des émissions de CO₂. Parmi les énergies les plus avantageuses pour alimenter l'électrolyse, l'hydroélectricité se démarque par ses atouts économiques et écologiques.

Une approche innovante consiste à associer un électrolyseur à une pile à combustible. Ce couplage représente une solution pertinente pour réguler l'approvisionnement en électricité dans les systèmes basés sur des énergies intermittentes comme le solaire ou l'éolien:

- L'électrolyseur fonctionne en période de faible demande pour stocker l'énergie sous forme d'hydrogène,
- La pile à combustible prend le relais lors des pics de consommation pour restituer de l'électricité.

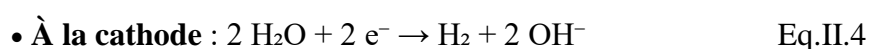
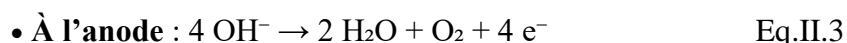
Des batteries sont également intégrées pour le stockage de courte durée. Pour améliorer la gestion de ces systèmes hybrides, des algorithmes de contrôle intelligents, basés sur la logique floue, sont en développement. Leur but est d'optimiser en temps réel la production, le stockage et la distribution de l'énergie [4].

Pour des raisons de cinétique, les anodes utilisées pour l'électrolyse de l'eau sont des électrodes de titane revêtues par des oxydes de métaux précieux ou semi-précieux (ruthénium, iridium, platine, etc.). Les cathodes étaient à base de nickel mais tendent à être remplacées par les mêmes matériaux et revêtements que les anodes. Il est nécessaire d'ajouter un séparateur entre anode et cathode. Ce séparateur consistait en un simple diaphragme avant que la technologie des membranes entre sur le marché dans les années 70. Actuellement, les membranes utilisées dans le procédé Chlore-Soude sont des membranes échangeuses de cations et constituées de polymères fluorés avec greffes de terminaisons COO^- ou SO^{-3} comme le Nafion 117.

I.7. L'électrolyse de l'eau :

L'électrolyse de l'eau est un procédé qui permet de produire de l'hydrogène en décomposant la molécule d'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et en oxygène (O_2), grâce à l'apport d'énergie électrique. Bien que ce procédé fournisse un hydrogène de très haute pureté, utilisé notamment dans les secteurs médical et spatial, il reste peu utilisé à grande échelle en raison de son coût élevé. Contrairement au procédé chlore-soude, seul l'hydrogène constitue ici un produit de valeur.

Les réactions qui se produisent dans une cellule d'électrolyse sont les suivantes :



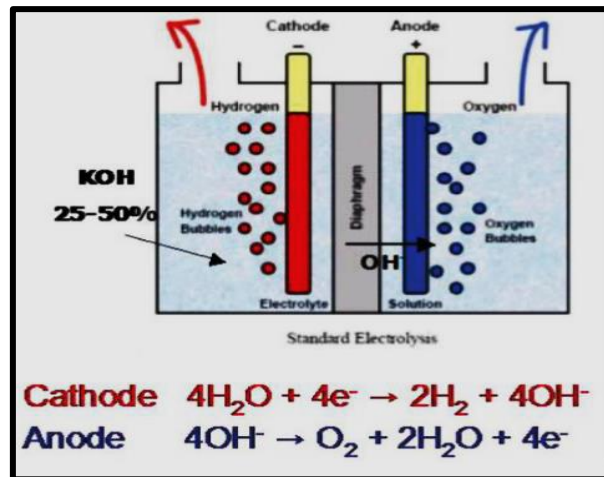


Figure.I.4. Principe de l'électrolyse [8]

La tension minimale théorique requise pour enclencher la réaction est de 1,23 V, appelée tension de décomposition de l'eau. Cependant, en pratique, il faut appliquer une tension plus élevée (entre 1,8 V et 2,2 V) pour compenser les pertes dues aux surtensions électrochimiques et à la résistance interne de la cellule.

Plusieurs technologies sont disponibles pour réaliser cette électrolyse à l'échelle industrielle :

- L'électrolyse alcaline, la plus ancienne et la plus développée.
- L'électrolyse à haute température, qui utilise la vapeur d'eau [8].

I.7.1. Électrolyse alcaline :

Initialement, les électrolyseurs industriels fonctionnaient en milieu acide (souvent avec de l'acide sulfurique) et utilisaient le plomb comme matériau conducteur. Bien que le milieu acide soit favorable à la réaction à la cathode, la forte corrosion des électrodes a conduit à l'abandon de cette solution. Aujourd'hui, la majorité des électrolyseurs utilisent une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) concentrée à 30 %. Cependant, cette solution présente des risques pour l'environnement et la sécurité lors de son traitement ou de sa manipulation.

Les anodes sont fabriquées en acier nickelé pour les températures inférieures à 90°C, ou en nickel massif au-delà. Côté cathode, le milieu basique limite la corrosion, permettant l'utilisation de fer ou d'acier doux jusqu'à 100°C. Pour améliorer la performance des électrodes, certains alliages contenant du nickel, du molybdène ou du cobalt sont employés.

Comme pour le procédé chlore-soude, un séparateur est indispensable pour éviter le mélange des gaz produits (hydrogène et oxygène), qui pourrait former un mélange explosif.

Dans les électrolyseurs alcalins, ce séparateur est souvent un matériau à base d'amiante blanc (chrysotile), sous forme de toile ou de carton. [8]

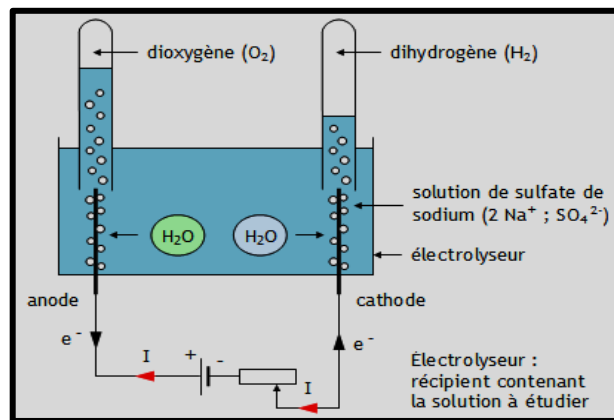


Figure.I.5. Principe de l'électrolyse alcaline [8]

I.8. Procédés biologiques de production de l'hydrogène :

Les procédés biologiques de production d'hydrogène impliquent l'utilisation de micro-organismes, tels que les bactéries et les algues, pour produire de l'hydrogène à partir de matières organiques ou d'eau. Ces procédés offrent une alternative prometteuse à la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, car ils sont plus respectueux de l'environnement et peuvent utiliser des ressources renouvelables. [9]

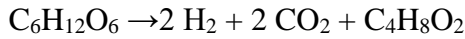
Voici quelques-uns des principaux procédés biologiques de production d'hydrogène :

I.8.1. Fermentation :

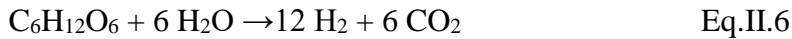
Les procédés fermentaires permettent la production d'hydrogène à partir des hydrates de carbone simples (saccharose, glucose) ou de polysaccharides complexes. Les productivités de tels systèmes sont intéressantes, de l'ordre de quelques litres d'hydrogène. Les rendements restent cependant limités en termes de moles d'hydrogène produit par mole de substrat du fait de la co-production d'acides organiques non-fermentescibles. Par exemple, la fermentation du glucose produit au maximum

a) 4 moles d'hydrogène par mole de glucose par la voie métabolique de l'acide acétique : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}_2 + 2\text{CO}_2 + 2 \text{CH}_3\text{COOH}$ Eq.II.5

b) 2 moles d'hydrogène par mole de glucose si le co-produit est l'acide butyrique :



En pratique, les techniques de fermentation donnent de 2.4 à 3.2 moles d'hydrogène par mole de glucose). Ceci est dû au grand nombre de métabolismes impliqués en cultures mixtes. Il y a aussi Bien que des pistes proposent d'augmenter cette conversion avec par exemple : la conversion des acides organiques tels que l'acétate et le butyrate issus de la fermentation la stœchiométrie maximale de 12 moles d'hydrogène par mole de glucose est encore loin d'être atteinte



1.8.2. Les photo-bioprocédés

Les algues ou bactéries photosynthétiques assimilent les photons de la lumière pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau des carbohydrates et de l'oxygène. Les photons oxydent des substrats organiques à la place de la molécule d'eau. Elle est réalisée par les bactéries pourpres telles que Rhodobacter ou Rhodospseudomonas. Le rendement théorique de conversion de l'énergie lumineuse en hydrogène est proche de 100%. Cependant, en réalité les rendements obtenus sont proche de 4%. Ces faibles rendements peuvent être expliqués par l'inhibition due à l'excès de lumière. Certains micro-organismes, peuvent aussi utiliser l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène. Cependant les productivités en hydrogène répertoriées dans la littérature sont faibles, de l'ordre de 0,007 mmol H₂/L/h à cause de la forte sensibilité des hydrogénases vis-à-vis de l'oxygène qui est malheureusement un des produits de la réaction. [10]

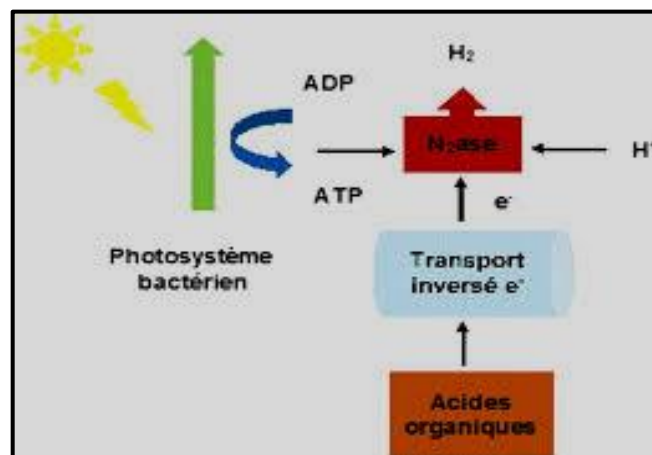


Figure.I.6. Principe de photo-bioprocédé pour la production de l'hydrogène [10]

Références bibliographiques

- [1] : Ziane, Z. E. A. (2018). Production d'hydrogène à partir de gaz naturel dans des réacteurs membranaires (Doctoral dissertation).
- [2] : Wiesenfeld, B. (2022). L'hydrogène vert : Le défi de demain, pour une énergie inépuisable et décarbonée. EDP Sciences.
- [3] : BOUAZIZ, N , & ALLAM,A ,(2023). Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'Hydrogène vert (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah-Ouargla, Faculté des Hydrocarbures et des énergies Renouvelables et des sciences de la Terre et de l'univers, Département des énergies renouvelable .
- [4] : M'RAOUI, A. *Étude de la production d'hydrogène par des sources renouvelables* (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid).
- [5] : Roubaud, E. (2019). Technologie électro-microbienne pour le traitement des eaux usées couplé à la récupération d'hydrogène (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [6] : Speight, J. G. (2013). **Handbook of Coal Analysis**. John Wiley & Sons.
- Wang, J., et al. (2016). Coal gasification: Technology and applications. **Energy**, **116**, 1184-1197.
- [7] : Zhong Zhang J., Li J., Li Y., Zhao Y., "Hydrogen Generation, Storage, and Utilization", éd. Wiley, 2014
- [8] : Phan, T. S. (2020). Élaboration, caractérisation et mise en œuvre d'un catalyseur dans le reformage du biogaz en vue de la production d'hydrogène vert (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
- [9] : Claassen, J. A., et al. (2006). Biological hydrogen production: potentials and challenges.
- [10] : Benkaraache, A. (2017). Production de l'hydrogène par un procédé d'électrosynthèse microbienne (ESM) (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).

Chapitre II:
technologies -électro-
microbiennes pour la
production de l'hydrogène
vert

II.1. Introduction :

La question du traitement durable des eaux usées s'impose aujourd'hui comme un défi crucial dans le contexte de la transition écologique mondiale. Face à l'augmentation de la pression sur les ressources en eau et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les procédés classiques de traitement atteignent leurs limites d'efficacité. C'est dans ce cadre que les technologies bio électrochimiques, et en particulier l'électrolyse microbienne, se distinguent comme des alternatives innovantes à fort potentiel. Ces technologies offrent une approche intégrée qui combine à la fois la dépollution des effluents et la valorisation énergétique de la matière organique contenue dans les eaux usées.

L'électrolyse microbienne repose sur l'activité de microorganismes électro actifs capables de provoquer des réactions d'oxydo-réduction en interaction directe avec des électrodes. Ces microorganismes oxydent les composés organiques à la bioanode, générant un flux d'électrons qui se dirige vers la cathode, où ils peuvent être utilisés pour produire de l'hydrogène ou d'autres composés valorisables. Ce procédé permet ainsi de conjuguer traitement des eaux et production d'énergie, s'inscrivant pleinement dans une logique de développement durable et d'économie circulaire.

Ce chapitre a pour objectif de détailler le fonctionnement des réacteurs d'électrolyse microbienne. Il s'attachera à expliciter les principes fondamentaux de cette technologie, en mettant en avant le rôle central de la bioanode et de la cathode, les mécanismes de transfert d'électrons, ainsi que les matériaux utilisés pour améliorer l'efficacité des systèmes. Par la suite, seront abordées les différentes configurations de réacteurs, les compartiments utilisés, ainsi que les méthodes de couplage entre épuration des eaux et production d'hydrogène. Enfin, les perspectives d'application de ces technologies seront discutées, notamment en ce qui concerne la valorisation des sous-produits issus de l'assainissement et des biodéchets, en vue de promouvoir des solutions de traitement plus écologiques, performantes et durables.

II.2. Conductivité des électrolytes :

Le procédé d'électrolyse microbienne présente de fortes similarités avec celui de l'électrosynthèse microbienne, notamment lorsqu'il s'agit de systèmes à deux compartiments, avec une bioanode oxydant des déchets organiques et une cathode souvent abiotique dédiée à la production d'hydrogène. Toutefois, l'électrolyse microbienne est une technologie plus mature, tandis que l'électrosynthèse microbienne demeure un concept plus récent encore en développement.

Lorsque les deux procédés partagent une configuration similaire, leurs avantages et limites sont largement communs. L'un des facteurs critiques pour leur performance est la conductivité ionique des électrolytes utilisés dans les compartiments anodique et cathodique. Une conductivité élevée est essentielle pour réduire la résistance interne du système et ainsi minimiser l'apport énergétique nécessaire au fonctionnement des électrolyseurs microbiens.

Dans ce contexte, la thèse de Raphaël Rousseau a montré que l'utilisation de sédiments de salins issus d'un environnement riche en chlorure de sodium (NaCl) permettait de développer des bioanodes actives à des conductivités élevées, de l'ordre de 100 mS/cm. Dans ces conditions, les genres bactériens *Desulfuromonas* et *Marinobacter* ont été sélectionnés au sein du biofilm.

Cependant, pour un effluent à faible salinité, L'ajout de sels est donc exclu, ce qui impose une contrainte forte : la conductivité de l'anolyte doit rester comprise entre 1 et 10 mS/cm. Par conséquent, seule la conductivité du catholyte peut être optimisée.

Enfin, une revue propose un état de l'art complet sur l'électrolyse microbienne, en présentant les différentes configurations possibles des cellules d'électrolyse microbienne (CEM), ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs. [1]

II.2.1 Tension d'électrolyse

Le calcul de la tension thermodynamique de cette réaction à pH 7 donne une valeur de 0,17 V, soit 7 fois moins que celle de l'électrolyse de l'eau « standard » qui est de 1,23 V [2]

Il y a donc un intérêt certain à produire de l'hydrogène grâce à une CEM car, en théorie, il faudrait 7 fois moins d'énergie électrique qu'avec un électrolyseur standard pour produire une même quantité d'hydrogène.

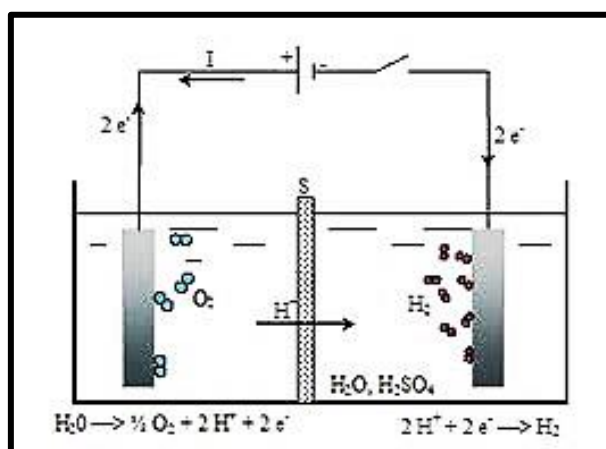


Figure.II.1. Procédés électrolytiques pour la production d'hydrogène par les eaux usées [2]

II.3. La cathode : siège de l'électrosynthèse microbienne

La cathode joue un rôle clé dans le fonctionnement des systèmes d'électrosynthèse microbienne (CEM). Dans ce type de procédé, les électrons générés par l'oxydation de composés organiques à l'anode sont transférés vers la cathode, où ils sont exploités par des bactéries électroactives pour réaliser des réactions de réduction, telles que la production de dihydrogène. Ce mécanisme repose sur l'action de micro-organismes capables d'interagir directement avec des électrodes solides, sans recourir à un accepteur d'électrons soluble. Grâce à ces interactions biologiques, l'énergie électrique est convertie en composés chimiques valorisables (**Figure.II.2**) [3].

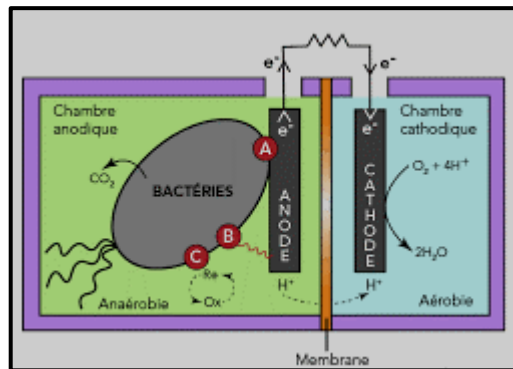


Figure.II.2. Principe de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse microbienne [3]

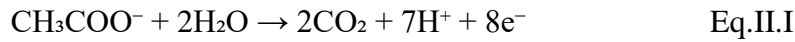
Afin de réduire au maximum la surtension associée à cette réaction, il est essentiel de sélectionner un matériau d'électrode doté de bonnes propriétés catalytiques. Le platine, souvent utilisé sous forme de dépôt sur un support, constitue une référence en la matière. Toutefois, en raison de son coût élevé, il ne représente pas une solution économiquement viable pour des applications à l'échelle industrielle. En alternative, des matériaux plus abordables comme l'acier inoxydable sont déjà employés dans certains réacteurs pilotes, offrant un compromis intéressant entre performance et coût.

II.4. La bio anode :

Les bio anodes occupent une position centrale dans les systèmes bio électrochimiques, où elles assurent l'oxydation de composés organiques. Lorsqu'un substrat tel que l'acétate est dégradé à la surface de l'anode, cette décomposition biologique entraîne la libération de protons (H^+) et d'électrons (e^-). Ces électrons, issus de l'activité de biofilms électro actifs, sont ensuite captés par l'anode, transportés à travers le matériau conducteur de l'électrode, puis dirigés vers

la cathode via un circuit externe, permettant ainsi la production d'un courant électrique (Figure.II.2).

Par exemple :



(Via l'activité de biofilms électro actifs)

8 moles d'électrons sont produites à partir d'une mole d'acétate. Une acidification locale apparaît à l'anode. Le milieu synthétique utilisé est souvent composé d'une solution tamponnée par des phosphates qui améliore le transport de protons hors du biofilm et limite l'impact de l'acidification sur le biofilm.

Les électrons ainsi générés sont ensuite captés par l'anode, transitent à travers le matériau conducteur de l'électrode, et sont dirigés vers la cathode via un circuit externe, permettant la génération d'un courant électrique. [4]

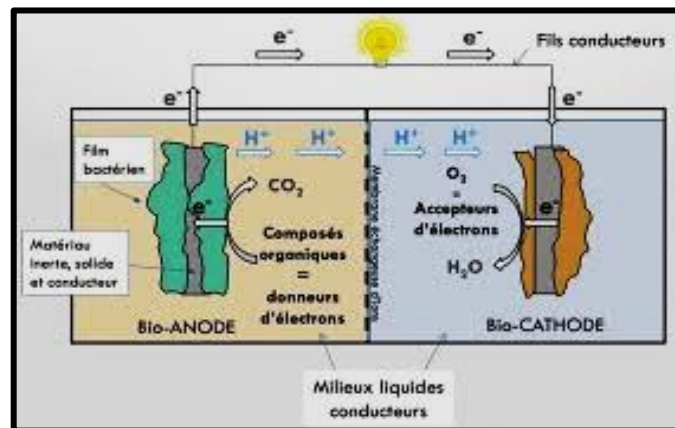


Figure.II.3. L'anode siège de l'oxydation microbienne [4]

II.4.1. Mécanismes de transfert d'électrons entre les substrats et l'anode :

Dans les systèmes biologiques, certains micro-organismes sont capables d'oxyder une grande variété de substrats organiques, ce qui entraîne la production d'électrons à l'intérieur de leurs cellules. Ces électrons participent ensuite à une série de réactions biochimiques au sein de la chaîne respiratoire, jusqu'à leur transfert final vers un accepteur d'électrons situé à l'extérieur de la cellule. En général, cet accepteur est une molécule soluble comme l'oxygène. Toutefois, d'autres composés, tels que les acides organiques, les nitrates, les sulfates ou encore certains oxydes métalliques, peuvent également remplir ce rôle [5].

Le transfert d'électrons entre un microorganisme et une électrode peut être direct ou indirect (Figure.II.3).

II.4.1.1. Transfert indirect

Le transfert indirect d'électrons peut également s'effectuer via l'oxydation d'un produit issu du métabolisme bactérien. Un exemple est l'hydrogène produit par fermentation chez certaines bactéries et qui est ensuite oxydé à la surface de l'anode [6]

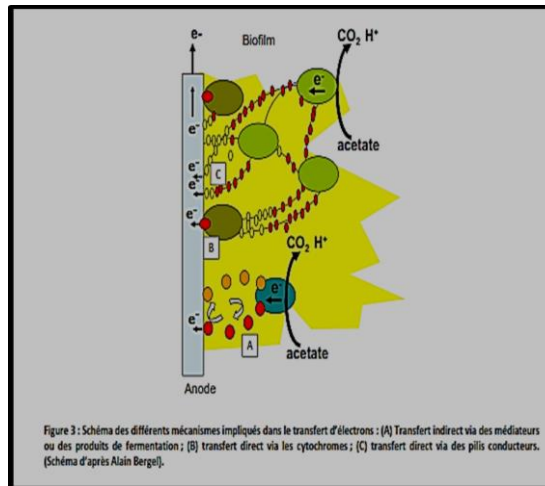


Figure.II.4. Mécanismes de transfert d'électrons entre les substrats et l'anode [6]

De nombreuses bactéries comme *Shewanella oneidensis*, *Pseudomonas alcaliphila*, *Pseudomonas aeruginosa* sont capables de produire leur propre médiateur.

II.4.1.2. Transfert direct

Le transfert direct d'électrons entre la bactérie et l'électrode se fait par contact direct entre la membrane externe de la bactérie et la surface de l'anode. L'échange ultime d'électrons entre la cellule et l'électrode est assuré par des protéines membranaires [7]

II.4.2. Rendement faradique

Le rendement faradique anodique correspond à la part de matière organique dégradée qui est effectivement convertie en électricité. C'est la charge qui passe dans le circuit électrique durant une période donnée, mesurée par intégration du courant, divisée par la charge théorique qui aurait été produite si toute la matière organique dégradée pendant la période l'avait été par oxydation électrochimique [7] :

$$CE = \frac{\int_0^t i(t) dt}{b.F.n_a} \quad \text{Eq.II.2}$$

Avec b : le nombre de moles d'électrons produites par moles de substrat oxydé (8 pour l'acétate) ; F : la constante de Faraday (Cb/moles d'électrons) ; n : le nombre de moles de substrat consommées.

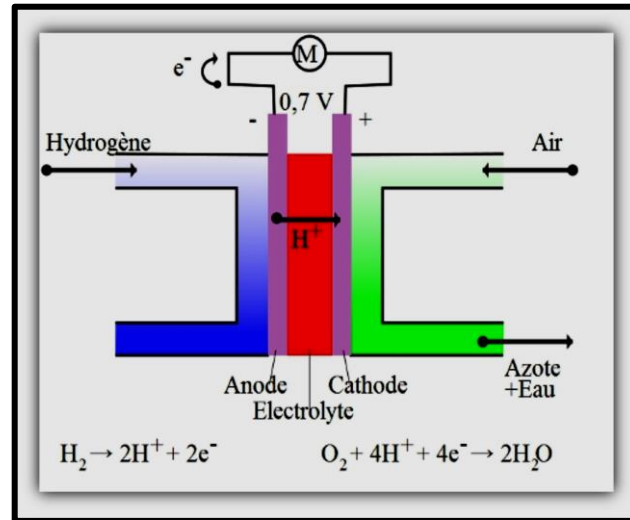


Figure.II.5. Rendement faradique anodique [7]

II.4.3. Stratégie de préparation de la bioanode

La formation d'un biofilm bactérien est un phénomène spontané. Les bactéries se déplacent librement dans le milieu aqueux et s'attachent aux surfaces qu'elles rencontrent par liaisons de Van der Waals ou électrostatiques. Ces liaisons étant fragiles, certaines bactéries se décrochent de la surface. Les bactéries restantes sécrètent des polysaccharides et des protéines renforçant les interactions avec la surface et rendant l'adhésion irréversible.

Les bactéries entament ensuite la division cellulaire et forment des micro-colonies qui vont croître, donnant une structure tridimensionnelle au biofilm. Une fois le biofilm arrivé à maturation, un équilibre s'établit entre la division cellulaire et le décrochage des bactéries suite à des carences en nutriment ou des stress liés à l'environnement (Figure II.4) [8]

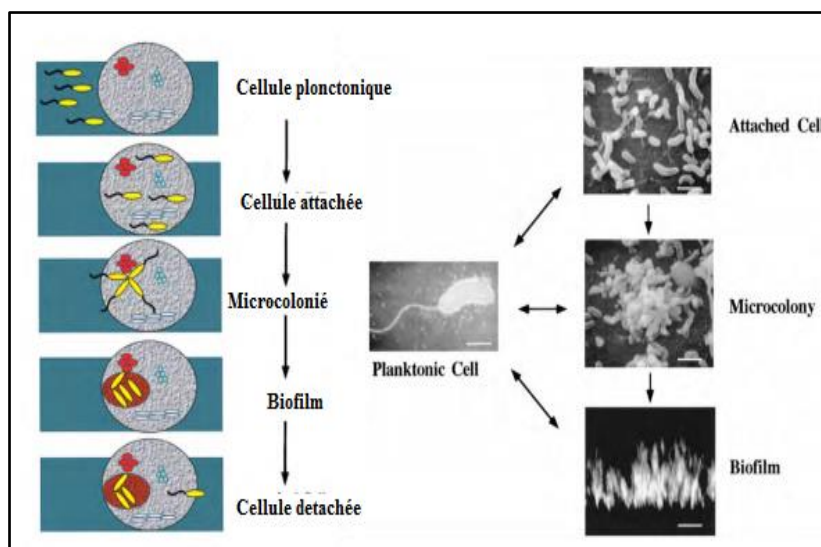


Figure II.6 : Etapes de formation d'un biofilm microbien. Schématique (gauche) et par observations au microscope électronique à balayage et microscope confocal (droite). Modifié d'après [8]

II.5. Les technologies électro-microbiennes pour la valorisation des résidus de L'assainissement :

Au-delà de leur rôle en tant que biocapteurs, les technologies électrochimiques microbiennes (TEM) présentent un fort potentiel dans le traitement et la valorisation des déchets. Dès 1991, Habermann et Pommer ont mis en évidence l'intérêt des piles à combustible microbiennes (PACM) pour le traitement des eaux usées. En utilisant des déchets comme substrat à l'anode, ces systèmes permettent non seulement de générer un courant électrique, mais aussi d'accélérer la dégradation de la matière organique, améliorant ainsi l'efficacité du traitement.

Les TEM ne se limitent pas à la réduction de la demande chimique en oxygène (DCO) : elles peuvent également être utilisées pour l'élimination des nitrates, des sulfures ou encore pour la récupération de métaux comme le cuivre. Dans le laboratoire du professeur Bruce Logan, ont démontré qu'il était possible d'exploiter des eaux usées comme source d'énergie dans une PACM, produisant jusqu'à 26 mW/m² tout en réduisant la DCO de 80 %. Néanmoins, les performances restent modestes avec des effluents réels : 0,18 A/m² pour des eaux usées urbaines, 2 A/m² avec des effluents de brasserie, 3 A/m² pour des eaux issues de chocolaterie, et 4 à 6 A/m² pour des effluents de l'industrie papetière.

Comparées aux résultats obtenus avec des substrats synthétiques comme l'acétate, ces performances sont encore limitées. Il reste donc essentiel de poursuivre les recherches pour

démontrer l'efficacité des TEM en conditions réelles et envisager leur intégration à grande échelle dans les systèmes de traitement des eaux usées. [1]

II.5.1. Valorisation des bio déchets :

Les biodéchets, issus des résidus organiques d'origine domestique, agroalimentaire ou agricole, représentent une source d'énergie renouvelable à ne pas négliger. Intégrés aux systèmes électro-microbiens, ils peuvent constituer une alternative ou un complément efficace aux eaux usées en tant que substrats, contribuant ainsi à accroître la production de bio hydrogène.

La co-digestion électro-microbienne de ces déchets induit une synergie à la fois microbienne et chimique, ce qui améliore significativement le taux de dégradation de la matière organique ainsi que la densité de courant produite. Par ailleurs, l'exploitation des bio déchets permet de valoriser des flux organiques souvent sous-utilisés, tout en limitant leur impact environnemental.

Des recherches récentes indiquent que certains biodéchets, particulièrement riches en sucres ou en acides gras volatils, favorisent la formation de biofilms électroactifs stables et performants, optimisant ainsi la génération d'hydrogène dans les systèmes CEM. L'intégration de ces déchets dans une approche de traitement combiné permet ainsi de conjuguer efficacité énergétique et dépollution organique. [9].

II.5.2. Matériaux supports de bio anodes :

Pour développer des bio anodes à haute performance, une attention particulière a été portée au choix et à la mise en place des matériaux supports destinés à accueillir les surfaces actives, notamment celles à base d'or, dans les réacteurs électrochimiques. Deux types de supports ont principalement été employés : un dispositif fabriqué en Téflon, ainsi qu'un support basé sur un circuit imprimé (PCB).

II.5.2.1. Support en Téflon :

Le premier dispositif employé pour fixer les surfaces d'or consiste en un support en Téflon spécialement conçu. La surface active en or est insérée dans une niche du support, délimitée par un joint périphérique. Cette niche est fermée hermétiquement par un second élément du dispositif, laissant une ouverture de 1 cm² exposée au milieu liquide. La connexion électrique avec le potentiostat est assurée par un ressort en contact avec la surface conductrice.

Cependant, ce système présente certaines limites : la connectique est instable, l'installation est complexe, et une mauvaise connexion peut induire des problèmes de résistivité. Ces inconvénients ont conduit à l'adoption d'un système plus fiable.

II.5.2.2. Support en PCB (Circuit imprimé) :

Le second dispositif est basé sur un support en circuit imprimé (PCB), offrant une connectique plus stable et plus adaptée aux conditions expérimentales. Ce support mesure $7 \times 1,8$ cm et comporte plusieurs plots de soudure reliés à des fils de cuivre. La surface d'or est fixée au support et reliée électriquement par microsoudures. Une couche de silicone biocompatible est appliquée afin de restreindre la surface active exposée à 1 cm^2 .

Ce système garantit une meilleure étanchéité, une stabilité accrue de la connexion et une mise en œuvre plus fiable dans les réacteurs anaérobies. [10]

II.6. Les électrodes tridimensionnelles pour augmenter les performances anodiques :

Des avancées notables ont été réalisées dans le développement d'électrodes tridimensionnelles (3D) pour améliorer les performances des systèmes électrochimiques microbiens. Une configuration innovante a notamment été proposée en enrobant les fibres d'un textile macroporeux avec des nanotubes de carbone. Cette structure 3D combine une bonne conductivité, une biocompatibilité adaptée au développement du biofilm et une architecture ouverte favorable aux échanges. Ce type d'anode a permis d'atteindre une densité de courant de $7,2 \text{ A/m}^2$, soit une augmentation d'un facteur 2,6 par rapport à une électrode en tissu de carbone classique ($2,8 \text{ A/m}^2$).

Dans le même esprit, ont amélioré les performances obtenues avec du papier carbone en utilisant une brosse en graphite comme anode. Cette nouvelle géométrie a permis d'atteindre une puissance de 1430 mW/m^2 , contre 600 mW/m^2 pour le papier carbone.

L'utilisation d'électrodes poreuses en 3D, telles que le feutre de graphite, a également conduit à une amélioration des densités de courant anodiques, ainsi qu'il travaillant sur un effluent de porcherie, ont quant à eux proposé une configuration combinant du feutre de carbone et des granules de graphite. Cette combinaison s'est révélée plus performante que l'utilisation du feutre seul.

La porosité élevée et la taille importante des pores sont des critères essentiels pour optimiser le fonctionnement de ces électrodes. Une structure très poreuse facilite la croissance du biofilm en profondeur dans l'électrode sans nuire à la diffusion des substrats et des

nutriments. Des analyses en microscopie électronique à balayage (Figure 5) montrent des tailles de pores ou interstices variant entre 20 et 3000 μm selon les matériaux utilisés.

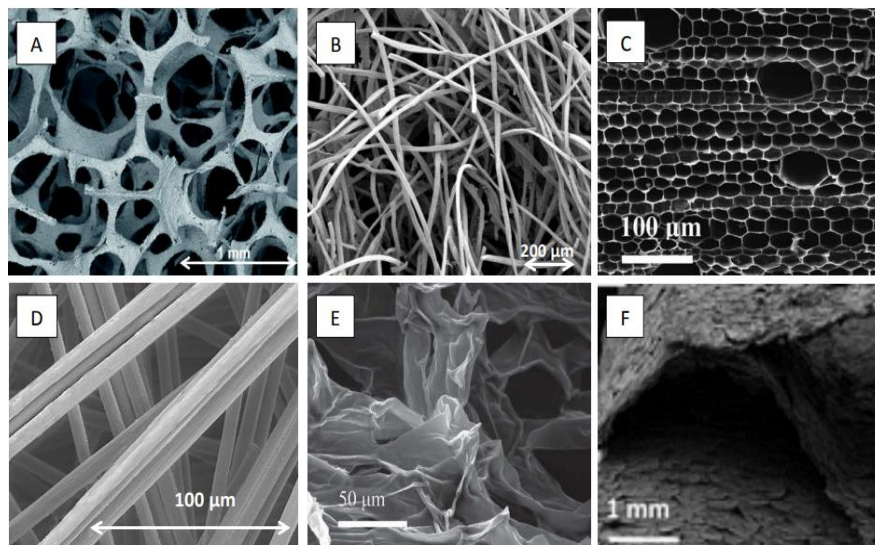


Figure. II.7. Photographies de structures d'électrodes 3D en microscopie électronique à balayage [1]

L'utilisation d'électrodes tridimensionnelles (3D) ne garantit pas systématiquement une augmentation durable des performances électrochimiques. En effet, des limitations importantes subsistent, notamment le risque d'encrassement des pores, soit par le développement excessif du biofilm, soit par l'accumulation de particules présentes dans l'effluent à traiter. Ces phénomènes peuvent réduire l'efficacité à long terme de l'électrode.

Au-delà du colmatage et du vieillissement du biofilm, d'autres défis sont également associés aux électrodes 3D. Le transport des électrons à travers une matrice tridimensionnelle reste mal compris dans le contexte des technologies électrochimiques microbiennes (TEM) et nécessite des investigations approfondies. Le choix du collecteur de courant — généralement une tige de graphite — joue un rôle central dans ce mécanisme, mais son optimisation reste encore peu étudiée.

Par ailleurs, certaines configurations 3D peuvent entraîner une résistance ohmique plus élevée que les structures planes, ce qui limite les gains potentiels en performance.

En somme, concevoir une électrode tridimensionnelle qui concilie biocompatibilité, bonne conductivité électrique, résistance au colmatage et faible coût représente un défi majeur à relever pour favoriser le développement et la viabilité des procédés électro-microbiens. [1]

II.7. Membranes (échangeuse de protons) :

L'ajout d'un séparateur dans le réacteur s'avère souvent nécessaire. Ce composant a notamment pour fonction de limiter le mélange des gaz générés aux électrodes. À l'anode, on

observe principalement la production de CO_2 , accompagnée parfois de sous-produits gazeux tels que le H_2S ou le NH_3 . À la cathode, c'est essentiellement du dihydrogène (H_2) qui est formé. L'utilisation d'un séparateur permet ainsi, d'une part, d'éviter une étape de séparation des gaz en sortie de réacteur, et d'autre part, de prévenir des réactions secondaires indésirables, comme la conversion spontanée de H_2 et de CO_2 en méthane (CH_4). [11]

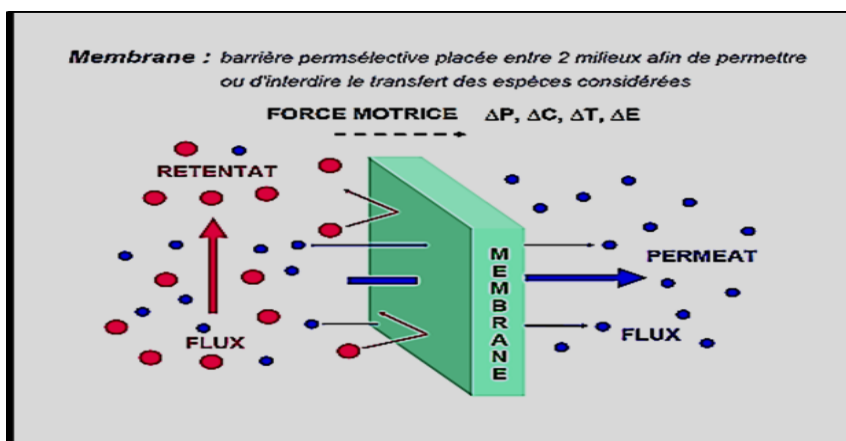


Figure.II.8 : Membrane perméable et principe de fonctionnement [11]

II.8. Taille et géométrie des réacteurs

II. 8.1. Réacteurs à simple ou double compartiment :

Les **réacteurs à simple compartiment** (Figure 2) possèdent une seule chambre de réaction, sans séparation physique entre l'anode et la cathode. Ce design présente l'avantage de **réduire les pertes ohmiques**, mais il souffre d'un inconvénient important : le **mélange des gaz** produits à l'anode (CO_2 , CH_4) et à la cathode (H_2), ce qui complique significativement leur séparation en sortie.

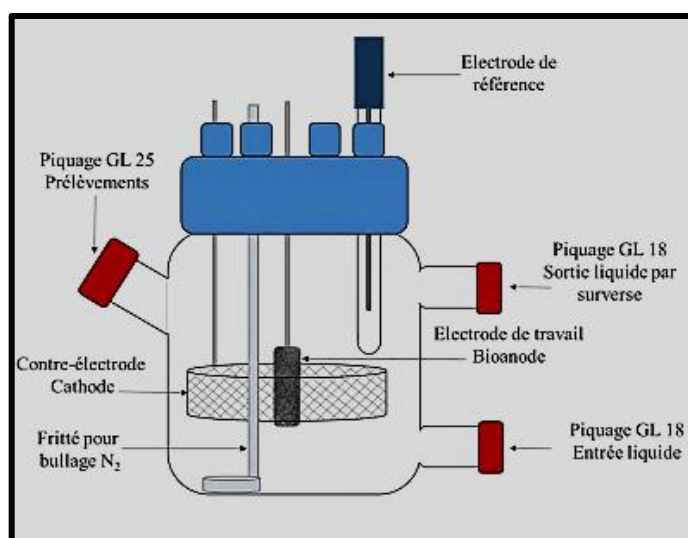


Figure.II.9. Electrolyseur microbien à un seul compartiment [9]

En revanche, les **réacteurs à double compartiment** (Figure 3) comportent **deux chambres distinctes**, séparées par une **membrane échangeuse de cations** (souvent du Nafion 117). Cette configuration est couramment adoptée en **électrosynthèse microbienne (ESM)**, car elle permet d'**éviter les réactions croisées** entre les produits générés aux électrodes. Elle contribue également à **limiter les pertes liées à la méthanisation** ou à la recombinaison des gaz. [9]



Figure.II.10. Dispositif à deux compartiments ou cellule « en H » [9]

La **géométrie du réacteur** a un impact majeur sur les **performances électrochimiques**. Dans les premières études, des cellules en forme de **H**, constituées de deux flacons en verre reliés par une membrane, ont été utilisées. Toutefois, ces systèmes présentent un **inconvenient majeur** : une **chute ohmique significative** due à la grande distance inter-électrodes (jusqu'à 15 cm), ce qui engendre une **résistance électrolytique élevée** [12].

Pour surmonter ces limitations, plusieurs **configurations** ont été développées :

- **Cellules parallélépipédiques** : Ces cellules offrent un montage plus compact et une meilleure **étanchéité**. La cellule C1, en Téflon, équipée d'une membrane de **74,32 cm²** et d'un espacement de **10 cm** entre les électrodes, a été utilisée expérimentalement. Bien qu'elle permette une bonne **recirculation**, cette configuration a présenté des **fuites de gaz**, ce qui a limité son efficacité.

- **Cellules cylindriques en forme de H** : Comme pour la cellule C2, ces réacteurs sont simples à fabriquer et garantissent une **bonne étanchéité**. Cependant, ils souffrent d'une **résistance ohmique plus élevée**, en raison d'une surface membranaire réduite. Leur géométrie favorise néanmoins une **agitation efficace**, notamment grâce à des **agitateurs magnétiques**.

- **Cellules cubiques ou circulaires** : Bien que moins détaillées dans ce mémoire, ces configurations permettent de **réduire l'espacement inter-électrodes** et d'**optimiser la surface**

active, en particulier lorsque l'une des électrodes devient limitante. Elles peuvent être utilisées avec ou sans **séparateur**, en fonction des objectifs spécifiques du procédé [12].

II. 8.2. Les différentes configurations de réacteurs :

L'architecture des électrolyseurs microbiens constitue un levier essentiel pour optimiser leurs performances.: les cellules en H, les cellules parallélépipédiques de type filtre-pressé — visant à réduire la distance entre anode et cathode — ainsi que les électrolyseurs cylindriques, permettant de moduler le rapport de surface entre les deux électrodes.

Depuis 2013, de nouveaux designs ont été proposés pour répondre à des problématiques spécifiques (voir Figure 6) , ont ainsi développé une configuration dans laquelle les parois en acier inoxydable d'un digesteur anaérobie sont utilisées comme cathode. Cette conception permet de coupler l'électrolyse microbienne productrice d'hydrogène à la méthanisation, ce qui augmente la teneur en méthane du biogaz produit.

D'autre côté, on a proposé un réacteur intégrant des membranes à fibres creuses, conductrices et poreuses, à base de nickel. Ces membranes jouent un double rôle : elles servent à la fois de cathode et de séparateur, permettant la filtration de l'effluent tout en favorisant la production de biogaz méthanique à partir d'eaux faiblement chargées en matière organique. Par ailleurs, la production d'hydrogène à la surface de la membrane, combinée à un pH local élevé, limite les phénomènes d'encrassement.

Enfin, ont introduit un design innovant mettant en œuvre une anode fluidisée constituée de granules de charbon actif. Cette configuration permet d'accroître significativement la surface spécifique de l'anode, tout en réduisant les risques de colmatage. [1].

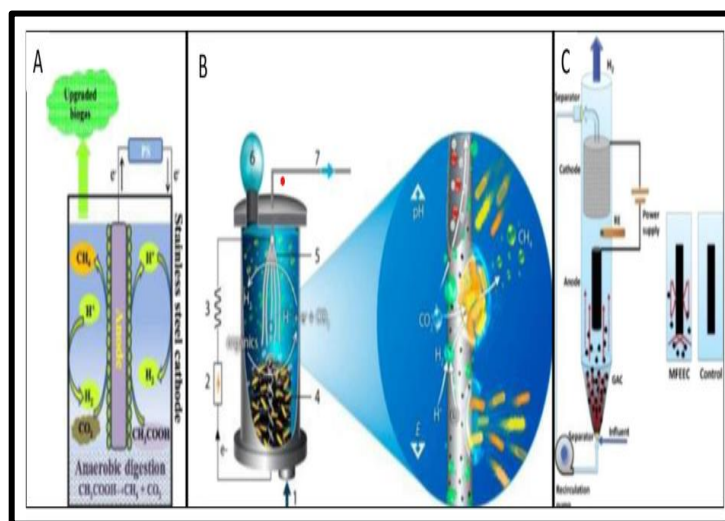


Figure.II.11. Configurations récentes de cellules d'électrolyse microbienne [1]

- (A) Les parois d'un digesteur anaérobie servent de cathode.
- (B) La cathode est une membrane à fibre creuse à base de nickel qui permet aussi de filtrer l'effluent.
- (C) Cellule d'électrolyse microbienne avec une anode en granules de charbons actifs fluidisées.

II. 8.3. Les études en CEM à différentes échelles :

La majorité des recherches sur les cellules d'électrolyse microbienne (CEMs) repose sur l'utilisation de substrats synthétiques, notamment des solutions d'acétate.

Cette méthode expérimentale permet un contrôle précis de la composition du milieu, facilitant ainsi l'étude des performances des électrodes, des différentes configurations de réacteurs, et des effets de divers paramètres.

Toutefois, l'intérêt pour les eaux usées réelles en tant qu'effluent anodique s'est accru ces dernières années. ont recensé un large éventail de travaux utilisant des eaux usées domestiques ou industrielles pour alimenter des bioanodes.

✓ **Effluent majoritairement utilisé** : Solution synthétique à base d'acétate (contrôle expérimental facilité).

✓ **Tendance récente** : Augmentation des études utilisant des eaux usées réelles (domestiques ou industrielles).

✓ **Volumes testés** : de 5 mL (screening) à 1000 L (pilotes industriels).

✓ **Performances sur effluents réels** :

- Faibles comparées aux substrats synthétiques.
- Exemple : 0,28 L H₂/L/j avec des effluents viticoles ; 0,015 L H₂/L/j pour des eaux usées domestiques.

✓ **Effluents riches en AGVs** : meilleurs résultats (jusqu'à 1,7 L H₂/L/j en batch avec un lixiviat de boues fermentées).

✓ **Facteurs influents** : Température, ajout d'acétate, configuration (double compartiment nécessaire pour un gaz riche en H₂).

En conclusion Les CEMs fonctionnant avec des eaux usées réelles montrent un potentiel, mais leurs performances restent encore très inférieures à celles obtenues en laboratoire avec l'acétate et dans des milieux hautement conducteurs. [1]

Reference :

- [1] : Blanchet, E. (2016). *Conception d'un procédé d'électrosynthèse microbienne* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [2] : Rousseau, R., 2013. Production de bio-hydrogène par électro-catalyse microbienne.
- [3] Liu, H., Grot, S., & Logan, B. E. (2005). Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environmental Science & Technology*, 39(11), 4317–4320.
- [4] Emma Roubaud. (2019). Technologie électro-microbienne pour le traitement des eaux usées couplé à la récupération d'hydrogène. Génie des procédés. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, Français. NNT : 2019INPT0091 . tel- 04169416 .
- [5] Lovely, D. R. (2006). Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 17(4), 327-332.
- [6] Reguera, G., McCarthy, K.D., Mehta, T., Nicoll, J.S., Tuominen, M.T., Lovley, D.R., 2005. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature* 435, 1098–1101. doi:10.1038/nature03661.
- [7] Rousseau, R., 2013. Production de bio-hydrogène par électro-catalyse microbienne.
- [8] Watnick and Kolter, R. P (2000) Biofilm, city of microbes. *J Bacteriol* 182:2675–2679.
- [9] Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543.
- [10] Champigneux, P. (2018). Comprendre et optimiser les anodes microbiennes grâce aux technologies microsystèmes (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse – INPT). HAL .
- [11] Lee HS, Rittmann BE (2010) Significance of biological hydrogen oxidation in a continuous single-chamber microbial electrolysis cell. *Environ Sci Technol* 44:948–954. doi: 10.1021/es9025358 .
- [12] : Benkaraache, A. (2017). Production de l'hydrogène par un procédé d'électrosynthèse microbienne (Mémoire de maîtrise). Institut National de la Recherche Scientifique, Québec.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1. Introduction:

La production d'hydrogène avec une cellule microbienne implique l'utilisation de micro-organismes, tels que les bactéries ou les algues, pour catalyser la conversion de matières organiques ou d'eau en hydrogène gazeux. Ce processus, connu sous le nom de production biologique d'hydrogène, est considéré comme une méthode prometteuse et durable pour générer de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique. Les cellules microbiennes exploitent divers mécanismes métaboliques, tels que la fermentation ou la photosynthèse, pour produire de l'hydrogène. La fermentation implique la dégradation de matières organiques, comme les glucides, en hydrogène et d'autres produits. La photosynthèse, en revanche, utilise la lumière du soleil pour diviser l'eau et produire de l'hydrogène. La production d'hydrogène microbien offre plusieurs avantages, notamment la possibilité d'utiliser des déchets organiques comme matière première, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production d'une énergie propre et renouvelable.

III.2. Présentation de milieu d'étude

III.2.1. Présentation de l'ONA

L'ONA se substitue à l'ensemble des établissements et organismes publics, nationaux, régionaux et locaux en charge du service public de l'assainissement, notamment :

L'Agence Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (AGEP)

Les établissements publics nationaux à compétence régionale de gestion de l'assainissement.

Les EPEDEMIAs de wilaya : les régies et services communaux de gestion des systèmes d'assainissement.



Figure III.1 Station d'épuration des eaux usées de la ville de Bordj Bou Arreridj

III.3. Etapes de traitement des eaux usées au niveau de la STEP à boue activé de BBA

Le traitement des eaux usées au niveau de la STEP à boue activé de BBA passe par plusieurs étapes :

- P r é t r a i t e m e n t (dégrillage déshuilage et dessablage) ;
- T r a i t e m e n t primaire (décantation des matières solides en suspension dans l'eau).
- T r a i t e m e n t secondaire ou traitement biologique (bassin d'aération et décantation).
- T r a i t e m e n t des boues (elles proviennent des décanteurs primaires et secondaires).

III.3.1. Prétraitement

Le prétraitement est un l'ensemble d'opérations physiques et mécaniques destinées à extraire de l'eau brute. Ils ont pour objectif d'éliminer les éléments les plus grossiers qui sont susceptibles de gêner les traitements ultérieurs. S'il s'agit de déchets volumineux (dégrillage), des sables et graviers (dessablage) et des graisses (dégraissage-déshuilage).

III.3.1.1. Dégrillage

Cette opération est assurée par une grille métallique à commande automatique qui, par mouvement de va et viens de bas vers le haut, permet :

De protéger les ouvrages contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des colmatages dans les différentes unités de l'installation.

De séparer et d'évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements qui suivent [1].





Figure III.2 : Dégrilleurs (STEP BBA)

III.3.1.2. Déshuilage et dégraissage

Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre de figer les graisses). Ces deux procédés visent à éliminer la présence des corps gras dans les eaux usées, qui peuvent gêner l'efficacité du traitement biologique qui intervient par la suite [2]. La rétention environ 80% de la matière grasse lorsque la température est inférieure à 30°C [3].





Figure III.3 : Déshuileur et dégraisseur (STEP BBA)

III.3.1.3. Dessablage

C'est une opération physique qui consiste à retenir les sables entraînés par l'écoulement de l'eau. Le dessablage a pour but d'éviter le colmatage des canaux au cours de l'acheminement de l'eau ; cette opération conserve les particules de granulométrie supérieure à 200 μm [1].



Figure III.4 : Dessaleur (STEP BBA)

III.3.2. Traitement primaire

Décantation primaire

Pour faciliter la précipitation des matières en suspension de diamètre inférieur à 0,2 mm, on fait circuler l'eau lentement dans un bassin dont on racle ou aspire périodiquement les matériaux rassemblés au fond.

Dans la plupart des stations d'épuration on effectue deux décantations : L'une sur les eaux issues du prétraitement l'autre après le traitement biologique (ou chimique). Dans ce

paragraphe il ne sera question que des boues de décantation primaire car les autres dépendent du traitement subi par l'eau. Les boues formées contiennent une forte proportion de matières organiques (de 20 à 30% des matières sèches, des matières grasses 6 à 30%). Ces boues présentent un aspect non homogène, elles sont généralement brunes et d'odeur désagréable [4]



Figure III.5 : Décanteur primaire (STEP BBA).

III.3.3. Traitement biologique (secondaire)

Les traitements secondaires également appelés traitements biologiques visent à dégrader la matière organique biodégradable contenue dans l'eau à traiter. Des microorganismes mis en contact avec l'eau polluée assimilent la matière organique qui, leur sert de substrat de croissance. L'ensemble de la pollution avec les microorganismes vivants forme la liqueur mixte ou boue biologique contenue dans des bassins de traitement biologique. En règle générale, l'élimination complète de la pollution organique de ces bassins se déroule en conditions aérées par des souches aérobies strictes ou facultatives. Plusieurs procédés existent à ce stade du traitement biologique. Ce sont les procédés à culture en suspension ou procédés à boues activées, les procédés à culture fixée (disques biologiques rotatifs, lits bactériens, etc.), les procédés à décantation interne (lagunage), les techniques d'épandage-irrigation, etc.

Le traitement par boues activées est très largement utilisé. Il s'agit d'un réacteur qui contient les eaux à traiter, dans lequel est injectée une boue chargée de bactéries. Les bactéries consomment la matière organique et contribuent aussi à l'élimination de l'azote et du phosphore. A la sortie du réacteur, l'effluent passe dans un clarificateur. La boue décantée est

séparée en deux flux : l'un rejoint le réacteur (ensemencement) et l'autre est évacué vers la filière des boues. L'action des bactéries dans le réacteur nécessite de l'oxygène (Fig. 11 et Fig. 12) [5].



Figure III.6 : Bassin d'aération

Les techniques de traitement biologique les plus couramment employées sont :

- Les boues activées ;
- Les lits bactériens (bactéries fixées) ;
- Les bios filtres (bactéries fixées) ;

III.3.3.1. Clarification

La clarification permet de séparer par décantation l'eau épurée des boues secondaires issues du traitement biologique (Figure13). Cette décantation se fait dans des ouvrages spéciaux, le plus souvent circulaires, appelés clarificateurs ou décanteurs secondaires. Une partie des boues secondaires est évacuée en aval vers le traitement des boues ; l'autre partie est recyclée vers le bassin d'aération pour maintenir la masse biologique nécessaire au fonctionnement de l'installation. Dans la plupart des cas, l'effluent peut être rejeté dans le milieu naturel après la clarification. Le rejet se fait par un canal équipé de capteurs de mesure pour l'auto surveillance de la station [6].



Figure III.7 : Décanteur secondaire (STEP BBA)

III.3.3.2. Traitement des boues

Le traitement d'un mètre cube d'eaux usées produit de 350 à 400 grammes de boues. Ces boues, généralement très liquides, contiennent une forte proportion de matières organiques. Elles sont donc très fermentescibles et susceptibles de causer des nuisances.

Le traitement a pour but de les conditionner en fonction des filières d'élimination :

- Réduction de leur volume par épaissement,
- Déshydratation, séchage thermique ou incinération.
- Diminution de leur pouvoir de fermentation par stabilisation biologique, chimique ou thermique (rajout de chaux par exemple).
- Un traitement chimique des odeurs est souvent associé à ce traitement.

La gestion des boues représente souvent une préoccupation pour les exploitants des usines de traitement et pour les collectivités locales. L'élimination des boues connaît d'importantes évolutions, en particulier au niveau des filières et des débouchés finaux : utilisation agricole, compostage, incinération, récupération d'énergie, envoi en centre d'enfouissement technique [7].



Figure III.8 : Air de stockage des boues déshydratées (STEP BBA)

III.3.4. Epaissement

Il s'agit de la première étape de traitement des boues, qui s'opère en général avant le mélange des boues issues des différentes étapes d'épuration des eaux usées boues primaires, secondaires, et éventuellement tertiaires. Cette étape peut être précédée de l'ajout d'un flocculant organiques de synthèse ou minéraux (chaux, sels de fer ou d'aluminium), afin de faciliter la séparation des phases solide et liquide des boues.

L'épaississement consiste à laisser s'écouler les boues par gravitation à travers un silo placé au-dessus d'une table d'égouttage ou d'une toile semi-perméable. Autre technique de concentration : la flottation, basée sur l'injection de gaz dans les boues, ce qui sépare les phases liquides et solides par différence de densité. En sortie, les boues sont encore liquides avec une siccité de 4 à 6 %. [5]

III.3.5. La déshydratation

La déshydratation permet de diminuer la teneur en eau des boues, et d'atteindre en sortie une siccité allant de 15 à 40%, variable selon la filière de traitement des eaux, la nature des boues et la technique de déshydratation utilisée. Elle s'opère sur un mélange de boues primaire, secondaire voire tertiaire.

III.3.6. Le séchage

Le séchage des boues est une déshydratation quasi-totale des boues par évaporation de l'eau qu'elles contiennent ; la réduction de volume qui en résulte est conséquente.

III.3.7. Stabiliser la matière organique

Cela consiste à diminuer le caractère fermentescible des boues et ainsi, notamment, de supprimer les mauvaises odeurs. Les traitements de stabilisation des boues s'appliquent aux boues mixtes fraîches ou uniquement aux boues de traitement secondaire des eaux usées.

III.3.7.1. La stabilisation biologique

Elle s'opère selon deux voies biologiques possibles : aérobie et anaérobie. La stabilisation aérobie consiste à mettre les boues dans des bassins d'aération dits aussi bassins de stabilisation aérobie. En sortie, les boues sont dites « aérobies » ou « stabilisées aérobies ». Le compostage est un mode de stabilisation aérobie des boues, le plus souvent après déshydratation. Il s'agit souvent d'un traitement de stabilisation biologique complémentaire, destiné à la fabrication d'un produit : le compost. Cependant, il constitue le seul mode de stabilisation des boues primaires et secondaires issues d'un traitement physico-chimique des eaux usées. La stabilisation anaérobie concerne surtout les installations de plus de 100.000 EH. Elle consiste à mettre dans des digesteurs les boues directement issues de la décantation primaire de la filière de traitement des eaux usées, et à les porter à haute température (de 50 à plus de 100°C) afin d'en éliminer bactéries et virus. Stabilisées avec 30 à 60 % de quantités de matière organique en moins, en sortie les boues sont dites « anaérobies », « stabilisées anaérobies » ou « digérées ». Elles présentent une siccité pouvant aller au-delà de 20 à 30 %. Ces procédés de digestion anaérobie, appelés aussi méthanisation, s'accompagnent de la production de biogaz riche en méthane (65%) et en dioxyde de carbone (35%), avec des concentrations faibles d'hydrogène sulfuré saturé en eau. La récupération et la valorisation de ce biogaz, sous forme de chaleur, d'électricité, de combustible ou de carburant, représente un des postes permettant de réduire l'empreinte environnementale de la filière boue.

III.4. Echantillonnage

III.4.1. Importance du prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau constitue une étape cruciale pour garantir la qualité et la représentativité des analyses ultérieures. Toute erreur à ce niveau peut compromettre l'interprétation des résultats.

III.4.2. Matériel utilisé

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide de flacons en verre borosilicaté, de préférence neufs, bouchés avec des bouchons en émeri ou en polyéthylène/ téflon. Avant usage, les flacons ont été :

- lavés soigneusement,
- rincés à l'eau distillée,
- trempés dans l'eau distillée pendant une heure,
- puis séchés.

Pour les analyses microbiologiques, une stérilisation rigoureuse a été assurée afin d'éviter toute contamination.

III.4.3. Méthodologie de prélèvement

Chaque flacon a été rincé trois fois avec l'eau à analyser. Ils ont été remplis jusqu'au bord, sans bulle d'air, afin de prévenir toute altération. Les prélèvements ont été réalisés mensuellement, de mars 2025 à mai 2025, afin de prendre en compte les variations saisonnières et les fluctuations de charge polluante.

III.4.4. Transport et conservation des échantillons

Les échantillons d'eaux usées ont été prélevés dans des flacons en verre de 500ml, puis conservés à 4 °C dans une glacière, conformément aux recommandations relatives à la conservation et la manipulation des échantillons. [2]

III.5. Méthodes d'analyses des eaux usées de la Steep de BBA

Afin d'évaluer le degré de pollution des eaux usées de la STEEP, nous avons eu recours à plusieurs méthodes d'analyse, incluant des analyses physico-chimiques et bactériologiques. Celles-ci ont porté sur les principaux paramètres indicateurs de la qualité des eaux usées. Les échantillons recueillis ont été soumis aux mesures suivantes :

III.5.1. Température (T) :

A été mesurée en laboratoire à l'aide d'un thermomètre. La valeur affichée a été relevée directement et exprimée en degrés Celsius (°C).

III.5.2. Potentiel hydrogène (pH) :

- Principe :

La mesure du pH est réalisée à l'aide d'un pH-mètre, instrument basé sur la différence de potentiel électrique entre deux électrodes : une électrode de verre sensible aux ions hydrogène (H^+) et une électrode de référence, toutes deux immergées dans la même solution. Le potentiel mesuré est directement lié à l'activité des ions H^+ présents dans le milieu.

✚ Mode opératoire :

- Étalonner l'appareil à l'aide de solutions tampons de pH connu.
- Introduire l'échantillon d'eau à analyser dans un bécher propre.
- Plonger les électrodes dans la solution en veillant à ce qu'elles soient bien immergées.
- Attendre la stabilisation de la valeur affichée, puis relever le pH mesuré. [2]

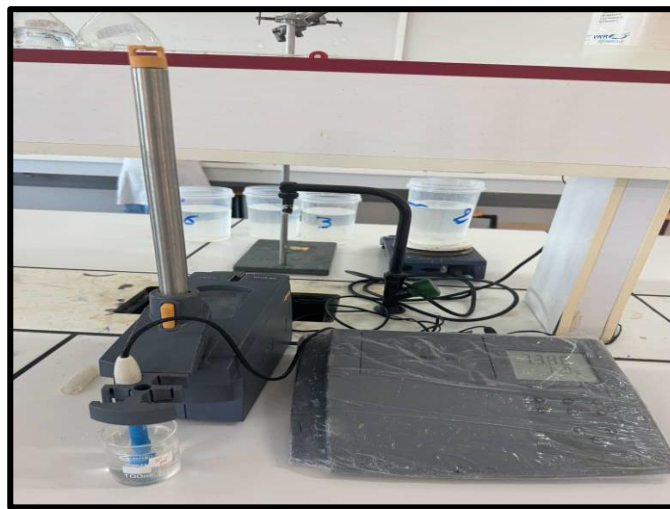


Figure III.9 : mesure du pH

III.5.3. Conductivité électrique (CE) :

• Principe

La conductivité électrique permet d'évaluer de façon rapide, quoiqu'approximative, la minéralisation globale d'un échantillon d'eau. Elle est déterminée à l'aide d'un conductimètre, qui mesure la capacité de l'eau à conduire un courant électrique en fonction de la concentration en ions dissous.

✚ Mode opératoire

- Étalonnage de l'appareil** : Effectuer l'étalonnage du conductimètre à l'aide de solutions étalons de conductivité connue.
- Prélèvement de l'échantillon** : Verser un volume approprié de l'eau à analyser dans un bécher propre.

- Mesure : Immerger la sonde du conductimètre dans l'échantillon et attendre la stabilisation de la valeur affichée.
 - Lecture **et unité** : Relever la conductivité exprimée en micro siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- [8]

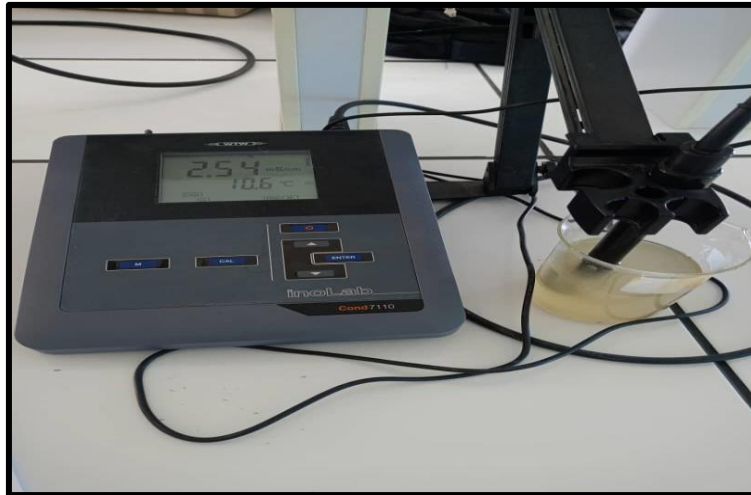


Figure.III.10 : mesure de la conductivité des eaux usées par un conductimètre

III.5.4. Turbidité

• Principe

La turbidité est une mesure de la capacité d'une eau à diffuser la lumière, en raison de la présence de particules en suspension (argile, matières organiques, micro-organismes, etc.). Elle est donc un indicateur indirect de la concentration en matières solides fines. La mesure repose sur l'intensité de la lumière diffusée à un angle de 90° par rapport à un faisceau lumineux projeté dans l'échantillon, selon le principe de la **néphélométrie**. Elle est exprimée en **unités NTU** (Nephelometric Turbidity Units).

✚ Mode opératoire

1. Étalonnage de l'appareil

- Étalonner le turbidimètre à l'aide de solutions standards fournies par le fabricant (généralement 0 NTU et 20 ou 100 NTU).

2. Préparation de l'échantillon

- Agiter doucement l'échantillon afin d'homogénéiser la suspension sans créer de bulles d'air.
- Verser l'échantillon dans une cuvette propre, en évitant les traces de doigts ou les gouttes à l'extérieur.

3. Mesure

- Placer la cuvette dans le compartiment de mesure du turbidimètre.
- Attendre la stabilisation de la lecture puis relever la valeur affichée en NTU.

Remarque : Une eau claire présente une faible turbidité (<1 NTU), tandis qu'une eau trouble dépasse souvent les 5 NTU. [2]



Figure.III.11 : mesure Turbidité

III.5.5. Matières en suspension (MES) :

• Principe

Les matières en suspension sont isolées soit par filtration des effluents faiblement chargés, soit par centrifugation des solutions, puis séchées jusqu'à évaporation complète de l'eau. La quantification des MES est ensuite réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre, et les résultats sont exprimés en milligrammes par litre (mg/L)

✚ Mode opératoire

1. Étalonnage de l'appareil

Calibrer le spectrophotomètre selon les instructions du fabricant.

2. Sélection du programme

Choisir le programme référencé « MES » (numéro 630) et régler la longueur d'onde à 810 nm.

3. Préparation du blanc

Verser 25 ml d'eau distillée dans une cuvette pour obtenir la référence (blanc).

- Insérer le blanc dans le spectrophotomètre et ajuster l'affichage à 0 mg/L.

4. Préparation de l'échantillon

Verser 25 ml de l'échantillon (eau épurée ou usée) dans une deuxième cuvette.

6. Mesure

Placer la cuvette contenant l'échantillon dans le spectrophotomètre.

Lire directement la concentration en MES indiquée sur l'afficheur (mg/L). [2]

7. Oxygène dissous (OD)

Principe

L'oxygène dissous est un paramètre clé des milieux aquatiques, puisqu'il conditionne les processus biologiques et le métabolisme des organismes. Sa concentration est mesurée à l'aide d'un oxymètre, qui quantifie la teneur en O₂ présente dans l'échantillon.

8. Mode opératoire

- Mise **en service de l'oxymètre** : Allumer l'appareil et vérifier son bon fonctionnement selon le manuel du fabricant.
- Préparation **de l'électrode** : Rincer soigneusement l'électrode à l'eau distillée pour éliminer toute trace de contaminants.
- Prélèvement **de l'échantillon** : Verser l'eau à analyser (épurée ou usée) dans un bécher propre.
- Mesure : Immerger l'électrode dans l'échantillon, en veillant à ce qu'elle soit complètement submergée, puis attendre que la valeur se stabilise.
- Lecture **des résultats** : Relever directement la concentration en oxygène dissous affichée par l'oxymètre, généralement exprimée en milligrammes par litre (mg/L). [9]



Figure.III.12 : mesure de l'OD

III.5.6. demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO₅)

• Principe

La DBO₅ correspond à la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique d'un échantillon d'eau, maintenu à une température constante de 20 °C pendant une durée de 5 jours, conformément à la convention standard .La mesure est réalisée à l'aide d'un DBO-mètre.

✚ Mode opératoire

1. Étalonnage de l'appareil

○ Sélectionner la gamme adaptée : 700 mg/L pour l'eau brute (entrée) et 350 mg/L pour l'eau épurée (sortie).

2. Préparation des échantillons

- Dans deux flacons en verre brun munis d'un barreau magnétique, verser respectivement :
- 95 mL d'échantillon d'eau brute
 - 160 mL d'échantillon d'eau épurée

3. Addition de la base

○ Placer un agitateur magnétique dans chaque flacon, puis ajouter quelques gouttes de NaOH ou KOH (idéalement de l'hydroxyde de lithium) afin d'absorber le CO₂ libéré durant l'oxydation biologique.

4. Incubation

- Fermer hermétiquement les flacons et les positionner dans le DBO-mètre.
- Incuber à 20 °C pendant 5 jours.

5. Lecture des résultats

- À l'issue de l'incubation, relever directement la consommation d'oxygène affichée par l'appareil, exprimée en milligrammes d'O₂ par litre (mg O₂/L). [9]



Figure.III.13 : mesure le DBO5

III.5.7. Demande chimique en oxygène (DCO)

• Principe

La DCO correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder, à chaud, les substances oxydables (organiques ou minérales, biodégradables ou non) présentes dans un échantillon d'eau. Cette réaction est réalisée en milieu acide à 150 °C pendant 2 heures, en présence d'un excès d'agent oxydant. La quantité d'oxygène utilisée est ensuite déduite de la mesure de l'oxydant résiduel par voie photométrique

✚ Mode opératoire

1. Étalonnage de l'appareil

- Choisir la gamme haute (0–1500 ppm) pour l'eau brute et la gamme basse (0–150 ppm) pour l'eau épurée.

2. Préparation du blanc

- Prélever 2 mL d'eau distillée dans un tube contenant le réactif DCO.

3. Préparation des échantillons

- À l'aide d'une pipette jaugée de 2 mL, prélever 2 mL d'échantillon (eau brute ou épurée) dans deux autres tubes de réactif DCO.

4. Réaction d'oxydation

- Fermer hermétiquement les tubes, puis les placer dans le réacteur DCO à 150 °C pendant 2 heures.

5. Lecture des résultats

- Laisser refroidir les tubes, puis mesurer l'absorbance résiduelle à l'aide d'un photomètre ou d'un spectrophotomètre.
- Convertir l'absorbance en concentration de DCO, exprimée en mg O₂/L. [10]

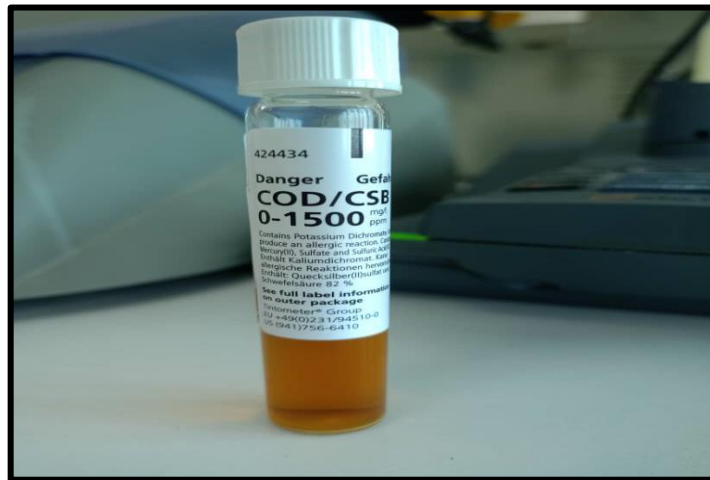


Figure.III.14 : mesure de la DCO

III.5.8. Concentration en nitrites (NO₂⁻)

• Principe

La détermination des nitrites dans les eaux brute et épurée repose sur une méthode colorimétrique automatisée. La réaction entre les ions nitrites et le réactif NitriVer3 produit une coloration rose dont l'intensité, mesurée à 507 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, est proportionnelle à la concentration en NO₂⁻ dans une gamme de 0 à 0,3 mg/L

🔧 Mode opératoire

1. Étalonnage du spectrophotomètre

- Calibrer l'appareil selon les instructions du fabricant, en utilisant des solutions étalons appropriées.

2. Préparation du blanc

- Prélever 10 mL d'eau distillée dans une cuvette pour obtenir le blanc de référence.

3. Préparation des échantillons

- Dans deux autres cuvettes, verser 10 mL d'échantillon (eau brute et eau épurée) et ajouter deux sachets de réactif NitriVer3.

4. Réaction colorimétrique

- Agiter doucement les cuvettes, puis laisser reposer 20 minutes à l'abri de la lumière pour permettre la coloration complète.

5. Lecture des résultats

- Placer successivement le blanc puis les échantillons dans le spectrophotomètre.

- Relever l'absorbance à 507 nm, la concentration en nitrites ($\text{mg NO}_2^-/\text{L}$) étant déterminée directement par comparaison avec la courbe d'étalonnage.

Remarque : La coloration rose observée confirme la présence de nitrites. [8]



Figure.III.15 : préparation de solution de nitrite

III.5.9. Concentration en nitrates (NO_3^-)

• Principe

La quantification des nitrates dans les eaux brute et épurée s'effectue par filtration, puis par méthode colorimétrique. La réaction chimique avec le réactif NitraVer5 génère une teinte jaune dont l'intensité, mesurée à 400 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, est proportionnelle à la concentration en NO_3^- .

✚ Mode opératoire

1. Étalonnage de l'appareil

- Calibrer le spectrophotomètre selon les recommandations du fabricant et les solutions étalons adaptées.

2. Préparation du blanc

- Verser 25 mL d'eau distillée dans une cuvette pour établir la référence.

3. Préparation des échantillons

- Filtrer l'échantillon si nécessaire.
- Dans deux cuvettes distinctes, verser 10 mL d'eau brute et 10 mL d'eau épurée, puis ajouter deux sachets de réactif NitraVer5.

4. Réaction colorimétrique

- Agiter doucement chaque cuvette, puis laisser reposer 15 minutes à l'abri de la lumière pour que la réaction se complète.

5. Lecture des résultats

○ Insérer d'abord le blanc, puis les échantillons dans le spectrophotomètre.

Relever l'absorbance à 400 nm et en déduire la concentration en nitrates ($\text{mg NO}_3^-/\text{L}$) à partir de la courbe d'étalonnage. [8]

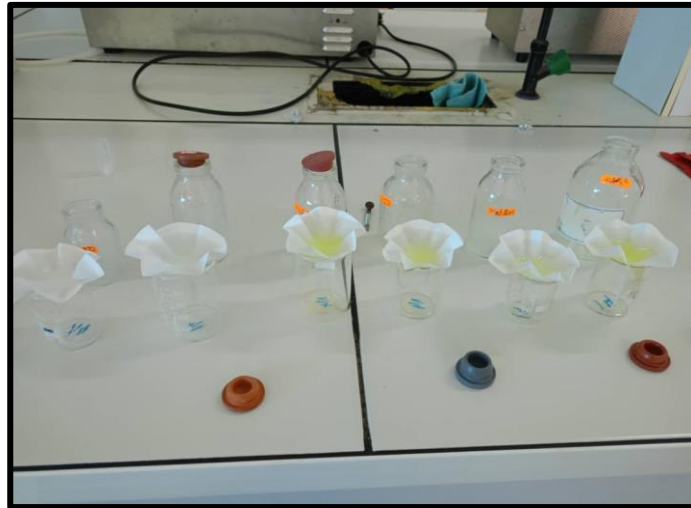


Figure.III.16 : préparation de solution de NO_3^-



Figure.III.17 : mesure NO_3^-

III.5.10. Concentration en azote ammoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$)

• Principe

La quantification de l'azote ammoniacal dans les eaux brutes (entrée) et épurées (sortie) repose sur la méthode colorimétrique salicylate–cyanurate. Le réactif salicylate réagit avec les ions ammonium pour former un complexe coloré, stabilisé ensuite par le cyanurate. L'intensité de

la coloration verte obtenue est proportionnelle à la concentration en ammoniac et est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre.

Mode opératoire

1. Étalonnage de l'appareil

Calibrer le spectrophotomètre en fonction des solutions étalons fournies par le fabricant.

2. Préparation du blanc

- Verser 10 mL d'eau désionisée dans une cuvette.
- Ajouter une pochette de réactif salicylate et une pochette de réactif cyanurate, puis mélanger.

3. Préparation des échantillons

- Filtrer les échantillons si nécessaires.
- Pour chaque échantillon (eau brute et eau épurée) :
 1. Prélever 10 mL d'échantillon et le verser dans une cuvette.
 2. Ajouter une pochette de réactif salicylate, mélanger et appuyer sur la touche « Shift 5 » de l'appareil pendant 3 min.
 3. Ajouter une pochette de réactif cyanurate, mélanger et appuyer sur « Shift 5 » pendant 15 min.

4. Lecture des résultats

- Insérer la cuvette du blanc puis celles des échantillons dans le spectrophotomètre.
- Relever l'absorbance, la concentration en $\text{NH}_3\text{-N}$ étant déterminée directement à partir de la courbe d'étalonnage.

Remarque : La coloration verte confirme la présence d'azote ammoniacal. [11] .

III.5.11. Matériel et Méthodes d'analyses bactériologiques des eaux usées de la STEEP

Les analyses bactériologiques des différents échantillons d'eaux usées brutes ont pour objectif principal d'évaluer la contamination d'origine fécale. Elles consistent notamment en :

A. La détection des coliformes totaux (CT)

• Principe

Selon les normes internationales, les **micro-organismes reviviscibles** regroupent l'ensemble des bactéries, levures et moisissures capables de se multiplier et de former des colonies visibles sur ou dans un milieu de culture donné, lorsque les conditions d'incubation spécifiées sont respectées

✚ Mode opératoire

À partir de l'échantillon d'eau à analyser :

- Prélever deux aliquotes de **1 mL** et les répartir dans deux boîtes de Pétri stériles préalablement numérotées.
- Ajouter environ **15 mL de gélose PCA (Plate Count Agar)** fondue mais refroidie à $\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans chaque boîte.
- Mélanger délicatement par des mouvements circulaires pour assurer une répartition homogène, puis laisser la gélose solidifier.

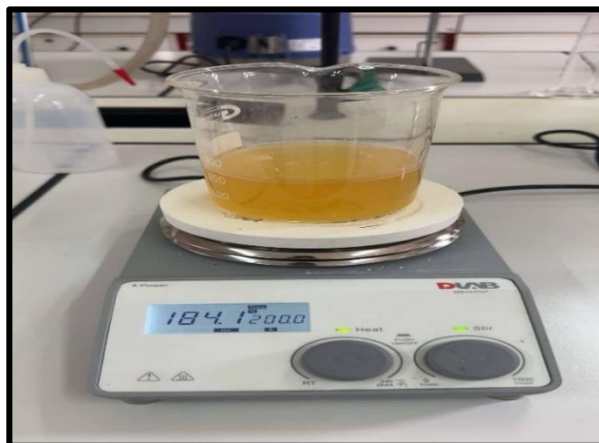


Figure.III.18 : préparation de PCA

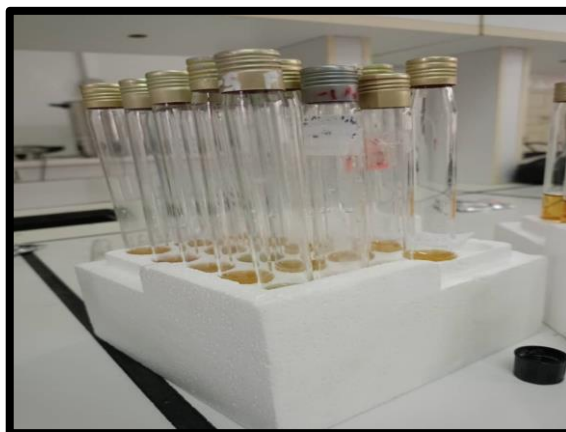


Figure.III.19 : Tubes de culture stériles contenant du PCA pour analyses microbiologiques

✓ Incubation et lecture

- Retourner les boîtes de Pétri.
- Incuber une série à **37 °C pendant 24 à 48 heures** (bactéries mésophiles).
- Incuber l'autre série à **22 °C pendant 72 heures** (bactéries psychotropes).
- Lire les résultats toutes les 24 h et compter les colonies développées.

• Expression des résultats

Le nombre total de colonies est exprimé en **germes reviviscibles par millilitre d'échantillon (UFC/mL ou germe/mL)**. [12]

B. Clostridium sulfito-réductrices (CSR)

• Principe

Les **Clostridium sulfito-réducteurs** sont des bactéries anaérobies sporulées indicatrices d'une contamination fécale ancienne. Leur mise en évidence repose sur leur capacité à réduire les sulfites en sulfures, entraînant la formation de colonies noires en présence de fer.

✚ Mode opératoire

1. Relever **1 mL** de l'échantillon d'eau dans **deux tubes à essai stériles**.
2. Soumettre les tubes à un **traitement thermique à 80 °C pendant 10 minutes** afin d'éliminer les formes végétatives et ne conserver que les spores bactériennes (choc thermique).
3. Refroidir immédiatement les tubes sous un **jet d'eau froide** (refroidissement brutal).
4. Ajouter ensuite environ **15 mL de gélose TSN** (Trypose Sulfite Néomycine contenant du sulfite de sodium et de l'alun de fer).
5. Homogénéiser doucement, puis laisser la gélose solidifier.
6. Incuber les tubes à **37 °C pendant 48 heures**, en effectuant une première lecture après 16 à 24 heures.
- 7.

• Lecture et interprétation

- La présence de **colonies noires de taille significative** dans la gélose indique un résultat **positif** pour Clostridium sulfito-réducteurs.
- Le dénombrement s'exprime en **UFC/mL (unités formant colonies par millilitre)**.

Remarque : Après 48 heures d'incubation, certaines gélose peuvent devenir entièrement noires, rendant le dénombrement impossible. [13].

C. Streptocoques fécaux (SF)

• Principe

Le **dénombrement des streptocoques fécaux**, également appelés entérocoques ou streptocoques du groupe D, s'effectue généralement en parallèle de celui des coliformes fécaux, les méthodes étant similaires à l'exception des milieux de culture utilisés

Les **streptocoques fécaux** sont des **cocci à Gram positif**, de forme sphérique ou ovoïde, se présentant souvent en chaînes. Ces bactéries sont **catalase-négatives** et possèdent **l'antigène du groupe D**. Elles peuvent se développer à **37 °C pendant 24 à 48 heures** sur des milieux

sélectifs contenant de l'azoture de sodium Leur dénombrement s'effectue en **milieu liquide** par la méthode du **Nombre le Plus Probable (NPP)**, en utilisant deux types de bouillons de culture :

- Le **milieu Rothe** pour le test de présomption.
- Le **milieu Eva Litsky** pour le test de confirmation.

✚ Mode opératoire

a. Test de présomption (milieu Rothe) :

1. Prélever **1 mL d'eau homogénéisée** à analyser et l'introduire de manière aseptique dans un tube contenant **9 mL de milieu Rothe**, obtenant une dilution 10^{-1} .
2. Prélever **1 mL** du mélange précédent pour l'inoculer dans un second tube contenant également 9 mL de milieu Rothe, pour obtenir la dilution 10^{-2} .
3. Répéter l'opération pour obtenir **5 dilutions successives**, en **triplicat**, soit **15 tubes** au total.
4. Incuber tous les tubes à **37 °C pendant 24 à 48 heures**.

✓ Lecture :

- Les tubes montrant une **turbidité microbienne** sont considérés **présumés positifs** et doivent être soumis au **test de confirmation**. [14]

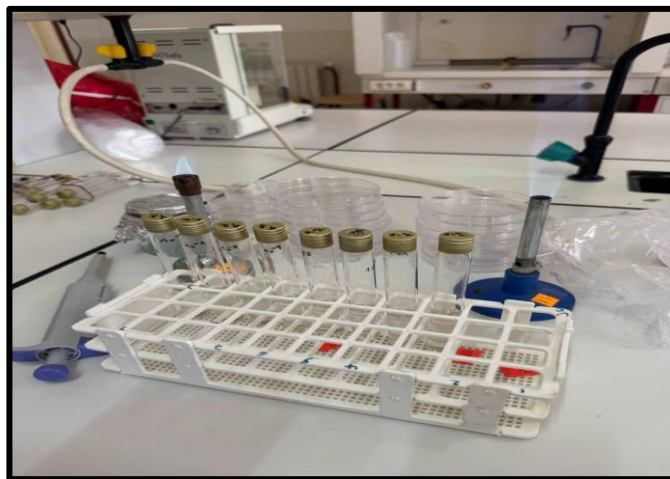


Figure.III.20 : préparation de milieu Rothe

D. Test de confirmation (milieu Eva Litsky)

Ce test vise à **confirmer la présence de streptocoques fécaux du groupe D**, détectés au cours du test de présomption.

✓ Protocole :

1. Après agitation des **tubes présumés positifs** issus du test de présomption (milieu Rothe), prélever quelques gouttes de chaque tube à l'aide d'une **pipette Pasteur stérile**.
2. Ensemencer ces gouttes dans des **tubes contenant le milieu Eva Litsky**, spécifiquement sélectif pour les streptocoques du groupe D.

3. Incuber les tubes à 37 °C pendant 24 à 48 heures.



Figure. III.21: préparation de milieu de lits Key Lecture

- L'apparition d'un **trouble microbien** dans le tube indique la **confirmation de la présence de streptocoques fécaux**.
- Il est également possible d'observer une **précipitation colorée** au fond du tube (pastille violette), traduisant une **fixation du colorant** par les bactéries, ce qui a la même signification que le trouble.

Le nombre de streptocoques fécaux est ensuite déterminé à l'aide de la **table de calcul du Nombre le Plus Probable (NPP)**. [15]



Figure. III. 22 : test de lits Key

E. Des coliformes fécaux (CF)

• Principe

Les **coliformes fécaux** sont des **bactéries Gram négatives** en forme de bâtonnets, **facultativement anaérobies**, capables de **fermenter le lactose** à $44 \pm 0,5$ °C en produisant **gaz et acide** en moins de 24 à 48 heures. Ils sont considérés comme des **indicateurs spécifiques de contamination fécale d'origine humaine ou animale**, car ils proviennent principalement du tube digestif des homéothermes.

La recherche se fait par **méthode du Nombre le Plus Probable (NPP)**, en **milieu liquide**, généralement au **lactose bile** ou au **milieu de Lauryl-Sulfate**, suivi d'une confirmation à **température élevée (44 °C)** sur milieu sélectif comme **EC (Escherichia coli medium)**.

✚ Mode opératoire

1. Préparation des dilutions :

○ À partir de l'échantillon homogénéisé, transférer **1 ml** dans **trois séries de tubes** contenant **9 ml de bouillon lactose (Lauryl-Sulfate ou lactose bile)** pour obtenir des dilutions 10^{-1} , 10^{-2} , etc.

2. Test de présomption :

○ Incuber à **37 °C pendant 24 h**. Les tubes produisant **gaz** sont considérés comme **présomptivement positifs**.



Figure.III.23 : préparation de milieu

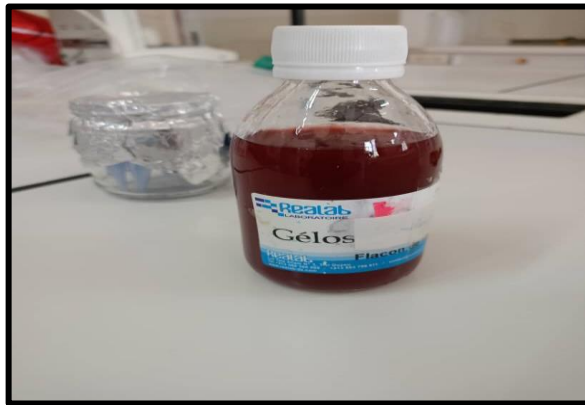


Figure.III.24 : milieu préparé pour test fécaux

F. Test de confirmation (spécifique aux CF) :

- Transférer le contenu des tubes présomptivement positifs dans de nouveaux tubes contenant **le milieu EC (Escherichia coli)**.
- Incuber à $44 \pm 0,5$ °C pendant 24 h dans un bain-marie ou une étuve réglée.
- L'apparition de **gaz** dans le tube indique un test **positif pour les coliformes fécaux**.

✓ Expression des résultats :

- Le résultat est exprimé en **Nombre le Plus Probable (NPP)** par 100 ml d'échantillon, en se référant à la **table de McCrady** ou équivalent. [2]

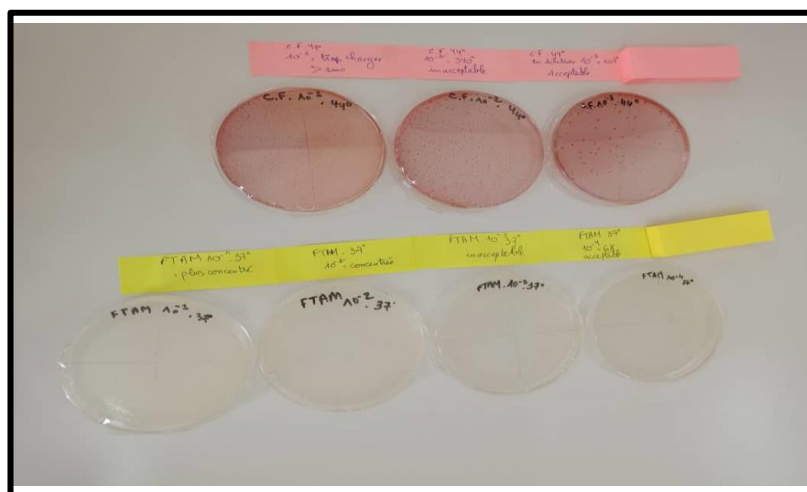


Figure.III.25 : test de CF

III.6. Production d'hydrogène vert à partir des eaux usées à l'aide d'une cellule microbienne à double compartiment :

Dans notre montage expérimental on a opté pour une cellule microbienne à deux compartiments séparés par une membrane perméable (membrane cationique) qui permet le passage des protons.

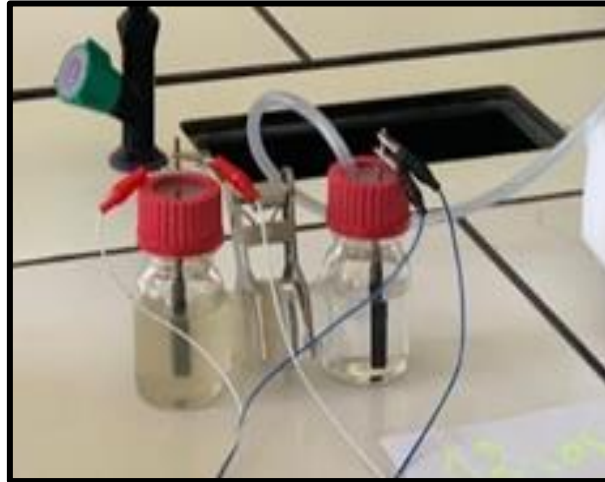


Figure III.26 : Cellule microbienne à double compartiment

III.6.1. Protocole D'activation de la membrane Nafion 117 :

L'activation de la membrane Nafion 117 est une étape essentielle pour optimiser ses performances. Elle implique généralement une immersion dans une solution d'acide sulfurique, suivie d'un rinçage à l'eau déminéralisée. Ce processus vise à éliminer les impuretés organiques et à restaurer la structure ionique de la membrane, améliorant ainsi sa conductivité ionique.

Voici les étapes détaillées de l'activation :

1. Prétraitement :

* La membrane Nafion 117 est d'abord traitée avec une solution de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à environ 3% en poids pendant 1 heure à $80^\circ C$. Cela élimine les impuretés organiques.

* La membrane est ensuite rincée à l'eau déminéralisée pendant 1 heure à $80^\circ C$ pour éliminer les traces de peroxyde d'hydrogène.

2. Traitement acide :

* La membrane est immergée dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à une concentration variable (1M à 4M) pendant environ 1 heure à $80^\circ C$. La concentration de l'acide influence les propriétés de la membrane, notamment sa conductivité.

* Après ce traitement, la membrane est à nouveau rincée à l'eau déminéralisée pour éliminer les résidus d'acide.

3. Objectifs de l'activation :

* Améliorer la conductivité ionique : L'activation hydrate la membrane et restaure sa structure ionique, améliorant ainsi sa capacité à conduire les ions protons.

* Éliminer les impuretés : Le peroxyde d'hydrogène et le traitement acide éliminent les impuretés organiques qui peuvent nuire aux performances de la membrane.

* Optimiser les propriétés de la membrane : L'activation optimise les propriétés de la membrane en fonction de l'application spécifique, comme la conductivité et la rétention d'eau.

Autres aspects importants :

* Concentration de l'acide sulfurique : La concentration de l'acide sulfurique peut être ajustée en fonction des besoins de l'application.

* Temps de traitement : Le temps d'immersion dans l'acide sulfurique peut également être optimisé pour obtenir les meilleures performances.

* Température : La température du bain acide et du rinçage à l'eau déminéralisée peut également influencer les résultats. [16]

III.6.2. Elaboration de la cellule microbienne :

✚ Compartiment 1 :

Nous avons mis environ 120 ml d'eaux usées.

✚ Compartiment 2 :

Nous avons mis 120 ml d'eau distillée avec quelques gouttes de solution d'acide sulfurique.



Figure III.27 : Préparation de la cellule microbienne à double Compartiment .

✚ Anode et cathode utilisés:

D'autre part, nous avons préparé deux types d'électrodes :

○ **Electrodes en graphite** Il s'agit d'une électrode en graphite préparée dans des conditions stériles, où les microbes s'oxydent pour produire des électrons qui sont dirigés vers la cathode dans le compartiment 1.



FigureIII.28: Electrode en carbone.

○ **Électrode en cuivre** : Il s'agit d'une plaque de cuivre de 4 cm de long et 3 cm de large, soudée à une tige en cuivre à l'aide d'un fer à souder. Celle-ci permet de réduire les ions hydrogène pour produire de l'hydrogène vert dans le compartiment 2.



FigureIII.29 : Electrodes en cuivre .

○ **Courant électrique** : Il est transmis par des fils en titane reliés à la cathode et à l'anode, ainsi qu'à un voltmètre ou multimètre, afin de contrôler et réguler le courant appliqué pour améliorer la production.

○ **Piège a hydrogène** : Nous avons rempli un bécher avec de l'eau, dans lequel nous avons placé une burette inversée et également remplie, reliée à l'aide d'un tuyau en plastique d'environ 40 cm de long au compartiment 2. Son rôle est de mesuré la quantité de gaz d'hydrogène produit au cours de l'électrolyse. L'ensemble doit être parfaitement étanche pour éviter toute fuite du gaz produit et garantir le succès de l'expérience.



Figure.III.30 : Piège à hydrogène pour mesurer le débit.

○ **Montage de la cellule microbienne pour la production d'hydrogène et de traitement des eaux usées**

Après avoir terminé le montage de la cellule, nous savons procédé au fonctionnement de la cellule microbienne en imposant un courant électrique en réglant le générateur sur 0,8 V pendant une durée allant de 5 à 10 jours, tout en veillant à surveiller et à noter les mesures chaque jour (intensité du courant et l'hydrogène produit).



Figure.III.31 : Un générateur de courant réglé sur 0,8 V.

Ce montage permet de récupérer de l'hydrogène vert, un carburant universel, léger et hautement réactif, pouvant être utilisé comme source d'énergie ou dans d'autres applications, sans émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.



FigureIII.32 : Le montage final.

Référence :

- [1].IMKEN. F : les étapes de traitement des eaux et contrôle de qualité, projet de fin d'études, Université sidi Mohamed ben Abdallah (2015).
- [2] Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & coll. (2009). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* (9e éd.). Paris, France : Dunod.
- [3].Thomas, O., (1995). *Méetrologie des eaux résiduaires*, édition Cebedoc, 192p.)
- [4]. METAHRI., 2012 : élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou.P17, 20, 22, 27, 63, 72,73et74.
- [5]. DEGREMONT, S.A., et al., (2005). *Mémento technique de l'eau*. Tome 1 Tome 1.
- [6].KARDACHE. L. valorisation énergétique des boues de la station d'épuration de boumerdes, Mémoire fin d'étude. Université M'HAMED BOUGERA BOUMERDES (2015).
- [7]. AUSSEL H., Dornier G., Galtier Y., Puzin M., Causse F., 2004 : Le traitement des eaux usées. Institut de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. ED 5026.
- [8] AFNOR. (1994). *Qualité de l'eau – Dosage de la conductivité électrique* (Norme NF T90-008). Paris, France : AFNOR.
- [9] Ouali, M. (2001). *Analyse physico-chimique des eaux usées* (1^{re} éd.). Paris, France : Tec & Doc.
- [10] Lesavre, M. (2007). *Techniques d'analyse physico-chimique de l'eau* (2^e éd.). Paris, France : Lavoisier.
- [11] AFNOR. (2000). *Qualité de l'eau – Dosage de l'ammonium. Partie 2 : méthode spectrophotométrique au bleu d'indophénol* (Norme NF T90-015-2). Paris, France : AFNOR.
- [12] ISO. (2006). *Microbiologie de l'eau — Méthode pour le dénombrement des micro-organismes revivifiables — Comptage des colonies à 22 °C et à 37 °C* (ISO 6222:1999). Genève : Organisation internationale de normalisation.
- [13] AFNOR. (1990). *Eaux — Recherche des Clostridium sulfito-réducteurs — Méthode par ensemencement en tubes avec gélose TSN*. (Norme NF T90-415). Paris : Association Française de Normalisa
- [14] Galaf, M. (2003). *Microbiologie des eaux : indicateurs de contamination et méthodes de détection*. Casablanca : Éditions Universitaires.

[15] Rodier, J. (1996). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* (8^e éd.). Paris : Dunod.

[16] HB Attia · 2013 · Cité par 2 — Solubilisation du Nafion® 117 . La solubilisation du Nafion® consiste à dissoudre la membrane

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

En dehors de leurs applications potentielles en tant que biocapteurs, les cellules électro microbiennes CEM pourraient trouver leurs débouchés dans le traitement des eaux usées.

L'utilisation de déchets à l'anode permet d'assurer une double fonction : produire un flux d'électrons tout en intensifiant les procédés de traitement des effluents par accélération de la dégradation de la matière organique. En dehors de l'abattement de la DCO (Demande Chimique en Oxygène), les CEM peuvent aussi permettre de traiter les nitrates, les sulfures, ou encore de récupérer le cuivre dans les eaux usées.

Une Cellule microbienne a le potentiel de convertir les eaux usées organiques en hydrogène et en produits chimiques à valeur ajoutée telles que le méthane, l'éthanol et le peroxyde d'hydrogène. Par rapport à d'autres méthodes conventionnelles, les CEM offrent un rendement élevé en H₂ avec un faible apport d'énergie de 0,4 à 0,5 V. Les principaux composants d'une CEM sont similaires à ceux du processus d'électrolyse, c'est-à-dire les électrodes d'anode et de cathode, membrane semi-perméable, les microbes électro chimiquement actifs et le bloc d'alimentation. Plusieurs types d'eaux usées, telles que les eaux usées agricoles, domestiques et industrielles, peuvent être utilisés. Dans le cas de notre travail, l'eau utilisée est une eau domestique pris au niveau de la STEEP de Bordj Bou Arreridj. Le procédé électro microbienne utilise des micro-organismes exo-électrogènes, transféreurs d'électrons extracellulaires, capables de donner ou d'absorber des électrons. Dans une cellule d'électrolyse les bactéries actives oxydent la matière organique et produisent des électrons, des protons et du dioxyde de carbone. Toutefois, les eaux usées sont un mélange complexe de divers types de polluants et leur composition dépend fortement de la source de la génération et les micro-organismes utilisés dépendent fortement du substrat présent dans les eaux usées.

Le but de notre travail est d'évaluer les performances du système d'électrolyse microbienne appliqué au traitement des eaux usées qui a été conduit à travers une série de paramètres physico-chimiques et bactériologiques, mesurés avant et après traitement. L'analyse comparative de ces données permet de juger de l'efficacité du procédé, tant sur le plan de l'épuration organique que sur celui de la désinfection.

IV.2. Analyse des paramètres physico-chimique des eaux usées à l'entrée de la station d'épuration de BBA

IV.2.1. La température(T) :

La température est un paramètre important pour le bon fonctionnement:

- Des Systèmes d'épuration dans la mesure où il peut influencer de différentes manières sures :

- La solubilité des sels et des gaz. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas de l'oxygène.

- Aussi plus l'eau est chaude plus la concentration de saturation de l'oxygène devra diminuer.

La valeur de la température de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est 16,86 °C. Cette valeur varie en fonction de l'heure de prélèvement et des conditions météorologiques. L'augmentation de la température au cours du temps est influencée par la température de l'air. A noté qu'une augmentation de la température ne favorise pas le développement des bactéries mésophiles par conséquent contribue à la réduction de la pollution microbiologique. Elle joue un rôle important aussi dans la dégradation de la matière organique par oxydation et minéralisation. Selon l'OMS, la température enregistrée est inférieure à 30°C (la norme), donc la valeur de température de l'eau brute de la STEEP de BBA est conformes aux normes.

IV.2.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Dans le domaine de l'eau le pH joue un rôle primordial à la fois :

- Dans la propriété physique-chimique (acidité, alcalinité, agressivité).
- Dans les processus biologiques donc certains exigent des limites très étroites de PH.
- Dans l'efficacité de certains traitements : coagulation, adoucissement contrôle de corrosion, chloration.

La valeur de pH de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est de 7.35. A noté que les valeurs pH des eaux utilisée pour l'irrigation des cultures devrait être comprise entre 6 et 7 car à ces valeurs la solubilité de la plupart des microéléments est optimale (**Peterson, 1999**). Selon l'OMS, les valeurs de pH compris entre 6,5-9 sont acceptables, le pH d'enregistré de l'eau brute de la STEEP de BBA 7.35 est conforme avec les normes.

IV.2.3. La conductivité électrique

La conductivité de l'eau inverse de la résistivité est proportionnelle à la concentration en minéraux dissous dans l'eau, plus une eau aura une conductivité importante plus une eau comportera de sels minéraux.

La valeur de conductivité électrique de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est 1655 µS/cm. La mesure de la conductivité fournit une indication de la concentration ionique et

apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau, donc de sa minéralisation. Il dépend de la température, de la concentration et types d'ions présents. Une CE supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ fait considérer une eau comme difficilement utilisable en irrigation. Pratiquement la valeur de CE enregistrée est inférieure la norme de l'OMS (2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

IV.2.4. La turbidité

La turbidité est une mesure de la capacité d'une eau à diffuser la lumière, en raison de la présence de particules en suspension (argile, matières organiques, micro-organismes, etc.). Elle est donc un indicateur indirect de la concentration en matières solides fines. La valeur de turbidité de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est de 195 NTU .Une turbidité de 195 NTU indique :

- Une charge importante en matières en suspension (MES), colloïdes, particules organiques/inorganiques.
- Un niveau de pollution important, typique des eaux usées **non traitées** ou **faiblement traitées**.

Il est à noter qu'une turbidité élevée peut conduire à la :

- Détérioration de la qualité visuelle de l'eau (eau trouble).
- Risque de prolifération microbienne, car les particules peuvent protéger les bactéries des désinfectants.
- Problèmes pour les traitements ultérieurs : les boues activées, la filtration ou la désinfection sont moins efficaces à haute turbidité.

En conclusion, d'après les normes ; on note que Les **eaux usées brutes** (avant traitement) peuvent avoir une turbidité qui varie entre **100 et plusieurs centaines de NTU**, selon leur origine (domestique, industrielle, mixte). Par conséquent la valeur enregistrée est conforme aux normes.

IV.2.5. Salinité

La **salinité des eaux usées** exprime la **concentration de sels dissous** (Na^+), potassium (K^+), sulfates (SO_4^{2-}), etc), présent dans ces eaux. Elle est généralement mesurée en **grammes par litre (g/L)** . Une salinité trop élevée peut inhiber les micro-organismes des stations d'épuration.

- **Sur l'environnement** : si l'eau est rejetée dans la nature, elle peut affecter les sols et la faune/flore aquatique.

- **Sur la réutilisation** : une eau trop salée ne peut pas être réutilisée pour l'irrigation ou certains usages industriels. La valeur de salinité de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est de 1g/l. Une salinité de **1 g/L** dans les eaux usées correspond à une conductivité électrique d'environ **1 000 $\mu\text{S/cm}$** , ce qui est considéré comme une eau **faiblement salée**. Cette valeur est bien en deçà des seuils limites fixés pour la réutilisation des eaux usées traitées en Algérie, notamment pour l'irrigation agricole.

La norme algérienne N°**17683** définit les spécifications physico-chimiques et biologiques des eaux usées épurées destinées à des fins agricoles, municipales et industrielles. Selon les directives de la **FAO (1985)**, les eaux d'irrigation sont classées en fonction de leur conductivité électrique (CE) :

CE \leq 750 $\mu\text{S/cm}$: eau de qualité excellente pour l'irrigation.

• **750 $\mu\text{S/cm}$ < CE \leq 2 250 $\mu\text{S/cm}$** : eau de qualité bonne à modérée.

• **2 250 $\mu\text{S/cm}$ < CE \leq 5 000 $\mu\text{S/cm}$** : eau de qualité médiocre.

• **CE > 5 000 $\mu\text{S/cm}$** : eau de qualité très médiocre, déconseillée pour l'irrigation.

En conclusion Une conductivité de **1 000 $\mu\text{S/cm}$** (soit 1 g/L de salinité) place l'eau dans la catégorie **bonne à modérée**, ce qui est généralement acceptable pour l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sous réserve d'une gestion appropriée.

IV.2.6. TDS (Total Dissolved Solids)

Le **TDS des eaux usées** représente la **somme des matières inorganiques et organiques** dissoutes dans l'eau, **qui ne peuvent pas être éliminées par simple filtration**. Ces substances incluent principalement :

• Des **sels minéraux** (comme les chlorures, sulfates, nitrates),

• Des **métaux lourds** (plomb, cuivre, zinc, etc.),

• Des **matières organiques dissoutes**,

• Des **ions** (comme le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium).

Le TDS est généralement exprimé en **mg/L (milligrammes par litre)**.

• Il est mesuré souvent par **conductivité électrique**, car les solides dissous affectent la capacité de l'eau à conduire l'électricité.

Un **TDS élevé** dans les eaux usées peut être **nocif pour les milieux aquatiques** ou pour le **traitement de l'eau**. Il peut indiquer une **pollution chimique ou organique** importante. Le TDS est un **paramètre de surveillance réglementaire** dans de nombreux pays, notamment pour le rejet dans l'environnement ou le recyclage de l'eau. **La valeur de salinité de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est de 717 mg/l.**

Selon L'OMS Les valeurs de TDS varient souvent entre **300 et 1 200 mg/L**, donc **714 mg/L est une valeur moyenne acceptable.**

En conclusion

Une valeur de **714 mg/L de TDS** dans des eaux usées est **tout à fait courante**, mais cela **nécessite un traitement** avant rejet ou réutilisation.

- C'est un indicateur utile pour évaluer :
 - L'efficacité d'un système de traitement.
 - La potentielle pollution des milieux récepteurs.
 - La possibilité de réutilisation (agriculture, usage industriel, etc.).

IV.2.7. Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ (Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours) est un indicateur clé de la pollution organique des eaux usées. Elle mesure la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable présente dans l'eau, sur une période de 5 jours à 20°C. La valeur de **DBO₅** de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est de 182 mg/l. Une DBO₅ de 183 mg/L est **très élevée** comparée aux normes usuelles. Pour comparaison :

- ✓ Eaux usées domestiques brutes : typiquement entre **200 et 400 mg/L**.
- ✓ Eaux usées traitées : généralement **< 30 mg/L (normes OMS)** en sortie.

Cette valeur suggère une **forte charge organique**, typique d'une eau usée **non traitée** ou insuffisamment traitée. Cela signifie que si cette eau était rejetée directement dans le milieu naturel, elle consommerait une grande quantité d'oxygène, risquant de provoquer une **asphyxie du milieu aquatique** (zones mortes, mortalité des poissons, etc.), Risque d'eutrophisation, de développement d'algues, et de perturbation des écosystèmes aquatiques.

En résumé :

La DBO₅ de **183 mg/L** indique une eau **fortement chargée en matière organique**, typique d'eaux usées **non traitées**. Cette valeur souligne l'importance d'un **traitement biologique approprié** avant tout rejet pour éviter une dégradation du milieu naturel.

IV.2.8. Demande chimique en oxygène DCO

La DCO (Demande Chimique en Oxygène) des eaux usées est un paramètre clé utilisé pour mesurer la quantité de matière organique dans l'eau qui peut être oxydée par des agents

chimiques, généralement en utilisant du dichromate de potassium dans un milieu acide. Elle permet ainsi d'estimer la pollution organique présente dans les eaux usées. La valeur de **DCO** de l'eau brute enregistrée pendant le mois d'avril est de 704 mg/l. Une DCO de 704 mg/L est relativement élevée, ce qui suggère que les eaux usées en question contiennent une quantité importante de matière organique. En règle générale, les eaux usées domestiques non traitées ont une DCO qui varie entre 200 et 600 mg/L. Si l'on dépasse 600 mg/L, cela indique un niveau de pollution plus important, nécessitant probablement un traitement avancé.

Selon les normes environnementales, une valeur de DCO inférieure à 150 mg/L est généralement considérée comme acceptable pour les eaux rejetées dans les milieux récepteurs, telles que les rivières ou les lacs. Une valeur de 704 mg/L dépasse largement cette limite, indiquant que l'eau nécessite un traitement efficace avant d'être rejetée.

Si cette eau est rejetée sans traitement ou si elle est insuffisamment traitée, elle pourrait nuire à la qualité de l'eau dans les milieux récepteurs. En effet, une DCO élevée peut entraîner une consommation excessive d'oxygène dissous dans l'eau, ce qui peut étouffer la vie aquatique, nuire à la biodiversité et perturber les écosystèmes.

Conclusion : Une DCO de 704 mg/L dans des eaux usées indique un fort niveau de pollution organique, ce qui nécessite des mesures de traitement appropriées pour réduire cette valeur avant tout rejet dans l'environnement.

IV.2.9. Nitrate

On observe que les valeurs des nitrates d'un échantillon des eaux usées obtenues d'après les analyses, à l'entrée, les teneurs en nitrates avant traitement est de 8 mg/l. Ce résultat montre que la concentration en nitrates dans les eaux usées avant traitement est de 8 mg/l, ce qui est inférieur à la norme de rejet algérienne, fixée à 10 mg/l. La teneur mesurée (8 mg/l) respecte déjà les normes environnementales algériennes, même avant le traitement. Cela suggère que la pollution par les nitrates est relativement faible dans cet échantillon d'eaux usées. Le traitement des eaux usées ne sera donc pas fortement sollicité pour la réduction des nitrates, ce qui peut être vu comme un avantage économique et environnemental.

Bien que conforme, une concentration de 8 mg/l reste proche de la limite réglementaire (10 mg/l). En cas de variations saisonnières ou industrielles, elle pourrait rapidement dépasser le seuil. La présence de nitrates, même à faible dose, peut avoir un impact environnemental, notamment sur l'eutrophisation des milieux aquatiques si les rejets sont constants ou massifs.

En conclusion :

La qualité des eaux usées en entrée est **relativement bonne** du point de vue des nitrates. Cependant, il est **important de maintenir une surveillance régulière** pour éviter tout dépassement futur et garantir un rejet conforme et respectueux de l'environnement.

IV.2.10. Nitrites

Le résultat de l'analyse indique que la teneur en nitrites à l'entrée de la station d'épuration est de 0,09 mg/L, ce qui est inférieur à la norme algérienne de rejet, fixée à 0,1 mg/L. Même avant traitement, les eaux usées respectent déjà la norme nationale en vigueur pour les nitrites. Cela indique une pollution nitritée relativement faible à la source. Les nitrites (NO_2^-) sont des composés azotés intermédiaires, souvent issus de la transformation de l'ammoniac ou de la dégradation de matières organiques azotées. Leur faible concentration ici suggère :

- ✓ Soit une origine des eaux usées peu chargée en composés azotés,
- ✓ Soit un début de nitrification déjà amorcé en amont (par exemple, dans le réseau d'égout ou lors du transport)

Le faible taux de nitrites à l'entrée facilite le travail du système de traitement biologique, qui peut ainsi se concentrer davantage sur d'autres polluants (ammoniac, matières organiques, etc.). Cela peut aussi signifier que le traitement en place aura une marge confortable pour respecter les normes en sortie.

Même si les niveaux sont faibles ici, il est important de poursuivre les contrôles réguliers car les concentrations en nitrites peuvent varier en fonction de l'origine des eaux usées, des conditions d'exploitation du réseau, ou d'événements ponctuels (déversements, pluies, etc.).

IV.2.11. L'analyse bactériologique des eaux usées avant traitement :

L'analyse bactériologique a pour but la recherche et le dénombrement des germes existant dans les échantillons d'eau à analyser. Il faut signaler qu'un examen bactériologique ne peut être interprété que s'il est effectué sur un échantillon correctement prélevé dans un récipient stérile, selon un mode opératoire précis évitant toutes les contaminations accidentelles, correctement transporté au laboratoire et analysé sans délai ou après une courte durée de conservation dans des conditions satisfaisantes.

Le principe général des techniques des analyses bactériologiques des eaux consiste à ensemercer une quantité connue d'eau à analyser sur un milieu de culture adapté, solide ou liquide. On suppose que, pendant l'incubation, chaque microorganisme présent se développe

pour donner soit une colonie visible sur un milieu solide, soit des changements d'apparence dans un milieu liquide essentiellement un trouble de celui-ci. Les milieux solides (gélés) :

- C'est des milieux liquides auxquels on ajoute un agent de solidification tel que l'agar (1.5-2%).

- Les milieux solides peuvent être conditionnés en boîtes de Pétri ou en tube à essai (gélose en culot, gélose en pente).

- La croissance se fait par l'apparition des colonies.

En raison de la diversité des espèces bactériennes, virales et parasitaire, des germes test vont être analysés qui représenteront par la suite l'aspect microbiologique de ces eaux. Une analyse complète de l'eau brute a été effectuée en se basant sur la recherche et le dénombrement des paramètres suivants :

- ✓ Les coliformes totaux et les coliformes fécaux ;
- ✓ Staphylocoques pathogène ;
- ✓ La flore aérobie mésophile totale ;
- ✓ La recherche et le dénombrement des Clostridium sulfito-réducteurs.

IV.2.11.1. Coliforme fécaux à 44°C

Les résultats obtenus concernent le **dénombrement des coliformes fécaux à 44 °C** dans une **eau usée**, exprimé en **UFC/mL (Unités Formant Colonie par millilitre)** à différentes **dilutions décimales** sont exprimées dans le tableau.IV1:

Tableau.IV.1. Résultats de dénombrement des coliformes fécaux à 44 °C :

Dilution	Coliformes fécaux (UFC/mL)
10^{-1}	> 1000
10^{-2}	340
10^{-3}	107

Les coliformes fécaux sont des indicateurs de pollution d'origine fécale. Leur présence en grand nombre indique une contamination biologique importante. Ici, les concentrations sont élevées même à des dilutions importantes, ce qui montre que l'eau est fortement contaminée.

On observe une diminution progressive du nombre d'UFC avec l'augmentation du facteur de dilution, ce qui est attendu dans une analyse microbiologique correcte.

On peut dire pour une dilution 10^{-1} la valeur est trop élevée pour être comptée précisément.

On retient généralement les valeurs comprises entre 30 et 300 colonies pour les calculs fiables, donc les dilutions 10^{-2} et 10^{-3} sont plus pertinentes.

En conclusion sur la qualité de l'eau :

Ces résultats indiquent une eau usée brute, non traitée. L'eau est non conforme à toute norme d'utilisation (irrigation, etc.). Une étape de Traitement secondaire et tertiaire et microbiologique est indispensable avant tout rejet dans le milieu naturel ou réutilisation.

IV.2.11.2. La flore totale aérobie mésophile (FTAM)

Les résultats concernent la **flore totale aérobie mésophile (FTAM)**, un indicateur microbiologique qui mesure la quantité de micro-organismes capables de se développer à 37 °C (température du corps humain) en présence d'oxygène. Elle permet d'évaluer la charge microbienne de notre échantillon d'eau usée sont représentés dans le **tableau.IV.2**

Tableau.IV.2. Résultats de dénombrement de la flore totale aérobie mésophile (FTAM),

Dilution	Observation	Interprétation
10^{-1}	Très chargée	La concentration en bactéries est très élevée, la dilution n'a pas suffi à réduire la densité microbienne à un niveau mesurable. L'eau usée est fortement contaminée.
10^{-2}	Moins chargée	La dilution a permis de réduire la charge, mais elle reste importante. On reste dans une zone de forte contamination.
10^{-3}	Inacceptable	Cela signifie que le dénombrement n'est pas fiable : trop de colonies (non isolables), ou au contraire aucune croissance significative (selon contexte). Dans ce cas, on peut supposer une mauvaise lisibilité du résultat ou une variabilité des données.
10^{-4}	68 UFC/ml	Ce résultat est lisible et quantifiable. On estime donc la concentration d'origine à environ $6,8 \times 10^4$ UFC/ml (68×10^4), ce qui reste une charge microbienne élevée pour une eau usée.

On peut dire que l'eau est fortement contaminée : la présence massive de bactéries aérobies mésophiles à faible dilution (10^{-1} , 10^{-2}) est typique des eaux usées brutes. **la dilution à 10^{-4}** : permet un dénombrement fiable (68 UFC), ce qui suggère que les dilutions précédentes n'étaient pas encore assez faibles pour un comptage précis.

En conclusion :

Les résultats montrent une **forte contamination microbienne**, typique des eaux usées. La seule dilution permettant un comptage exploitable est 10^{-4} , avec 68 UFC, ce qui suggère une concentration initiale élevée en germes aérobies mésophiles. Cela confirme que l'eau analysée nécessite un traitement avant toute réutilisation ou rejet dans le milieu naturel.

IV.2.11.3. Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C

Les résultats concernant la **Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM)** à 22 °C dans d'échantillon d'eau usée montrent une **très forte contamination microbiologique**, et leur évolution en fonction des dilutions nous permet de dire :

✓ Pour une dilution 10^{-1} (fortement chargé) :

Cela signifie qu'à peine diluée, l'eau usée contient une très grande quantité de bactéries aérobies mésophiles, ce qui est typique d'une eau fortement polluée (eaux usées domestiques brutes, industrielles, etc.).

✓ Pour une dilution 10^{-2} (moins chargé) :

Après dilution 100 fois (10^{-2}), la charge bactérienne reste présente mais devient plus facilement quantifiable, ce qui peut être utile pour les analyses microbiologiques. Cela indique toutefois que la contamination est encore importante.

✓ Pour une dilution 10^{-3} (inacceptable) :

Le terme « inacceptable » ici peut faire référence à la densité de colonies sur la boîte de Pétri : soit trop nombreuses pour être comptées, soit l'aspect des colonies empêche une lecture claire. Cela suggère une **saturation de croissance bactérienne**, même après une dilution de 1000 fois.

✓ Pour une dilution 10^{-4} (présence de 108 UFC/mL) :

Si à une dilution 10^{-4} , on observe 10^8 UFC/mL (Unités Formant Colonie), cela signifie que la concentration initiale était de l'ordre de 10^{12} UFC/mL, ce qui est extrêmement élevé. Cela dépasse largement les normes pour tout type d'eau réutilisable ou rejetée dans le milieu naturel.

En conclusion

Ces résultats indiquent que :

- L'eau usée analysée est extrêmement polluée sur le plan microbiologique.
- La densité bactérienne est bien au-delà des seuils d'acceptabilité, que ce soit pour un rejet environnemental ou un usage quelconque.
- L'évolution des résultats avec les dilutions montre une charge microbienne exponentielle, qui ne se stabilise que très tardivement (vers 10^{-4}), signe d'une contamination massive. Un traitement préalable (physico-chimique, biologique ou par désinfection) est indispensable avant tout rejet ou réutilisation.

IV.2.11.4. Coliforme totaux à 37°C

Les résultats concernent le **dénombrement des coliformes totaux à 37°C** dans une eau usée, selon différentes dilutions. Sont les suivantes :

✓ **Pour une dilution 10^{-1} (très chargée)**, Cela signifie que la densité bactérienne est très élevée à cette dilution. Les boîtes de pétri sont probablement surchargées (trop de colonies pour être comptées). Cela indique une **forte contamination** initiale de l'eau usée en coliformes totaux.

✓ **Pour une dilution 10^{-2} (moins chargée)**, il y a moins de colonies visibles, ce qui est logique puisque la dilution est plus grande. Cela montre que les coliformes sont encore présents en grande quantité, mais le comptage commence à être possible.

✓ **Pour une dilution 10^{-3} (160 UFC/mL)**, cette dilution donne un résultat quantifiable et dans la plage idéale de comptage (30 à 300 UFC). Cela permet d'estimer la concentration initiale en coliformes totaux dans l'échantillon d'eau usée.

Pour une dilution 10^{-4} (faible), très peu ou pas de colonies observées. Cela confirme que la dilution est trop importante pour un comptage optimal.

À partir de la dilution 10^{-3} avec **160 UFC/mL**, on peut estimer la concentration initiale (avant dilution) en multipliant :

$$160 \text{ UFC/ml} \times 10^3 = 1,6 \times 10^5 \text{ UFC/ml}$$

Donc, la concentration de coliformes totaux dans l'eau usée brute est d'environ 160 000 UFC/ml, ce qui est **très élevé** et caractéristique d'une pollution fécale importante.

IV.3. Analyse des paramètres physico-chimique des eaux usées après traitement par les procédés électromicrobienne

IV.3.1. Température

La valeur de la température de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse électromicrobienne est de 15 ° C. La température de 14 °C est généralement **conforme aux normes de rejet** dans les milieux naturels (rivières, lacs), qui exigent que la température des eaux rejetées ne perturbe pas significativement l'écosystème aquatique.

Une température de 14 °C indique que le procédé d'électrolyse électro-microbienne **n'a pas** généré une élévation significative de température, ce qui est généralement positif. Cela signifie que le traitement est **énergétiquement modéré**, avec peu de dégagement thermique, ce qui peut être un **avantage en termes de consommation d'énergie**. À 14 °C, l'activité microbienne est **ralentie** par rapport à une température optimale (qui se situe souvent autour de 25 à 35 °C pour les bactéries mésophiles). Cela pourrait **réduire l'efficacité biologique** du traitement si la température n'est pas régulée.

La température influence les **réactions électrochimiques** : à basse température, les cinétiques de transfert d'électrons peuvent être **plus lentes**. Cela signifie qu'un fonctionnement à 14 °C peut **nécessiter un ajustement du courant** ou du temps de traitement pour conserver la performance.

En résumé :

La température de 14 °C après traitement par électrolyse électro-microbienne indique un **procédé à faible dégagement thermique**, mais elle soulève des questions sûres :

- L'**efficacité biologique** à cette température,
- La **cinétique des réactions électrochimiques**,
- Et l'**adaptabilité du système** à différents climats ou saisons.

Il serait pertinent de comparer ce résultat à la température de l'eau avant traitement, ainsi qu'à la performance globale du procédé (rendement d'élimination des polluants).

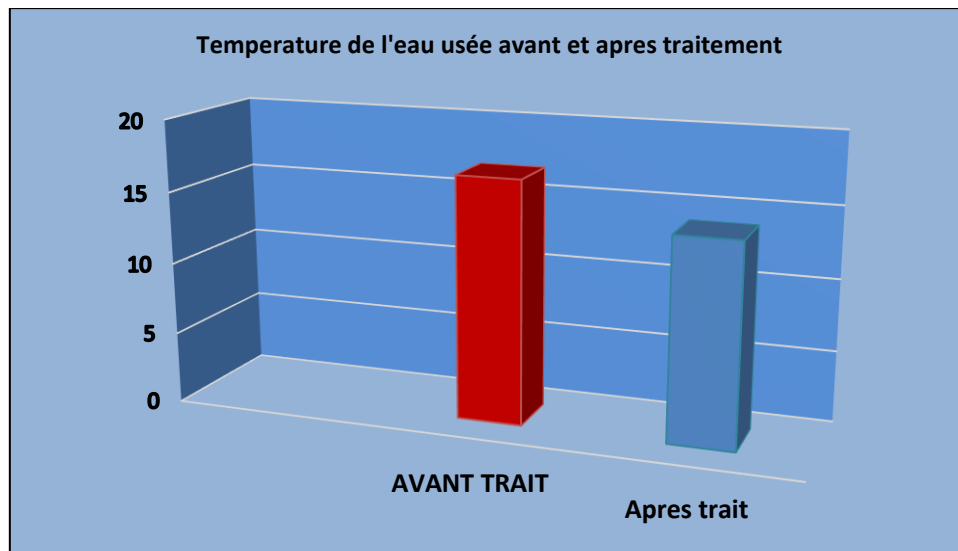


Figure.IV.1. Température de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.2. Potentiel d'hydrogène (PH)

La valeur pH de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 7,17.

La valeur de 7,17 est proche de la neutralité (pH 7), ce qui signifie que l'eau usée, après traitement, ne présente pas une acidité ou une alcalinité excessive. Cela peut être vu comme un résultat positif du traitement, car l'eau traitée n'est ni trop acide ni trop basique, ce qui peut être plus compatible avec l'environnement et les systèmes biologiques.

Un pH proche de la neutralité est généralement favorable pour les écosystèmes aquatiques. Les variations extrêmes de pH (trop acides ou trop basiques) peuvent perturber les organismes aquatiques, tandis qu'un pH modéré comme celui-ci est généralement moins nocif pour la vie aquatique.

L'électrolyse microbienne, qui est une technique impliquant des microbes pour dégrader les polluants dans l'eau, pourrait avoir contribué à stabiliser le pH. En fonction des conditions et des microbes utilisés, l'électrolyse peut produire des gaz ou des composés qui influencent le pH, mais cette valeur indique que les produits de réaction sont probablement bien équilibrés.

Conclusion :

La valeur de pH de 7,17 est un bon signe du traitement de l'eau usée, indiquant que l'eau traitée est proche de la neutralité, ce qui est souvent souhaitable tant pour l'environnement que pour des applications ultérieures. Toutefois, il serait utile de vérifier d'autres paramètres (comme les concentrations de métaux lourds, de produits chimiques résiduels ou de micro-organismes) pour s'assurer de l'efficacité globale du traitement.

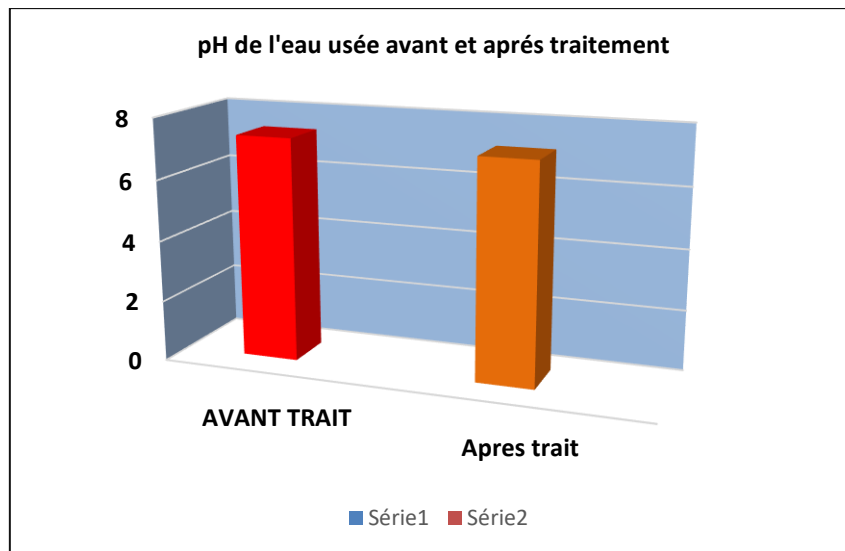


Figure.IV.2. pH de l'eau usée avant et après traitement

La conductivité (C) :

La valeur de la conductivité de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 1535 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Une conductivité de 1535 $\mu\text{S}/\text{cm}$ après traitement par électrolyse microbienne semble relativement modérée, mais elle reste élevée par rapport aux normes. Cela signifie que le traitement a réduit une partie des polluants.

L'électrolyse microbienne est une technologie qui utilise des micro-organismes pour transformer des substances organiques en produits chimiques utiles (souvent des gaz comme l'hydrogène, ou des produits réducteurs). Ce traitement peut avoir un effet sur la réduction des polluants organiques, mais il ne garantit pas nécessairement une élimination totale des sels dissous ou des ions.

Pour des telles valeurs de conductivité, l'eau peut utiliser dans des applications spécifiques (comme l'irrigation, l'industrie), des limites précises de conductivité sont fixées. Par exemple, pour l'irrigation, une conductivité de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est souvent acceptable, mais elle peut être problématique pour certaines cultures sensibles.

Conclusion :

Le résultat montre que le traitement par électrolyse microbienne a été partiellement efficace pour abaisser la conductivité de l'eau, mais une conductivité de 1535 $\mu\text{S}/\text{cm}$ reste encore relativement élevée des usages sensibles. Des traitements complémentaires pourraient être nécessaires pour atteindre des niveaux de conductivité compatibles avec les normes environnementales et de santé.

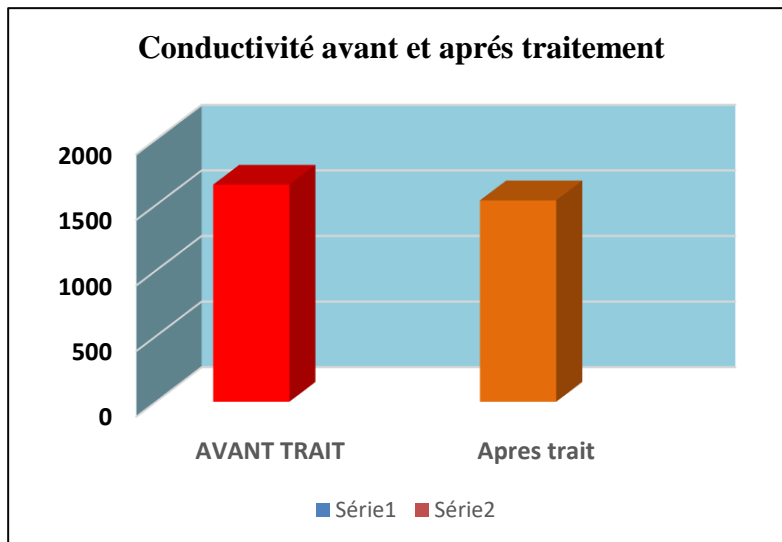


Figure.IV.3. Conductivité de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.3. La turbidité

La valeur de la turbidité de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 18.9 NTU NTU.

Les résultats indiquent une réduction significative de la turbidité de l'eau après traitement par électrolyse microbienne. Une réduction de la turbidité à 18.9 NTU montre une amélioration notable de la qualité de l'eau, elle indique que l'électrolyse microbienne a eu un impact positif en réduisant la turbidité. L'électrolyse microbienne semble être un procédé efficace pour éliminer certaines particules en suspension et potentiellement d'autres contaminants microbiens.

La réduction de la turbidité de 195 NTU à 18.9 NTU correspond à une réduction d'environ 90%, ce qui est un excellent résultat. Cela suggère que l'électrolyse microbienne a non seulement permis de réduire la charge particulaire, mais elle pourrait également avoir contribué à éliminer des contaminants organiques ou microbiens liés à la turbidité.

En Conclusion :

Ces résultats montrent que le traitement par électrolyse microbienne est prometteur pour réduire la turbidité de l'eau usée. Toutefois, pour des applications dans des contextes où une qualité d'eau très élevée est nécessaire, il serait essentiel de compléter ce traitement avec des étapes supplémentaires, comme la filtration ou la désinfection. La surveillance de paramètres microbiens et chimiques supplémentaires serait aussi importante pour s'assurer de la sécurité de l'eau traitée.

En résumé, l'électrolyse microbienne semble être une méthode efficace pour réduire la turbidité de l'eau usée, mais des tests supplémentaires seraient nécessaires pour évaluer l'efficacité à long terme et son impact sur la qualité sanitaire de l'eau traitée.

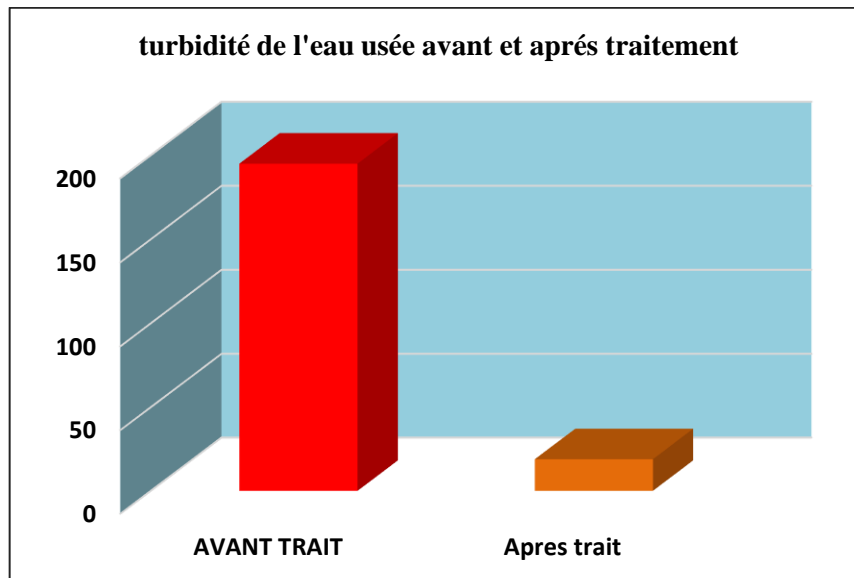


Figure.IV.4. Turbidité de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.4. Salinité

La valeur de la salinité de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 0,95 g/l. Les résultats présentés montrent une légère diminution de la salinité de l'eau usée après traitement par électrolyse microbienne, passant de 1 g/L à 0,95 g/L, soit une réduction de 5 %.

Une baisse de 0,05 g/L peut sembler minime, mais elle est significative si elle est reproductible et mesurée avec précision. Cela suggère que le procédé d'électrolyse microbienne a un certain effet sur la salinité, bien qu'il ne s'agisse pas de sa fonction principale.

Les hypothèses possibles expliquant cette baisse peuvent être soit une précipitation de certains ions : L'électrolyse peut induire des réactions chimiques qui font précipiter certains sels, les retirant de la phase aqueuse, soit absorption ou fixation sur la biomasse : Les microorganismes peuvent capturer ou échanger certains ions, comme les Na^+ , Cl^- , ou d'autres cations/anions présents, ou encore un effet de dilution ou évaporation non pris en compte : La variation pourrait aussi être due à des facteurs extérieurs comme l'évaporation ou une dilution accidentelle pendant le processus expérimental.

En conclusion générale :

Le traitement par électrolyse microbienne semble entraîner une légère réduction de la salinité de l'eau usée, probablement en raison de réactions physico-chimiques ou biologiques

impliquant les ions dissous. Bien que modeste, cet effet pourrait contribuer à améliorer la qualité de l'eau traitée, mais des études complémentaires sont nécessaires pour en comprendre les mécanismes exacts et en confirmer la portée.

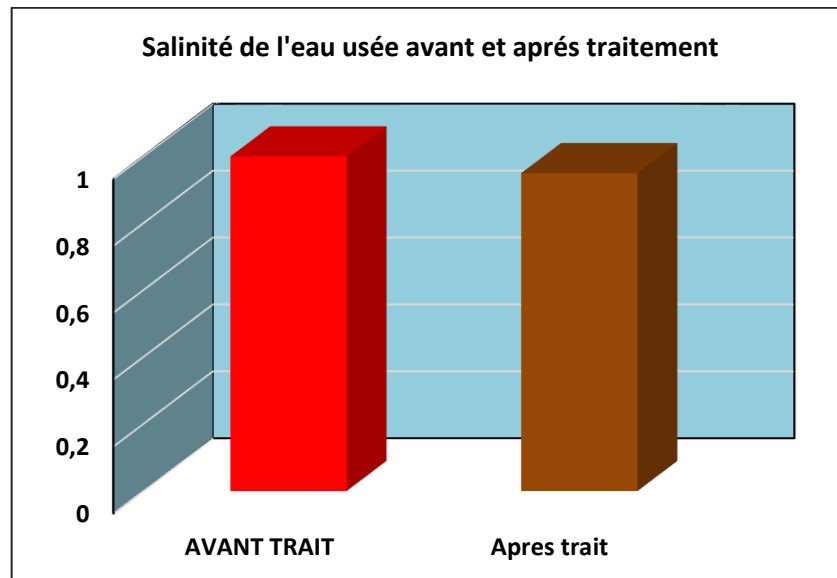


Figure.IV.5. Salinité de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.5. TDS (Total Dissolved Solids)

La valeur de la **TDS** de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 7 mg/l.

Les résultats indiquent une réduction significative de la **TDS (Total Dissolved Solids)** de l'eau usée, passant de **717 mg/L** avant traitement à **7 mg/L** après traitement par **électrolyse microbienne**. Cette diminution peut être expliquée par une réduction de la concentration totale de solides dissous dans l'eau, incluant des sels, minéraux, et autres substances dissoutes. Avant le traitement, avec une valeur de **717 mg/L**, l'eau est relativement chargée en solides dissous. Cela peut résulter de contaminants tels que des sels minéraux, des métaux, des résidus organiques, et des composés chimiques présents dans les eaux usées.

Après traitement, la valeur de **7 mg/L** montre une diminution de plus de 99% des solides dissous. Cette réduction est très impressionnante et indique que le traitement par électrolyse microbienne a été extrêmement efficace pour éliminer une grande partie de ces solides, y compris potentiellement des ions, des matières organiques, et des sels solubles.

L'**électrolyse microbienne** est une technologie innovante qui combine les principes de l'électrolyse et des processus biologiques. Elle utilise des micro-organismes pour dégrader ou transformer les contaminants dans l'eau. En présence d'un courant électrique, ces micro-organismes peuvent dégrader des matières organiques complexes et précipiter certains sels ou

métaux, réduisant ainsi la **TDS**. L'électricité joue un rôle clé en favorisant la réaction redox qui permet de séparer les éléments dissous de l'eau.

Dans ce contexte, il semble que l'électrolyse microbienne ait efficacement réduit la concentration de **solides dissous**, particulièrement les **polluants solubles**. Ce processus peut éliminer des contaminants comme les ions métalliques, les substances organiques dissoutes, et les sels solubles qui contribuent à la **TDS**.

En conclusion:

Les résultats montrent que le traitement par électrolyse microbienne est très efficace pour réduire la **TDS** de l'eau usée, ce qui améliore grandement la qualité de l'eau. Toutefois, pour une évaluation complète, il serait pertinent d'analyser d'autres paramètres de qualité et de vérifier l'efficacité à long terme du système.

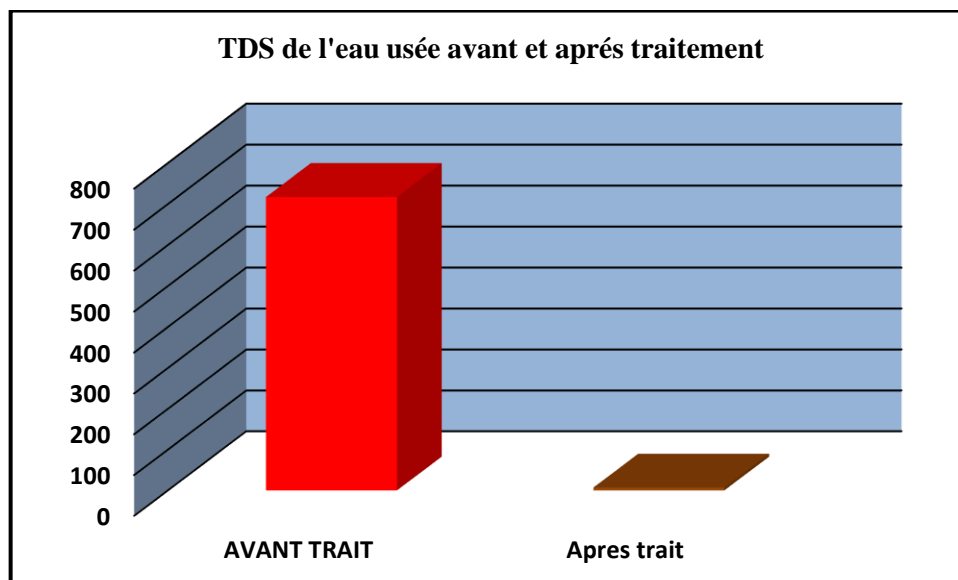


Figure.IV.6.TDS de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.6. Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La valeur de la **DBO₅** de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 15 mg/l.

- Les résultats indiquent une **réduction significative de la DBO₅** (Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours) après traitement de l'eau usée par **électrolyse microbienne**, passant de **183mg/L à 15 mg/L**. Cela peut expliquer que cette eau usée après traitement indique une **charge organique nettement inférieure**, correspondant à une **eau partiellement épurée**. En général, une **DBO₅ < 25 mg/L** est souvent exigée pour le rejet dans le milieu naturel, selon les normes environnementales locales.

La technologie utilisée semble très performante pour dégrader la matière organique biodégradable. Les microorganismes présents dans les biofilms électroactifs oxydent la matière organique en produisant des électrons, ce qui favorise une double action : **épuration** et éventuellement **production d'électricité**.

Une DBO₅ de 15 mg/L indique une eau **largement conforme** aux normes de rejet dans de nombreux pays.

En conclusion

Les résultats démontrent que le traitement par **électrolyse microbienne est très performant**, permettant une réduction de plus de 90 % de la DBO₅. Cela confirme son potentiel comme **alternative innovante et durable** aux méthodes conventionnelles de traitement des eaux usées.

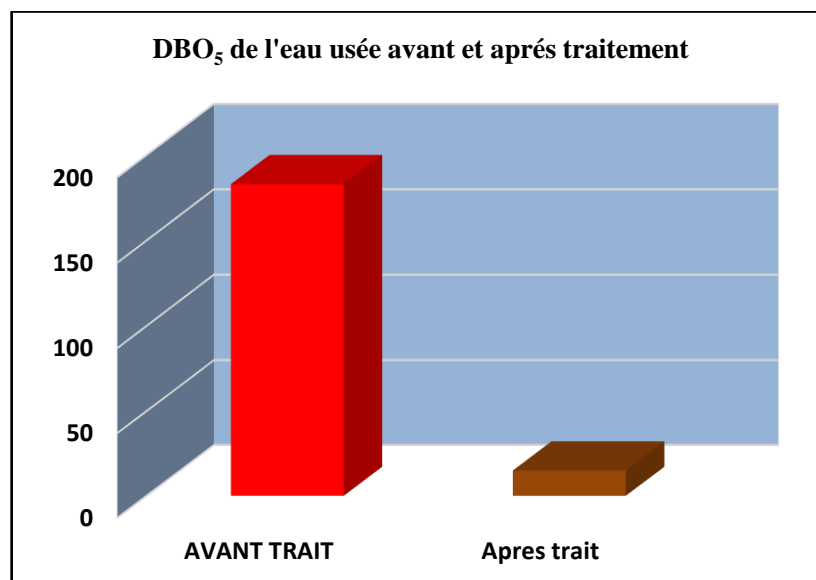


Figure.IV.7. DBO₅ de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.7. Demande chimique en oxygène DCO

La valeur de la **DCO** de l'eau usée enregistrée après traitement par électrolyse microbienne est de 95mg/l.

Les résultats présentés montrent une réduction significative de la DCO (Demande Chimique en Oxygène) de l'eau usée avant et après le traitement par électrolyse microbienne. Cela est probablement dû qu'avant traitement, une DCO élevée de 704 mg/L indique que l'eau usée contient une quantité importante de matières organiques susceptibles de consommer de l'oxygène pendant le processus de dégradation chimique. Cette valeur est généralement considérée comme élevée pour des eaux usées domestiques ou industrielles.

Après traitement la DCO a diminué à 95 mg/L. Cette baisse est significative, avec une réduction de plus de 86% (704 mg/L → 95 mg/L). Cela indique que l'électrolyse microbienne a été efficace pour décomposer une grande partie des substances organiques présentes dans l'eau usée, réduisant ainsi la pollution organique.

Une réduction aussi importante de la DCO suggère que la méthode d'électrolyse microbienne a été particulièrement efficace pour réduire la charge organique. Cette méthode pourrait avoir permis de dégrader des composés organiques complexes en produits plus simples et moins polluants.

La DCO restante de 95 mg/L, bien que bien inférieure à la valeur initiale, pourrait encore être considérée comme relativement élevée selon les normes de qualité de l'eau (en particulier pour des applications comme la réutilisation de l'eau ou le rejet dans les milieux aquatiques). En fonction des exigences locales, une réduction supplémentaire pourrait être nécessaire pour atteindre les normes environnementales.

En conclusion :

Les résultats montrent une efficacité remarquable du traitement par électrolyse microbienne, mais il pourrait être nécessaire de poursuivre le traitement pour atteindre des niveaux encore plus bas de DCO, selon les exigences spécifiques de la réglementation en vigueur.

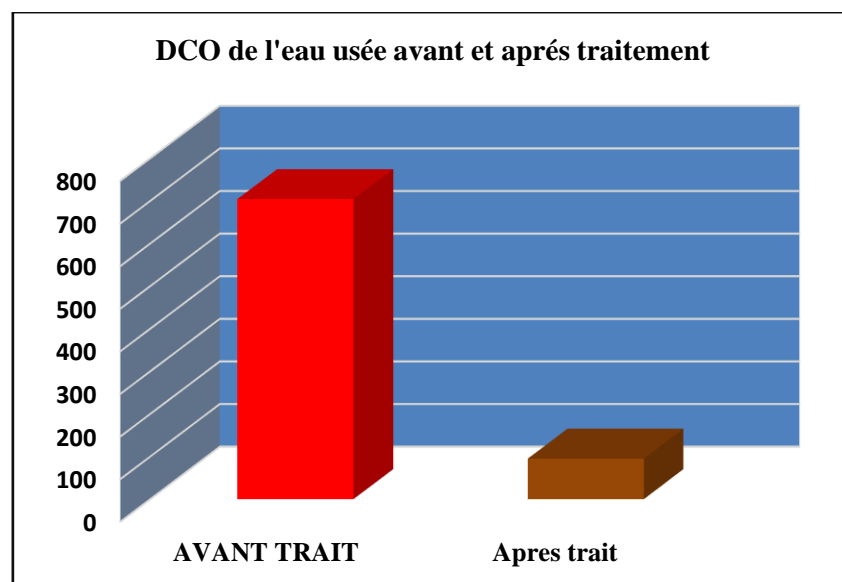


Figure.IV.8. DCO de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.8. Nitrate

On observe que les valeurs des nitrates d'un échantillon des eaux usées obtenues d'après les analyses après traitement par électrolyse microbienne la valeur est de 5 mg/L.

Ce résultat montre une réduction efficace des nitrates après traitement des eaux usées par électrolyse microbienne, même si les valeurs initiales étaient déjà inférieures à la norme de rejet algérienne. Cette valeur est inférieure à la limite réglementaire algérienne, fixée à 10 mg/L, ce qui signifie que l'eau est déjà conforme avant traitement du point de vue des nitrates. Le traitement par électrolyse microbienne a permis de réduire la concentration de 3 mg/L, soit une réduction de 37,5 %.

Même si la valeur initiale respecte la norme, cette réduction supplémentaire est bénéfique car elle diminue davantage la charge polluante.

Par conséquent, la technique d'électrolyse microbienne s'avère efficace pour l'élimination partielle des nitrates, ce qui montre son potentiel dans le traitement des eaux usées.

Cela démontre aussi que ce procédé pourrait être particulièrement utile dans des cas où les concentrations initiales seraient supérieures aux normes, ou dans une optique de réutilisation de l'eau, où des normes plus strictes peuvent s'appliquer (eau potable, irrigation, etc.).

En conclusion :

Le traitement a permis une **amélioration de la qualité de l'eau**, même si celle-ci était déjà dans les normes. Ce résultat met en évidence l'intérêt de l'électrolyse microbienne comme **technologie complémentaire ou préventive**, permettant d'assurer une qualité optimale des rejets dans l'environnement ou pour des usages futurs.

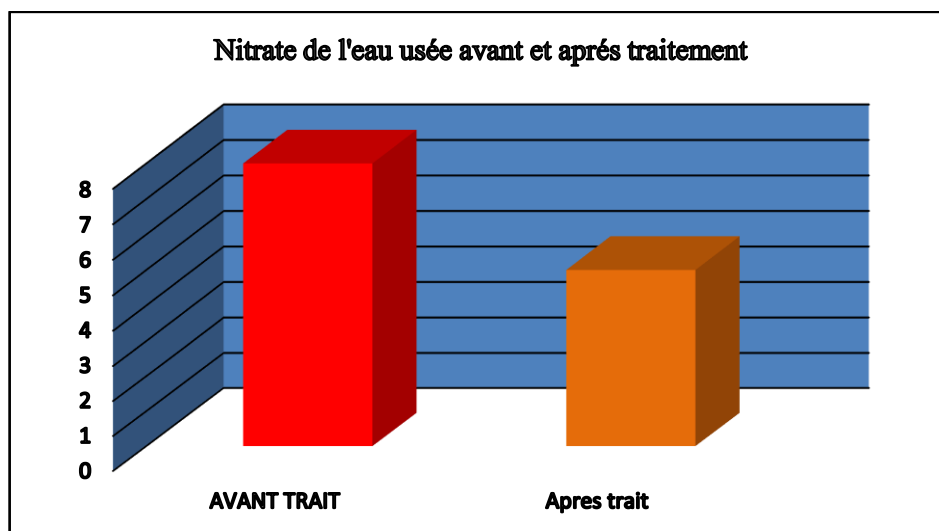


Figure.IV.9. Nitrate de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.9. Nitrite

On n'observe que les valeurs des nitrites d'un échantillon des eaux usées obtenues après traitement par électrolyse microbienne la valeur devienne 0.05 mg/l. Ce résultat met en

évidence une amélioration de la qualité de l'eau usée après traitement, bien que l'échantillon analysé respecte déjà la norme de rejet algérienne avant traitement (inférieur à 0.1 mg/l).

Les analyses montrent que la concentration en nitrites dans l'eau usée à l'entrée est de 0,09 mg/L, une valeur inférieure à la limite réglementaire algérienne de 0,1 mg/L. Cela indique que même sans traitement, l'effluent est conforme à la réglementation en vigueur concernant les nitrites. Après traitement par électrolyse microbienne, la concentration en nitrites diminue davantage pour atteindre 0,05 mg/L.

La réduction de la concentration en nitrites de 0,09 mg/L à 0,05 mg/L montre que le procédé d'électrolyse microbienne est efficace pour éliminer une partie des nitrites, même si la concentration initiale était déjà faible.

Bien que le traitement ne soit pas indispensable pour respecter la norme dans ce cas précis, il permet d'améliorer la qualité de l'eau, ce qui est particulièrement important si l'eau traitée est destinée à un usage sensible (irrigation, rejet dans un milieu naturel fragile, etc.).

La diminution des nitrites est bénéfique car les nitrites sont des composés **toxiques pour** la faune aquatique et peuvent favoriser l'eutrophisation. Leur réduction renforce donc la protection de l'environnement.

En conclusion :

Ce résultat confirme que l'électrolyse microbienne est une méthode prometteuse pour le traitement des eaux usées, même lorsque les concentrations en polluants sont faibles. Elle permet d'optimiser la qualité de l'eau au-delà des exigences réglementaires, ce qui est un avantage en matière de gestion durable des ressources en eau.

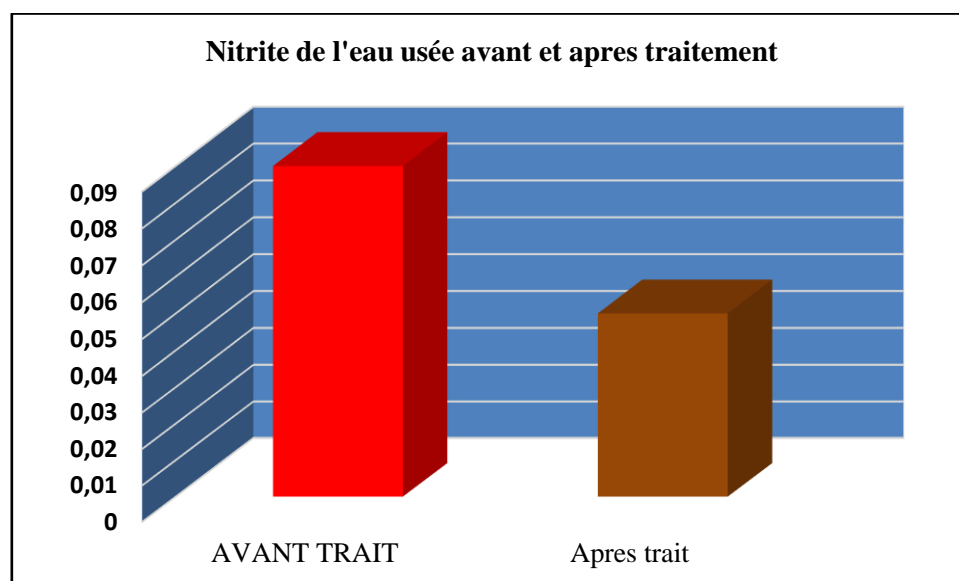


Figure.IV.10. Nitrite de l'eau usée avant et après traitement

IV.3.10. L'analyse bactériologique des eaux usées après traitement :

IV.3.10.1. Coliforme fécaux à 44°C

Les concentrations en coliformes fécaux à 44 °C dans des eaux usées après traitement par électrolyse microbienne, pour différentes dilutions. Sont les suivantes :

- ✓ Dilution 10^{-1} : 750 UFC/mL
- ✓ Dilution 10^{-2} : 155 UFC/mL
- ✓ Dilution 10^{-3} : 68 UFC/mL

On note une réduction nette du nombre de coliformes fécaux après traitement, ce qui montre que l'électrolyse microbienne a un effet désinfectant, bien qu'il ne soit pas total voir

Tableau.IV.3

Tableau.IV.3. Résultats de dénombrement de coliformes fécaux à 44 °C avant et après traitement

Dilution	Avant traitement (UFC/mL)	Après traitement (UFC/mL)	Réduction approximative
10^{-1}	>1000	750	>25 %
10^{-2}	340	155	~54 %
10^{-3}	107	68	~36 %

La réduction la plus forte est observée à 10^{-2} . Cela peut s'expliquer par la capacité du traitement à agir plus efficacement à des concentrations intermédiaires, où les microorganismes ne sont ni trop concentrés ni trop dilués. Les coliformes fécaux restent présents en quantité significative après traitement. Cela signifie que l'électrolyse microbienne seule ne permet pas une désinfection complète et pourrait nécessiter une étape complémentaire. L'efficacité ne montre pas une réduction exponentielle forte, ce qui est souvent recherché pour une désinfection (réduction de 90 % ou plus).

En conclusion

Le traitement par électrolyse microbienne permet une réduction partielle des coliformes fécaux, mais n'est pas suffisant à lui seul pour atteindre des seuils sanitaires acceptables selon les normes de rejet ou de réutilisation des eaux usées.

IV.3.10.2. Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C

L'évolution de la **Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C** dans les **eaux usées après traitement par électrolyse microbienne**, en fonction de différentes dilutions est la suivante :

- ✓ **Dilution 10^{-1}** : Inacceptable → Encore trop contaminée à faible dilution
- ✓ **Dilution 10^{-2}** : Chargé → Réduction de la charge mais reste importante
- ✓ **Dilution 10^{-3}** : Plus chargé → Indique que la charge diminue plus lentement qu'attendu
- ✓ **Dilution 10^{-4}** : 43 UFC/mL → Fortement réduite (acceptable pour certains usages)

En conclusion : Le traitement par électrolyse microbienne a permis une réduction significative de la charge bactérienne (de 10^8 à 43 UFC/mL à 10^{-4}), mais l'efficacité reste limitée aux fortes dilutions. Aux dilutions plus faibles (10^{-1} et 10^{-2}), la charge bactérienne reste problématique. Il serait utile d'optimiser les paramètres du procédé électrolytique (durée, intensité, électrodes, pH, etc.) pour améliorer la désinfection.

Le tableau.IV.4. Résultats de la Flore Totale Aérobie Mésophile (FTAM) à 22 °C avant et après traitement

Dilution	Avant traitement (UFC/ml ou appréciation)	Après traitement (UFC/ml ou appréciation)
10^{-1}	Très chargé	Inacceptable
10^{-2}	Chargé	Chargé
10^{-3}	Inacceptable	Plus chargé
10^{-4}	10^8 UFC/mL	43 UFC/mL

IV.3.10.3. Coliforme totaux à 37°C

Ces résultats montrent l'évolution de la **charge en coliformes totaux à 37°C** dans les eaux usées **avant et après un traitement par électrolyse microbienne**. Voici une **analyse commentée et structurée** de ces résultats :

- ✓ **Dilution 10^{-1}** : Très chargée
- ✓ **Dilution 10^{-2}** : Chargée
- ✓ **Dilution 10^{-3}** : 90 UFC/mL
- ✓ **Dilution 10^{-4}** : Faible

À dilution 10^{-3} , on passe de **160 UFC/mL à 90 UFC/mL**, soit une **réduction de 43,75%**, ce qui montre une **efficacité partielle** du traitement. Le niveau « faible » observé à 10^{-4} reste inchangé, ce qui suggère que le traitement a permis de réduire les concentrations en coliformes dans les dilutions les plus faibles. Les niveaux « très chargé » à 10^{-1} et « chargé » à 10^{-2} restent les mêmes, ce qui signifie que **la charge microbienne reste importante** dans les échantillons peu dilués. Cela suggère que **le traitement n'a pas été suffisant** pour éliminer une grande partie des coliformes dans les concentrations initiales élevées.

En conclusion :

Le traitement par **électrolyse microbienne** a permis une **réduction modérée** des coliformes totaux, particulièrement observable à la dilution 10^{-3} . Toutefois, la **charge bactérienne reste élevée** aux faibles dilutions, indiquant que :

- Soit le **temps de traitement** ou l'**intensité du procédé** est insuffisant,
- Soit le **système n'est pas totalement optimisé** pour les charges microbiennes très élevées.

IV.4. Suivi du comportement électrochimique des microorganismes

Pour aborder le sujet, nous nous sommes particulièrement intéressées à la méthode de suivi du comportement électrochimique des microorganismes. Après le montage de l'électrolyseur microbienne, nous avons alors choisi l'utilisation d'un multimètre qui mesure le courant entre les électrodes en cuivre et détermine ainsi la différence du potentiel, ce dernier reflète la circulation des électrons libérés suite aux différentes réactions Biochimiques élaborées par les cellules bactériennes.

Les mesures des courants électriques ont été alors réalisées sur cinq jours et les résultats sont décrits dans les tableaux suivants :

Tableau.IV.5. Résultat du suivi du courant électrique sur cinq jours

Temps (min)	Courant mesuré (A)
0	0.022
5	0.094
10	0.1
15	0.12
60	0.13
1440	0.023
2880	0.022
4320	0.022
5760	0.022
7200	0.022

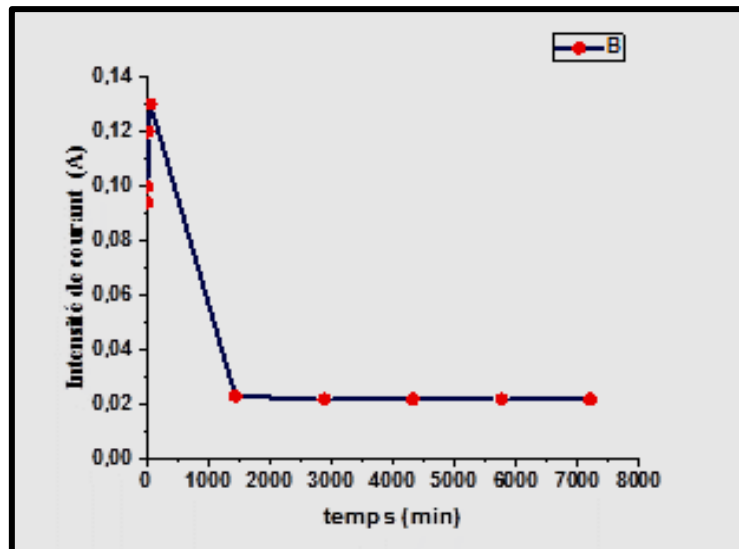


Figure.IV.11. Variation de l'intensité du courant en fonction du temps pour un électrolyseur microbienne

Les résultats obtenus (Figure.IV.11) montrent un certain comportement dynamique du courant électrique mesuré entre les électrodes au fil du temps. Au début de l'expérience, le courant mesuré augmente de manière assez rapide, passant de **0.022 A à 0.12 A** entre 0 et 15 minutes. Cette phase peut être expliquée par une réponse rapide des cellules bactériennes à l'activation initiale du système. Lors de cette phase, les bactéries commencent à se métaboliser et à libérer des électrons via leurs processus biochimiques, ce qui entraîne l'augmentation du courant électrique. Cette variation rapide peut aussi refléter un ajustement des bactéries aux conditions expérimentales ou à la formation de biofilm sur les électrodes, ce qui facilite le transfert d'électrons.

Entre **15 et 60 minutes**, le courant semble se stabiliser autour de **0.13 A**. Ce plateau pourrait indiquer un état d'équilibre où la production d'électrons (oxydation) par les bactéries s'est stabilisée. Il est aussi possible que le biofilm ait atteint une certaine épaisseur, ce qui optimise le transfert d'électrons entre les bactéries et les électrodes.

À partir de **1440 minutes (24 heures)**, le courant chute progressivement pour atteindre des valeurs stables autour de **0.022 A** entre 1440 min et 7200 min (c'est-à-dire après 1 à 5 jours).

Cette chute du courant pourrait indiquer un certain épuisement des ressources nutritives ou une inhibition de l'activité des bactéries (par exemple, en raison de la formation d'un biofilm trop épais, de la perte de substrat, ou de conditions non optimales dans le milieu). Le courant faible observé dans cette phase suggère que les réactions biochimiques sont moins intenses ou moins efficaces, ce qui entraîne une réduction du flux d'électrons.

La tendance générale pourrait être interprétée comme suit :

- ✓ **Phase d'activation** : La montée rapide du courant au début est liée à une forte activité bactérienne, où les électrons sont libérés rapidement.
- ✓ **Phase de stabilisation** : Les bactéries atteignent un état d'équilibre où leur activité est constante, ce qui se traduit par un courant relativement stable.
- ✓ **Phase de déclin** : Une fois le système bien établi, des facteurs comme la saturation du biofilm, la consommation des ressources ou des modifications des conditions environnementales (pH, température, concentration en substrat) pourraient limiter l'activité bactérienne, ce qui entraîne une baisse du courant.

En conclusion

Ces résultats montrent qu'après une phase d'adaptation initiale, l'activité bactérienne (et donc la production d'électrons, c'est-à-dire de s'oxydé) est initialement intense, mais se stabilise avant de diminuer progressivement à mesure que les conditions expérimentales évoluent. La stagnation du courant à un faible niveau (0.022 A) suggère qu'à long terme, les bactéries ne parviennent plus à maintenir une production d'électrons soutenue.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il serait intéressant d'examiner d'autres paramètres comme la concentration en substrat, l'état du biofilm, ou même d'éventuelles variations dans la composition du milieu de culture.

IV.5. Production de l'hydrogène vert par la technologie électro microbienne

L'utilisation de la cellule d'électrolyse microbienne (CEM) comme technologie innovante pour le traitement des eaux usées et la production d'hydrogène, tout en abordant les enjeux énergétiques liés à cette problématique. La cellule d'électrolyse microbienne (CEM) est une technologie qui permet de traiter les eaux usées tout en produisant de l'hydrogène, un vecteur énergétique prometteur. Contrairement aux méthodes d'électrolyse conventionnelles qui nécessitent une grande quantité d'énergie pour séparer l'hydrogène de l'eau, les CEM fonctionnent à une température plus basse et utilisent des processus biologiques pour réduire la charge polluante de l'eau tout en générant de l'hydrogène. Cela permet d'obtenir une production d'hydrogène à coût énergétique beaucoup plus faible, ce qui rend cette technologie particulièrement attrayante dans un contexte de transition énergétique. La croissance démographique entraîne effectivement une production accrue d'eaux usées. Dans les pays industrialisés, le traitement des eaux usées représente une part significative de la consommation énergétique, entre 1 et 4%. Ce chiffre peut sembler faible en apparence, mais il représente

néanmoins une grande quantité d'énergie, en particulier dans les zones à forte densité de population.

L'énergie contenue dans l'eau usée sous forme de matière organique serait équivalente à 10 fois l'énergie nécessaire à son traitement. Cela montre un potentiel énorme pour la valorisation énergétique des eaux usées. En d'autres termes, si cette énergie contenue dans la matière organique était correctement exploitée, cela pourrait contribuer non seulement à réduire les coûts énergétiques associés au traitement des eaux usées, mais également à fournir une source d'énergie renouvelable.

La CEM semble être une technologie clé dans ce contexte. En extrayant de l'hydrogène à partir des matières organiques présentes dans les eaux usées, on pourrait créer une boucle fermée dans laquelle l'énergie contenue dans l'eau usée est utilisée pour traiter l'eau et produire de l'hydrogène, sans nécessiter des quantités massives d'énergie provenant de sources externes.

L'optimisation du traitement des eaux usées tout en générant de l'hydrogène pourrait avoir un double impact positif :

- ✓ Réduction de l'empreinte carbone en diminuant les besoins énergétiques pour le traitement des eaux usées.

- ✓ Valorisation des ressources renouvelables en transformant la matière organique en une forme d'énergie propre et potentiellement durable.

Dans ce travail, nous avons exploré une voie prometteuse pour la production durable d'énergie : **l'électrolyse microbienne pour la génération d'hydrogène vert**, en utilisant des bactéries électroactives. Cette technologie repose sur la capacité de certains micro-organismes à transférer des électrons vers une électrode, ce qui permet de produire de l'électricité et, dans un second temps, de l'hydrogène par réduction de protons au niveau de la cathode.

L'utilisation d'**eaux usées brutes issues de la STEP de Bordj Bou Arreridj (BBA)** comme substrat représente un double avantage :

- 1. Valorisation d'un déchet organique,**

- 2. Réduction du coût global du procédé,** car aucun substrat pur ou coûteux n'est nécessaire.

Ce choix confère à l'étude une dimension **écologique et économique** importante.

La cellule en U permet de séparer l'anode (où les bactéries oxydent la matière organique) de la cathode (où l'hydrogène est produit), tout en permettant le transfert d'électrons à travers un circuit externe. Cela favorise un bon contrôle des paramètres et un meilleur rendement de conversion.

Le suivi de la production d'hydrogène en fonction du temps permet de :

- Caractériser l'activité des bactéries électro actives,
- Identifier les phases de croissance microbienne,
- Relier la production d'électricité à la quantité de substrat consommé.

L'évolution simultanée de la **quantité d'électricité produite** et de **l'hydrogène généré** donne une idée du **rendement global du système**. On peut s'attendre à une corrélation directe entre la production d'électricité (par les bactéries) et la production d'hydrogène à la cathode, car ces deux phénomènes sont couplés électro chimiquement.

L'évolution de la quantité d'hydrogène produite au cours du temps est représenté dans le tableau suivant

Tableau. IV.5. Evolution de la quantité d'hydrogène produite au cours du temps (05 jours)

Temps (min)	Quantité d'hydrogène produite (ml)
0	0
05	0.1
10	0.1
15	0.1
60	0.1
1440	0.1
2880	0.1
4320	0.1
5760	0.1
7200	0.1

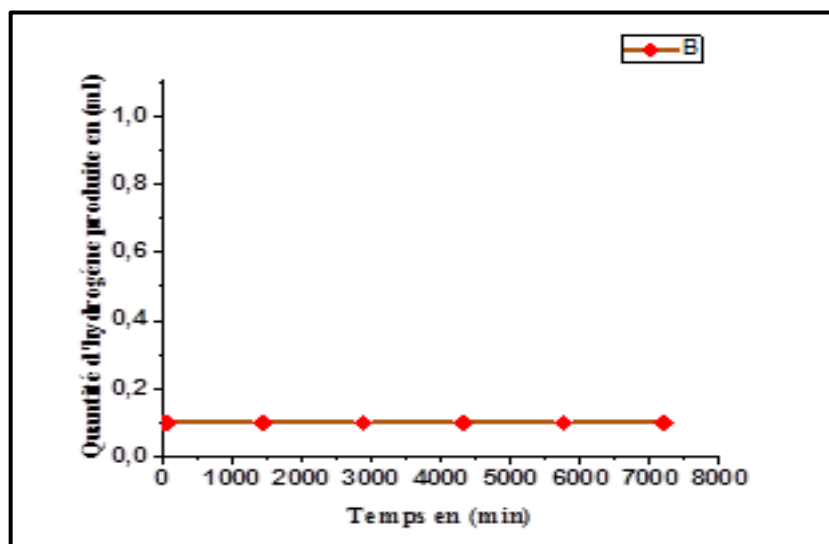


Figure. IV.12. Evolution de la quantité d'hydrogène produite au cours du temps (05 jours)

Les résultats présentés dans la **Figure.IV.12** montrent l'évolution de la production d'hydrogène au cours du temps, avec une production constante de 0.1 ml d'hydrogène à partir

de 5 minutes et jusqu'à la fin de l'expérience (7200 minutes, soit 5 jours). Cela pourrait être expliquée de la manière suivante :

- **Phase de stabilisation** : Après l'initialisation de la réaction (où des processus de croissance microbienne et de transfert d'électrons sont établis), la production d'hydrogène semble se stabiliser. Cela peut être dû à une limitation dans l'activité des bactéries électro actives ou à la consommation complète de la matière organique présente dans le substrat.

- **Limitation du substrat** : Si la production d'hydrogène se stabilise après un certain temps, cela pourrait suggérer que la matière organique présente dans les eaux usées est presque entièrement utilisée par les bactéries électro actives. Une fois cette matière consommée, la production d'hydrogène reste constante, car les bactéries ne disposent plus de substrat pour maintenir une activité métabolique accrue.

- **Réaction d'électrolyse** : Une autre possibilité pourrait être que les conditions expérimentales ne permettent pas de maintenir une production continue d'hydrogène au-delà de ce seuil (par exemple, la tension appliquée, la surface de l'électrode, ou d'autres paramètres de la cellule).

Le fait que la production d'hydrogène reste stable pourrait également être le signe que les bactéries électroactives ont atteint un niveau d'équilibre métabolique où elles continuent de produire des électrons pour la réduction des protons à la cathode, mais de manière limitée. Cela suggère qu'aucun facteur externe ne semble affecter négativement leur capacité à produire de l'électricité (et donc de l'hydrogène).

Optimisation et améliorations possibles

Les résultats montrent une production relativement faible et constante sur une période prolongée. Pour améliorer ce système, plusieurs approches peuvent être envisagées :

- **Augmenter la concentration en substrat** : Si la quantité de matière organique dans les eaux usées est faible, il pourrait être utile de tester des concentrations plus élevées ou de pré-traiter les eaux usées pour concentrer certains nutriments.

- **Optimiser les conditions de croissance bactérienne** : Les conditions comme le pH, la température, et l'oxygénation peuvent influencer l'activité des bactéries électroactives. Il pourrait être utile d'ajuster ces paramètres pour stimuler une plus grande production d'hydrogène.

- **Améliorer la surface des électrodes** : La géométrie et la surface des électrodes peuvent avoir un impact important sur la capacité des bactéries à transférer des électrons. Des électrodes plus efficaces pourraient améliorer la production.

En conclusion

En résumé, les résultats montrent une production stable mais faible d'hydrogène dans le système d'électrolyse microbienne, ce qui peut être interprété comme un signe de stabilisation du processus. Cependant, pour en faire une solution réellement viable à grande échelle, il serait nécessaire d'optimiser certains paramètres afin d'augmenter le rendement en hydrogène, tout en maintenant l'utilisation des eaux usées comme substrat, qui demeure une approche écologiquement et économiquement intéressante

Conclusion générale

Conclusion générale

La technologie d'électrolyse microbienne (Microbial Electrolysis Cell – MEC) se positionne aujourd'hui comme une solution novatrice à la croisée des enjeux environnementaux et énergétiques. En couplant la valorisation des eaux usées à la production d'hydrogène vert, elle offre une perspective doublement bénéfique : dépolluer tout en produisant une énergie propre et renouvelable.

Les avantages de cette approche sont significatifs. Elle permet, d'une part, de réduire la charge organique des effluents tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre, et d'autre part, de produire de l'hydrogène sans recourir à des sources fossiles, contrairement aux méthodes conventionnelles telles que le vaporeformage. Par ailleurs, le recours à la biomasse issue des eaux usées contribue à l'économie circulaire, tout en réduisant les besoins énergétiques du procédé grâce à l'activité électrogène des micro-organismes.

Cependant, cette technologie émergente présente encore plusieurs limitations qui freinent son industrialisation. Les rendements énergétiques restent modestes en conditions réelles, les matériaux utilisés (notamment les électrodes et les catalyseurs) sont encore coûteux, et la stabilité du système dépend fortement des conditions environnementales et de la robustesse des biofilms microbiens. Ces défis techniques et économiques nécessitent encore des efforts de recherche et d'optimisation.

Les résultats de notre travail sur la production d'hydrogène par les procédés électro microbiens montrent une production relativement faible et constante sur une période prolongée. Pour améliorer ce système, plusieurs approches peuvent être envisagées :

- **Augmenter la concentration en substrat** : Si la quantité de matière organique dans les eaux usées est faible, il pourrait être utile de tester des concentrations plus élevées ou de prétraiter les eaux usées pour concentrer certains nutriments.

- **Optimiser les conditions de croissance bactérienne** : Les conditions comme le pH, la température, et l'oxygénation peuvent influencer l'activité des bactéries électro actives. Il pourrait être utile d'ajuster ces paramètres pour stimuler une plus grande production d'hydrogène.

- **Améliorer la surface des électrodes** : La géométrie et la surface des électrodes peuvent avoir un impact important sur la capacité des bactéries à transférer des électrons. Des électrodes plus efficaces pourraient améliorer la production.

En conclusion, l'électrolyse microbienne constitue une voie prometteuse pour concilier traitement durable des eaux usées et production d'hydrogène vert. Avec des avancées continues

dans les domaines de la biotechnologie, des matériaux et de l'ingénierie des procédés, cette technologie pourrait, à moyen terme, s'imposer comme une alternative viable et durable pour répondre aux enjeux environnementaux et énergétiques de notre siècle.