



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie des Procédés et de l'Environnement

Centre de Développement des Énergies Renouvelables

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

**Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie des Procédés et de
L'Environnement**

Thème du mémoire :

**Etude expérimentale d'un procédé électrolytique pour la production d'hydrogène et la
dégradation de la matière organique**

Réalisé par :

HARRAR Hanane & MEZIANI Zineb

Présenté et soutenue publiquement le 30 juin 2026 devant le jury composé de :

Présidente	AROUA Sadjia	MCA	ENP
Examineur	KHERAT Mohamed	AR	ENP/CDER
Promotrice	LASSOUANE Fatiha	MRA	CDER
Co-Promotrice	DJELLOULI Naima	MCB	ENP

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



Département de Génie des Procédés et de l'Environnement

Centre de Développement des Énergies Renouvelables

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

**Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie des Procédés et de
L'Environnement**

Thème du mémoire :

**Etude expérimentale d'un procédé électrolytique pour la production d'hydrogène et la
dégradation de la matière organique**

Réalisé par :

HARRAR Hanane & MEZIANI Zineb

Présenté et soutenue publiquement le 30 juin 2026 devant le jury composé de :

Présidente	AROUA Sadjia	MCA	ENP
Examineur	KHERAT Mohamed	AR	ENP/CDER
Promotrice	LASSOUANE Fatiha	MRA	CDER
Co-Promotrice	DJELLOULI Naima	MCB	ENP

ملخص

تتناول هذه الدراسة معالجة مياه الصرف الصناعي الناتجة عن صناعة الألبان باستخدام التبخير الكهربائي الدفعي، مع تقييم إمكانية إنتاج الهيدروجين منها. وقد أدى تحسين معايير التشغيل (الأس الهيدروجيني 7، وكثافة التيار 62.5 مللي أمبير/سم²، والتركيز 2.5 غ/لتر، ومدة التحليل الكهربائي 50 دقيقة) إلى أداء متميز، حيث انخفضت نسبة الطلب الكيميائي للأكسجين بنسبة 70.37%، وانخفضت العكارة بنسبة 98.87%، وتم إنتاج 555 مل من الغاز. وتؤكد هذه النتائج أن هذه العملية حل واعد من ناحيتين، إذ تجمع بين المعالجة الفعالة لمياه الصرف الصناعي واستعادة الطاقة المستدامة.

الكلمات المفتاحية: التبخير الكهربائي، مخلفات الألبان، خفض الطلب الكيميائي للأكسجين، إزالة العكارة، الهيدروجين

Abstract:

This work investigates the treatment of synthetic dairy effluent by batch electrocoagulation, while also evaluating its hydrogen production potential. Optimization of the operating parameters (pH 7, current density 62.5 mA/cm², concentration 2.5 g/L, and 50 minutes of electrolysis) yielded remarkable performance, with a 70.37% COD reduction, a 98.87% turbidity reduction, and the generation of 555 mL of gas. These results confirm that this process is a doubly promising solution, combining efficient industrial wastewater treatment with sustainable energy recovery.

Keywords: Electrocoagulation, Dairy Effluent, COD Reduction, Turbidity Removal, Hydrogen

Résumé :

Ce travail étudie le traitement d'un effluent laitier synthétique par électrocoagulation en mode discontinu, tout en évaluant son potentiel de production d'hydrogène. L'optimisation des paramètres opératoires (pH à 7, densité de courant de 62,5 mA/cm², concentration de 2,5 g/L et 50 minutes d'électrolyse) a permis d'atteindre des performances remarquables, avec 70,37 % d'abattement de la DCO, 98,87 % de réduction de la turbidité et la génération de 555 mL de gaz. Ces résultats confirment que ce procédé est une solution doublement prometteuse, alliant une épuration industrielle efficace à une valorisation énergétique durable.

Mots-clés : Électrocoagulation, Effluent Laitier, Abattement de la DCO, élimination de la Turbidité, Hydrogène

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation et au succès de ce projet.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre vive reconnaissance et notre profond respect à notre promotrice, Madame Lassouane Fatiha, pour sa disponibilité constante, ses précieux conseils scientifiques, sa rigueur et son orientation tout au long de ce travail. Ses compétences et sa bienveillance ont été un guide inestimable pour mener à bien cette recherche.

Nous tenons également à remercier chaleureusement la cheffe de notre département, Madame Naima Djellouli, pour son soutien constant, son écoute et son dévouement au bon déroulement de notre cursus académique.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à Monsieur Mohammed Kherat, pour son précieux soutien, ses encouragements et l'intérêt particulier qu'il a manifesté à l'égard de notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame AROUA Sadjia, qui nous fait l'immense honneur de présider ce jury. Ses compétences scientifiques, sa rigueur académique et ses précieux conseils constituent un apport inestimable pour l'aboutissement et la valorisation de ce travail de fin d'études.

Nous adressons également nos vifs remerciements à toute l'équipe du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) pour leur accueil chaleureux, leur aide technique et pour nous avoir ouvert l'accès à leurs infrastructures expérimentales, ce qui a permis d'enrichir considérablement nos travaux.

Enfin, nous tenons à rendre un vibrant hommage à l'ensemble du corps enseignant de l'École Nationale Polytechnique, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée, leur rigueur académique et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours d'ingénieur.

Que tous ceux qui ont participé, par leurs discussions ou leurs encouragements, à la concrétisation de ce mémoire trouvent ici l'expression de notre parfaite considération.

إهداء :

إلى أمي وأبي، كل كلمات الشكر، وكل لغات العالم، لن تكفي لأوفيكما حقكما، أو لأعبر عن عظيم فضلكما عليّ. وإن كنتُ اليوم قد وصلتُ إلى هنا، فبفضل الله أولاً، ثم بفضلكما ودعائكما ومن أجلكما.

إلى أختي حنان، روحٌ من روحي، وإلى ياسين، قطعةٌ من قلبي.

إلى أخويّ أيمن ومكرم، سندي الذي لا يميل.

إلى خالتي رزيقة وخالتي سعيدة، امتدادٌ للحب بعد أمي، وإلى أبنائهما الذين شاركوني أجمل الذكريات.

إلى جدّي وجدتي، حفظهما الله وأطال في عمرهما.

وإلى كل من كان له أثرٌ جميل في رحلتي، ولم تسعفني الكلمات لذكره، أهدي هذا العمل عرفانًا وامتنانًا، وفاءً لكل يدٍ امتدت بالعون، ولكل قلبٍ منحني الدعم.

Zineb

Dédicaces

Avant toute chose, je remercie Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la patience et la volonté d'accomplir ce travail.

Je dédie ce travail :

À ma chère maman, la source de ma tendresse, sans qui je ne serais jamais arrivée à cette étape. Ce succès est le fruit de tes efforts autant que des miens.

À mon cher papa, ma force et mon repère. Grâce à toi, mon chemin est devenu plus facile et plus clair. Merci d'avoir enduré les fatigues de la vie sans jamais te plaindre pour tout nous offrir et nous assurer le meilleur.

À mon cher fiancé, pour son soutien et ses encouragements continus. Cette réussite n'est que le début d'un beau chemin ensemble.

À ma sœur Douaa et mes deux frères Oussama et Anis, mes compagnons de toujours, pour leur amour et leur présence.

À toute ma famille, en particulier à mes adorées tantes maternelles, pour leur soutien précieux.

À mes amis et à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce parcours, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Hanane

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux 7	
Liste des figures :8	
Liste des abréviations	
Liste des Symboles10	
Introduction	11
Chapitre 1 : Généralités.....	14
I.1. Généralités sur les eaux usées de l'industrie laitière.....	15
I.1.1. L'eau et la pollution hydrique	15
I.1.2. Pollution organique des effluents industriels.....	16
I.1.2.1 Origine domestique	16
I.1.2.2 Origine agricole	16
I.1.2.3 Origine industrielle	16
I.1.3. Généralités sur l'industrie laitière.....	17
I.1.3.1. L'industrie laitière en Algérie.....	17
I. 1.3.2. Composition des effluents laitiers.....	17
I. 1.3.3. Source des effluents laitiers	18
I.1.3.4. Caractéristiques physico-chimiques des effluents laitiers	19
I. 1.3.5.Impact environnemental des rejets laitiers.....	20
a) Impact sur les eaux	20
b) Impact sur les sols	21
c) Impact sur l'air	21
d) Impact sur la biodiversité	21
I. 1.3.6. Normes des rejets des effluents liquides industriels	21
a) Normes internationales	21
b) Norme algérienne	22
I. 1.3.7. Procédés de traitement des eaux usées laitières	23
a)Procédés physico-chimiques	23
b) Procédés biologiques.....	23
c) Procédés électrochimiques	24
I.2. Procédé d'électrocoagulation pour le traitement des effluents	25
I.2.1. Principe de l'électrocoagulation	25
I.2.2. Mécanismes réactionnels de l'électrocoagulation	26
I.2.3 Les particules colloïdales et le potentiel zêta :	27
I.2.3.1 Les colloïdes hydrophiles :	27
I.2.3.2 Les colloïdes hydrophobes :	28
I.2.4. Matériaux et modes de branchement des électrodes:	29
I.2.5. Paramètres influençant l'électrocoagulation :	30
I.2.5.1. Intensité et densité de courant :	30
I.2.5.2. Nature et configuration des électrodes :	30
I.2.5.7. Température :	33
I.2.5.8. Temps d'électrolyse :	33
I.2.6. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation	33
I.2.7. Application du procédé d'électrocoagulation :	35
I.2.7.1. Traitement des eaux chargées en huiles et graisses	35
I.2.7.2. Traitement de l'eau potable et des composés inorganiques.....	35
I.2.7.3. Élimination des métaux lourds.....	35
I.2.7.4. Traitement des eaux usées urbaines et industrielles	35
I.3.1. Caractéristiques de l'hydrogène	37
I.3.2.Classification des types d'hydrogène par couleur	38

I.3.3. Procédés de production d'hydrogène	40
a) Procédés conventionnels	40
b) Procédés en voie de développement	40
I.3.4. Synthèse de quelques travaux sur l'électrocoagulation appliquée à l'élimination des polluants et à la production	41
Chapitre 2 : Matériels	44
II.1. Préparation de l'effluent synthétique	45
II.2. Caractérisation de l'effluent synthétique	46
II.2.1. Principe de l'analyse de la demande chimique en oxygène	48
II. 3. Description du montage expérimental	49
II.3.1. Réacteur électrochimique	49
II.3.2. Électrodes utilisées	49
II.3.3. Générateur de courant	50
II.3.4. Systèmes de prélèvement (liquides et gaz)	50
II.4.Démarche expérimentale	50
II.4.1.Préparation des électrodes	50
II.4.2.Déroulement des essais	50
II.4.3.Étude de l'effet des paramètres physico-chimiques sur la performance du procédé	51
a. Taux d'abattement de la DCO (%)	51
b. Réduction de la turbidité (%)	51
c. La clarification de la solution est suivie par le taux de réduction de la turbidité :	51
c. Perte en masse de l'anode.....	51
d. Volume de dihydrogène produit (ml)	52
Chapitre 3 : Résultats et discussions	54
III.1. Caractérisation physico-chimique de l'effluent simulé avant le traitement par électrocoagulation.....	55
III.2 Étude de l'effet des paramètres opératoires influençant le taux d'abattement et la turbidité.....	57
III.2.1 Effet du pH initial	57
III.2.1.2 Variation du pH après traitement.....	60
III.2.2 Effet du temps d'électrolyse	61
III.2.3 Effet de la densité du courant.....	63
III .2.4. Effet de la concentration en poudre du lait	64
III.2.5. Caractéristiques de l'effluent laitier traité par électrocoagulation dans les conditions opératoires optimales.....	67
III.3 Masse dissoute de l'anode sacrificielle	68
III.4 Effet des paramètres opératoires sur la production du gaz par électrocoagulation	69
III.4.1. Effet du pH.....	69
III.4.2. Effet de la densité du courant.....	71
III.4.3. Effet de la concentration du polluant	72
III.4.4. Évolution du gaz en fonction du temps dans les conditions optimales.....	73
III.4.6. Estimation théorique de la quantité d'hydrogène produite	74
III.5 Calcul de la consommation énergétique	75
Conclusion générale	76
ANNEXES	78
Références	80

Liste des tableaux :

Tableau 1, Caractéristiques physico-chimiques générales des effluents laitiers [12,13].	20
Tableau 2, Normes internationales (OMS)	22
Tableau 3, valeurs limitées maximales des paramètres de rejet des installations de déversement industrielles	23
Tableau 4, Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation	34
Tableau 5, Synthèse des principales applications de l'EC recensées dans la littérature [41]	36
Tableau 6, Principales propriétés physico-chimiques de l'hydrogène (H ₂) [45,46].	37
Tableau 7, Classification de l'hydrogène selon son mode de production [49]	39
Tableau 8, Synthèse des études portant sur la production et la récupération de l'H ₂ par EC.	42
Tableau 9, composition de l'effluent laitier synthétique étudié.	46
Tableau 10, Récapitulatif du matériel de caractérisation utilisé.	47
Tableau 11, Caractéristiques physico-chimiques initiales de l'effluent synthétique	56
Tableau 12, La DCO initiale pour chaque masse de poudre de lait.	64
Tableau 13, Caractéristiques de l'effluent avant et après traitement.	67
Tableau 14, la quantité de matière et du volume d'hydrogène	74

Liste des figures :

Figure 1, Les différentes sources d'effluents laitiers	18
Figure 2, Schéma sur le principe de l'EC.	26
Figure 3, Double couche et potentiel zêta [12].	28
Figure 4, mode de branchement, a) monopolaire simple, b) monopolaire en série, c) bipolaire [10]	30
Figure 5, Dispositif expérimental.....	49
Figure 6, Abattement de la DCO en fonction du pH initial	58
Figure 7, Taux d'élimination de la turbidité en fonction du pH initial.....	59
Figure 8, Variation du pH de l'effluent avant et après traitement	60
Figure 9, Etat de la cathode après traitement à pH=11.	61
Figure 10, Cinétique d'évolution de la DCO en fonction du temps.	62
Figure 11, Variation de l'abattement de la DCO en fonction de la densité de courant (J).	63
Figure 12, Taux d'élimination de la turbidité en fonction de la densité du courant (J).	64
Figure 13, Effet de la masse de poudre sur l'abattement de la DCO.....	65
Figure 14, Effet de la masse de poudre sur l'élimination de la turbidité.	66
Figure 15, Comparaison de l'effluent brut et de l'effluent traité.	68
Figure 16, Comparaison entre la masse théorique et expérimentale de l'anode dissoute en fonction de la densité du courant.....	68
Figure 17, Effet du pH initial sur la production du gaz.....	70
Figure 18, Effet de la densité de courant sur la production du gaz	71
Figure 19, Effet de la concentration en poudre de lait sur la production du gaz.....	72
Figure 20, Evolution du gaz en fonction du temps	73
Figure 21, Consommation énergétique en fonction de la densité de courant	75
Figure 22, Courbe d'étalonnage de la DCO.	79

Liste des abréviations :

CA : courant alternatif.

CC : courant continu.

CCS: Carbon Capture and Storage.

CG : Chromatographie en phase gazeuse.

CNT : Conditions Normales de Température et de Pression (0 °C, 1 atm).

DBO : la demande biochimique d'oxygène.

DBO5 : la demande biochimique d'oxygène mesurée dans 5 jours.

DO : L'oxygène dissous.

EC : électrocoagulation.

EF : électroflottation.

EO : électro-oxydation.

MES : matières en suspension.

pH : potentiel d'hydrogène.

POA : procédés d'oxydation avancés.

Rpm : Rotations par minute

SMR : Steam Methane Reforming.

T°: température.

TDS : solides dissous totaux.

Liste des Symboles

Symbole	Désignation	Unité
D	Distance inter-électrodes	mm
E	Consommation énergétique	kWh/m ³
g/L	Gramme par litre (concentration)	g/L
I	Intensité du courant	A
J	Densité de courant	mA/cm ²
mA	Milliampère	mA
S	Surface des électrodes	cm ²
T	Température	°C
T	Turbidité	NTU
T	Temps d'électrolyse	min
U	Tension électrique	V
V	Volume de solution traitée	mL ou L
Σ	Conductivité électrique	μS/cm

Introduction

L'industrialisation joue un rôle majeur dans le développement d'un pays, mais elle engendre de graves problèmes de pollution à l'échelle mondiale. Cette pollution entraîne une dégradation significative des milieux aquatiques, compromettant la stabilité des écosystèmes ainsi que la disponibilité de l'eau potable [5]. De plus, l'épuisement progressif des réserves de combustibles fossiles et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre représentent des obstacles majeurs à la durabilité des systèmes énergétiques et environnementaux mondiaux[1].

Dans ce contexte, l'hydrogène apparaît comme un excellent vecteur énergétique respectueux de l'environnement, propre et durable. Il est considéré comme une alternative renouvelable et viable, en raison de sa haute valeur énergétique (122 kJ/g). Contrairement aux batteries, l'hydrogène offre une solution de stockage à long terme et une stabilité pour les réseaux énergétiques [3]. Afin d'assurer une production durable, la valorisation des effluents liquides industriels comme matière première pour la production d'hydrogène suscite un intérêt croissant.

Cependant, la production conventionnelle d'hydrogène par électrolyse requiert une eau de très haute pureté, ce qui met en évidence une contrainte environnementale majeure. Dans des pays à climat aride comme l'Algérie, la disponibilité en eau est fortement limitée, avec une ressource hydrique estimée à environ 500 m³ par habitant et par an, bien en dessous du seuil de pénurie défini au niveau international. Cette situation est aggravée par l'épuisement progressif des nappes phréatiques, ce qui rend la réutilisation des eaux usées indispensable pour des secteurs stratégiques tels que l'agriculture et l'industrie [2,4].

Parmi les secteurs industriels fortement polluants et grands consommateurs d'eau figure l'industrie agroalimentaire, notamment l'industrie laitière. Cette dernière nécessite d'importants volumes d'eau pour les opérations de nettoyage, de pasteurisation et de production de vapeur, entraînant ainsi la génération d'effluents riches en matières organiques et en nutriments, susceptibles d'avoir un impact environnemental significatif lorsqu'ils sont rejetés sans traitement adéquat [10].

Face à cette problématique, les technologies électrochimiques ont suscité un intérêt croissant pour le traitement des eaux usées. Parmi elles, l'électrocoagulation (EC) constitue une technologie particulièrement attractive grâce à sa simplicité de mise en œuvre, sa fiabilité et son faible coût d'exploitation. De plus, la production simultanée d'hydrogène au niveau de la cathode renforce son potentiel en tant que procédé intégré de dépollution et de valorisation énergétique des effluents. Ce procédé présente une complexité notable, car il implique divers

mécanismes chimiques et physiques et fait appel à des électrodes consommables, généralement constituées de fer (Fe) ou d'aluminium (Al) . Son fonctionnement repose sur la dissolution d'une anode sacrificielle immergée dans l'effluent liquide, générant in situ des ions métalliques qui agissent comme coagulants. Au cours des dernières années, de nombreux travaux de recherche ont démontré la faisabilité de la production d'hydrogène à partir de déchets liquides servant de sources d'énergie, en utilisant le procédé d'électrocoagulation [59,60].

Par conséquent, l'objectif principal de cette étude est d'examiner les performances du procédé d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées de l'industrie laitière, tout en évaluant son potentiel de production et de récupération concomitantes d'hydrogène.

Ce mémoire est organisé en plusieurs sections structurées. Le premier chapitre propose une synthèse bibliographique structurée en trois parties, qui examinent respectivement les généralités sur les eaux usées de l'industrie laitière, le procédé d'électrocoagulation pour le traitement des effluents, ainsi que la production d'hydrogène par procédé électrochimique. Le deuxième chapitre, dédié au matériel et aux méthodes, décrit en détail les techniques de caractérisation des effluents, la démarche expérimentale élaborée pour optimiser le procédé d'électrocoagulation, ainsi que les équipements utilisés. La troisième partie est consacrée à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, en mettant en évidence les performances du procédé en matière de dépollution et de production d'hydrogène. Enfin, la conclusion générale récapitule les principaux résultats de cette étude, souligne ses contributions scientifiques et techniques, et propose des perspectives d'amélioration.

Chapitre 1 :

Généralités

I.1. Généralités sur les eaux usées de l'industrie laitière

L'industrie laitière constitue l'un des secteurs les plus importants de l'industrie agroalimentaire, tant à l'échelle mondiale qu'en Algérie. En raison de sa forte consommation d'eau lors des opérations de transformation et de nettoyage, elle génère d'importantes quantités d'effluents liquides caractérisés par une charge organique élevée. Le rejet de ces effluents sans traitement approprié peut entraîner des conséquences néfastes sur les milieux récepteurs et les ressources en eau.

Dans ce contexte, ce chapitre présente des généralités sur les eaux usées industrielles et la pollution hydrique, puis s'intéresse particulièrement aux effluents issus de l'industrie laitière. Les principales caractéristiques physico-chimiques de ces effluents, leurs impacts environnementaux, les normes réglementaires applicables ainsi que les différentes technologies de traitement utilisées pour leur épuration y sont également exposés.

I.1.1. L'eau et la pollution hydrique

L'eau est l'élément le plus précieux de la biosphère. Elle circule entre trois grands réservoirs : l'hydrosphère, l'atmosphère et la lithosphère. Elle couvre ainsi environ 71 % de notre planète et constitue 60 % du corps humain, ce qui la rend omniprésente [4]. C'est pourquoi il est essentiel de la préserver afin de protéger la santé humaine et les écosystèmes.

La consommation de cette ressource en Algérie augmente de plus en plus en raison de la croissance démographique, qui a été multipliée par 4,5 depuis l'indépendance [5], et avec la diminution de la pluviométrie, l'Algérie fait face à un stress hydrique, d'où vient la nécessité de la dépollution et de la valorisation des déchets issus des activités industrielles.

La pollution de l'eau est un mélange de substances qui affectent directement ou indirectement la nature de l'eau et, par conséquent, son usage légitime. Le type dépend de la nature des rejets, ce qui permet de distinguer plusieurs catégories de pollution :

- **La pollution physique** : causée par les petites particules solides qui flottent ou restent en suspension (MES), d'origine organique, telles que les débris végétaux ou minérale, comme le sable et la poussière. Ces particules sont responsables de la turbidité, ainsi que des modifications de l'odeur et du goût de l'eau.
- **La pollution thermique** : provoquée par les rejets d'eaux industrielles à haute température, entraînant un réchauffement du milieu aquatique. Cette élévation de température réduit l'oxygène dissous et menace la faune et la flore.

- **La pollution biologique** : caractérisée par la présence de bactéries pathogènes et de virus, responsable d'infections chez l'être humain.
- **La pollution radioactive** : issue des activités nucléaires, elle implique la présence de substances radioactives toxiques pouvant être absorbées par les organismes vivants et provoquer des maladies génétiques. Par exemple, le radium possède un effet cancérogène et peut causer le cancer des os.
- **La pollution chimique**: elle résulte de la présence de composés inorganiques, tels que des métaux toxiques (plomb, mercure, cadmium), des métaux non toxiques (sodium, magnésium), sels dissous, des acides, des engrais, des pesticides, ainsi que de matières organiques dissoutes dans l'eau [6].

I.1.2. Pollution organique des effluents industriels

Les polluants organiques représentent une part significative de la pollution chimique. Il est donc essentiel d'identifier leurs principales sources.

I.1.2.1 Origine domestique

Les eaux usées domestiques sont générées par des activités courantes telles que le nettoyage, la vaisselle, les résidus de toilettes et les restes alimentaires. Ces eaux contiennent des polluants susceptibles de contaminer l'eau et de présenter un risque pour la santé et l'environnement.

I.1.2.2 Origine agricole

Les eaux usées d'origine agricole proviennent ruissellement des eaux, les systèmes d'irrigation, et des élevages animaux. Elles sont généralement riches en substances organiques et en azote.

I.1.2.3 Origine industrielle

Les déchets issus des usines et des sites de production constituent une source majeure d'effluents industriels. Lorsqu'ils sont déversés dans les lacs et rivières, ces effluents peuvent polluer les écosystèmes marins et entraîner l'asphyxie de la faune aquatique.

Parmi les secteurs industriels générateurs d'eau polluée, on peut citer l'industrie du textile qui génère des eaux fortement colorées [7], l'industrie pharmaceutique et cosmétique, ainsi que l'industrie papetière.

Cependant, le secteur agroalimentaire demeure le principal producteur d'eaux usées riches en substances organiques biodégradables, notamment dans la production laitière.

I.1.3. Généralités sur l'industrie laitière

I.1.3.1. L'industrie laitière en Algérie

Le secteur laitier constitue un domaine agroalimentaire stratégique, dont la régulation est assurée par l'Office national interprofessionnel du lait (ONIL) et la réorganisation est encadrée par le comité interprofessionnel du lait (CIL).

Le secteur privé domine, avec 52 laiteries privées contre 19 laiteries publiques. Malgré cette présence, l'Algérie n'a pas atteint l'autosuffisance sur le marché local, ce qui justifie l'intervention de l'OINL dans l'importation de la matière première [11].

La filière s'organise autour de deux pôles principaux : L'amont et l'aval.

L'amont de la filière comprend principalement les acteurs responsables de la production et de l'importation des aliments du bétail, indispensables à l'élevage. On y retrouve des organismes tels que :

- L'office algérien interprofessionnel des céréales (OAIC)
- Les entreprises régionales des industries alimentaires et dérivées (ERIAD)
- L'Office national des aliments du bétail (ONAB)

L'aval de la filière regroupe les acteurs impliqués dans la production laitière, sa transformation et sa distribution, qui sont :

- **Les éleveurs**, spécialisés dans l'élevage de bovins laitiers.
- **Les transformateurs**, représentés par le secteur public (le groupe Giplait) et de nombreux laitiers privés.
- **Les importateurs**, avec l'Office national interprofessionnel du lait (ONIL) qui a remplacé l'ancienne filiale "Milk Trade" dans la gestion et le contrôle des importations de la matière première [10].

I. 1.3.2. Composition des effluents laitiers

L'eau constitue le principal composant du lait, représentant environ 900 g/L [8]. Les effluents laitiers se caractérisent par la présence de différentes phases en équilibre, notamment :

- **La phase aqueuse**: correspond à la phase dispersante continue, chimiquement stable contenant des molécules organiques (comme le lactose) ainsi que des ions minéraux (calcium, phosphore, etc.) à l'état dissous.
- **La suspension colloïdale et les caséines**: les caséines s'associent à des minéraux, tels que le phosphate de calcium $((\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3)$, pour former des micelles phosphocalciques chargées négativement dans le lait frais. Cette charge négative engendre une répulsion électrostatique entre les micelles, assurant ainsi la stabilité de la suspension en évitant leur agglomération. L'acidification ou l'ajout de cations

métalliques peut neutraliser ces charges, provoquant ainsi l'agglutination des micelles, phénomène connu sous le nom de coagulation.

- **L'émulsion lipidique** : la matière grasse se présente sous forme de globules gras, chacun constitué d'un cœur de glycérade entouré par une membrane lipoprotéique. Ces globules sont maintenus en émulsion en raison de leur charge négative et de leur enveloppe, qui crée des répulsions électrostatiques.
- **Les micro-organismes** : le lait contient des bactéries végétatives ou sporulées. Leur développement peut déstabiliser le milieu en produisant de l'acide lactique, ce qui abaisse le pH et neutralise les charges de micelles de caséines [10].

I. 1.3.3. Source des effluents laitiers

La composition des effluents laitiers varie en fonction du produit formé et des méthodes employées. Ils proviennent généralement des matières premières telles que le lactose, les protéines, les lipides, les sels minéraux, etc., ainsi que des produits utilisés lors du nettoyage, notamment la soude, l'acide phosphorique et l'acide nitrique.

Deux principales catégories de sources de pollution des effluents laitiers sont présentées dans la figure 1.

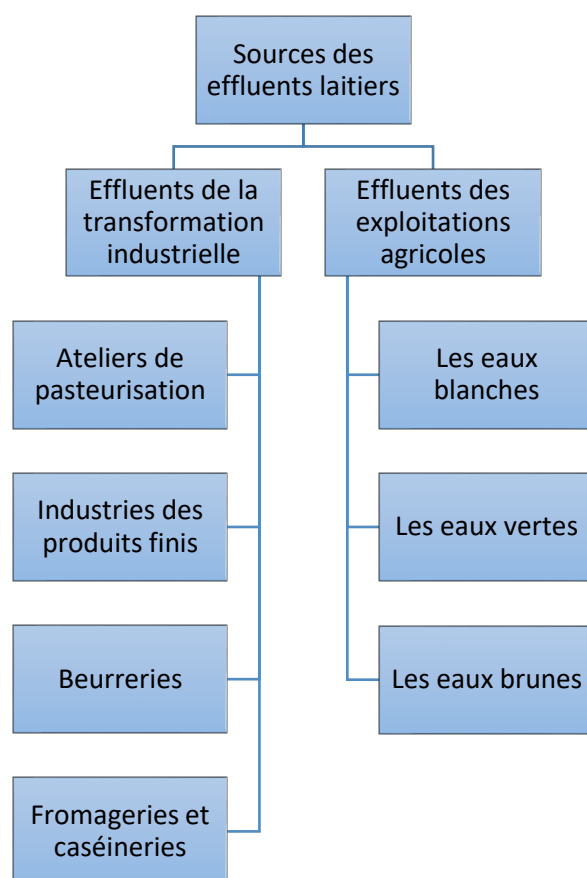


Figure 1, Les différentes sources d'effluents laitiers

Les effluents de l'industrie laitière proviennent principalement de deux sources : la transformation industrielle et les exploitations agricoles. Les unités de transformation génèrent différents types de rejets, notamment les eaux de lavage issues de la pasteurisation, les effluents riches en matières organiques des produits frais, le babeurre provenant des beurreries, ainsi que le lactosérum issu des fromageries et des caséineries. Par ailleurs, les exploitations agricoles produisent des eaux blanches, vertes et brunes, issues respectivement du nettoyage du matériel de traite, des déjections animales et de leur dilution par les eaux de pluie[10].

I.1.3.4. Caractéristiques physico-chimiques des effluents laitiers

Les effluents laitiers se distinguent par une haute teneur en matière organique, une présence notable d'huiles et de graisses, des niveaux élevés d'azote et de phosphore, ainsi que des variations importantes de pH liées principalement à l'utilisation de produits de nettoyage et de désinfection [12]. Le tableau 1 regroupe l'ensemble des paramètres physico-chimiques caractéristiques des effluents laitiers, tels que rapportés dans la littérature technique de référence [12,13].

Tableau 1, Caractéristiques physico-chimiques générales des effluents laitiers [12,13].

Paramètre	Unité	Plage observée
PH	–	2 – 11
Température	°C	12 – 40
Matières en suspension (MES)	mg/L	135 – 8 500
DCO	mg O ₂ /L	1 000 – 6 000
DBO ₅	mg O ₂ /L	450 – 4 790
Huiles et graisses	mg/L	35 – 500
Protéines	mg/L	210 – 560
Azote total	mg/L	15 – 180
Ammoniac (N-NH ₄ ⁺)	mg/L	10 – 100
Phosphore total	mg/L	20 – 250
Chlorures	mg/L	48 – 2 000
Sodium	mg/L	60 – 807
Conductivité	µS/cm	élevée (fromageries > 3 000)
Détergents	mg/L	3,5 – 7,5

I. 1.3.5. Impact environnemental des rejets laitiers

Les rejets d’eaux usées laitières non traitées ont des impacts importants et multiformes sur l’environnement, touchant les milieux aquatiques, les sols, l’air ainsi que la biodiversité.

a) Impact sur les eaux

Les effluents non traités dégradent les milieux aquatiques par des effets physiques, chimiques et biologiques. Les matières en suspension réduisent la transparence de l’eau et provoquent le colmatage des fonds. La dégradation de la matière organique entraîne une forte consommation d’oxygène dissous, perturbant la vie aquatique. Par ailleurs, l’excès de nutriments favorise l’eutrophisation, tandis que certains composés azotés peuvent devenir toxiques pour la faune. Enfin, les sédiments peuvent accumuler des polluants persistants, constituant une source de contamination à long terme [16].

b) Impact sur les sols

Les rejets non traités modifient progressivement les propriétés des sols. Ils provoquent une acidification et une augmentation de la salinité, entraînant une dégradation de la structure du sol. On observe également une diminution de la matière organique, une accumulation de métaux et de micronutriments pouvant atteindre des niveaux toxiques, ainsi qu'une réduction de la porosité. Ces changements affectent fortement la fertilité et la biodiversité du sol[17,18].

c) Impact sur l'air

La décomposition anaérobie des effluents libère des gaz à effet de serre tels que le méthane (CH_4), ainsi que des composés volatils comme le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'ammoniac (NH_3). Ces émissions contribuent à la pollution atmosphérique, aux nuisances olfactives et présentent des risques pour la santé des populations exposées [19,20].

d) Impact sur la biodiversité

Les rejets non traités perturbent fortement les écosystèmes. Ils modifient la composition de l'eau, réduisent la lumière disponible et affectent la photosynthèse. L'accumulation de contaminants dans les organismes aquatiques entraîne une contamination de la chaîne alimentaire. Ces perturbations réduisent la reproduction de certaines espèces, favorisent la disparition d'organismes sensibles et peuvent conduire à une dominance d'espèces plus résistantes, parfois invasives [21].

I. 1.3.6. Normes des rejets des effluents liquides industriels

La réglementation encadrant les rejets d'effluents liquides industriels vise à limiter leur impact sur les milieux récepteurs. Elle s'articule à deux niveaux : international et national.

a) Normes internationales

À l'échelle internationale, les normes relatives aux eaux usées sont définies notamment par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Elles fixent des seuils pour plusieurs paramètres physico-chimiques afin de garantir une qualité acceptable des rejets [61]. Voir tableau 2.

Tableau 2, Normes internationales (OMS)

Paramètre	Valeurs maximales
Ph	6,5 – 8,5
DBO ₅	< 30 mg/L
DCO	< 90 mg/L
MES	< 20 mg/L
NH ₄ ⁺	< 0,5 mg/L
NO ₂ ⁻	1 mg/L
NO ₃ ⁻	< 1 mg/L
P ₂ O ₅	< 2 mg/L
Température	< 30 °C
Couleur	Incolore
Odeur	Inodore

b) Norme algérienne

En Algérie, les normes nationales de rejet des effluents industriels sont définies, afin de protéger l'environnement et les ressources en eau. Ces normes fixent les valeurs limites maximales pour différents paramètres physico-chimiques, qui ne doivent pas être dépassées avant tout rejet dans le milieu naturel. Selon le Journal officiel de la République algérienne (JORA, 1993)[22] .les valeurs limites sont regroupées dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3, valeurs limitées maximales des paramètres de rejet des installations de déversement industrielles

Paramètres	Valeurs maximales
DBO ₅	35 mg/L
DCO	120 mg/L
MES	35 mg/L
Azote total	50 mg/L
Phosphate	2 mg/L
Phosphate total	10 mg/L
Température	30 °
Ph	6,5 – 8,5

I. 1.3.7. Procédés de traitement des eaux usées laitières

a) Procédés physico-chimiques

Les procédés physico-chimiques de traitement des eaux usées reposent principalement sur la coagulation-floculation, l'adsorption et les techniques membranaires. La coagulation-floculation consiste à ajouter des sels métalliques (comme le sulfate d'aluminium ou le chlorure ferrique) afin de déstabiliser les particules colloïdales et de former des floccs, qui sont ensuite séparés par décantation ou flottation, ce qui permet de réduire efficacement les MES, la turbidité, la DCO et le phosphore [14]. Cependant, ce procédé ne suffit pas à respecter les normes de rejet [15]. L'adsorption permet, quant à elle, d'éliminer les polluants dissous par leur fixation sur un matériau adsorbant. Enfin, les procédés membranaires (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse), parfois couplés à des bioréacteurs membranaires, assurent une séparation fine des contaminants et produisent une eau de haute qualité pouvant être réutilisée [15].

b) Procédés biologiques

Le traitement biologique des effluents laitiers repose sur l'activité de microorganismes capables de dégrader la matière organique soluble contenue dans l'effluent, selon deux modes principaux : aérobie et anaérobie [14,15]. Les procédés aérobies, largement utilisés dans l'industrie laitière, permettent l'élimination de la DCO et de la DBO₅ en présence d'oxygène,

grâce à des systèmes tels que les boues activées ou le lagunage aéré. Les procédés anaérobies, quant à eux, dégradent la matière organique en l'absence d'oxygène, produisant du biogaz (méthane et CO_2), tout en générant moins de boues et en permettant une valorisation énergétique, mais ils nécessitent des conditions de fonctionnement strictement contrôlées.

c) Procédés électrochimiques

Le procédé électrolytique consiste en la dégradation de composés organiques ou inorganiques sous l'effet d'un courant électrique. Il se déroule dans une cellule électrolytique constituée d'une anode et d'une cathode, où des réactions d'oxydation et de réduction ont lieu. Sous l'action du courant, les anions migrent vers l'anode tandis que les cations se dirigent vers la cathode, où ils sont respectivement oxydés et réduits. Dans le domaine du traitement des effluents laitiers, plusieurs procédés reposant sur ce principe sont utilisés, notamment l'électrocoagulation, l'électroflottation et l'électrooxydation[14, 13].

I.2. Procédé d'électrocoagulation pour le traitement des effluents

L'eau polluée, contenant des substances toxiques persistantes, a pris la forme d'un enjeu de santé publique et environnemental majeur, dévastant aussi bien la vie aquatique. Ce problème s'aggrave ces dernières années en raison de la croissance de la production industrielle. Il est donc nécessaire d'appliquer des techniques de traitement efficaces et performantes pour éliminer la contamination [25].

Au cours des dernières années, l'utilisation des méthodes électrochimiques a considérablement augmenté, et offrant des résultats de traitement efficaces en un temps réduit, L'électrocoagulation (EC), l'électrooxydation (EO) et l'électroflottation (EF) font partie des techniques les plus fréquemment utilisées. Plusieurs facteurs influencent l'efficacité de ces méthodes [26].

Dans cette section, nous présenterons le procédé d'électrocoagulation (EC), une technique innovante qui utilise le courant électrique pour le traitement des eaux usées. Nous aborderons son principe de fonctionnement, les matériaux d'électrodes employés, les principaux paramètres influençant le procédé, ainsi que ses avantages et ses inconvénients en tant que méthode de traitement des eaux polluées.

I.2.1. Principe de l'électrocoagulation

Le principe de l'EC repose sur l'utilisation d'anodes solubles où s'effectue l'oxydation ; les deux électrodes (fer ou aluminium) sont plongées dans un réacteur contenant un électrolyte conducteur parcouru par un courant continu.

L'application d'un courant entraîne la dissolution anodique in situ de l'électrode sacrificielle, ce qui produit des ions (Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+}) qui peuvent former des coagulants en solution pour provoquer la coagulation-floculation du polluant qu'on veut éliminer [8]. Ces ions, en interaction avec les hydroxydes métalliques, réagissent avec les particules colloïdales chargées négativement pour neutraliser ces charges et déclencher le processus de coagulation [30,10].

Parallèlement à la coagulation, la réduction de l'eau à la cathode génère des microbulles de gaz d'hydrogène H_2 (Figure 2) qui s'attachent aux floccs formés et les entraînent sur la surface du réacteur (phénomène de l'électroflottation) qui peuvent être récupérées par filtration [8].

La loi de Faraday sur l'électrolyse décrit comment la tension appliquée et la densité de courant influencent la vitesse à laquelle l'aluminium se dissout et le coagulant est généré [30,10].

$$m = \frac{itM}{nF} \dots\dots\dots (1)$$

Avec :

m : la masse théoriquement dissoute (g).

M : la masse molaire de l'ion considéré (g/mol)

n : le nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée.

i : l'intensité imposée aux bornes des électrodes (A).

L'EC utilise en général une anode en fer et en aluminium, qui libèrent des ions en solution qui se sont révélés plus efficaces pour éliminer des polluants [29].

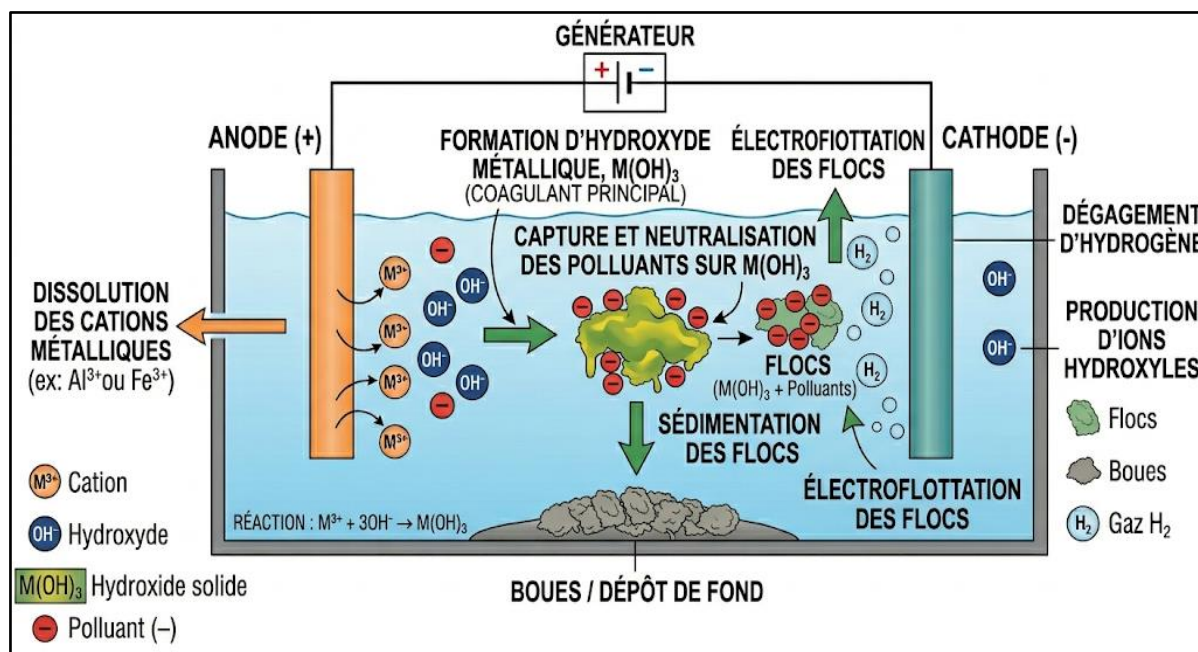


Figure 2, Schéma sur le principe de l'EC.

I.2.2. Mécanismes réactionnels de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation s'effectue par plusieurs réactions.

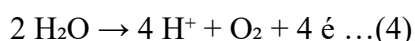
• Réaction à l'anode

L'oxydation du métal se fait selon les réactions 2 et 3 suivantes :



Si la densité du courant est adéquate et que les conditions environnementales sont appropriées, une oxydation de l'eau peut se produire à l'anode avec un potentiel standard

$E^{\circ} = 1,23 \text{ V}$ [8], comme le montre la réaction 4 suivante :



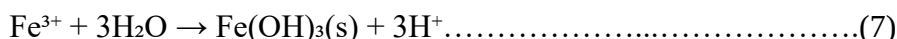
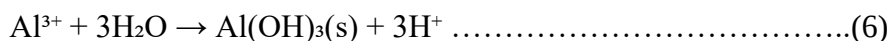
• Réaction à la cathode :

La réaction principale qui se produit est la réduction de l'eau selon l'équation 5 :



Les gaz émis à la cathode peuvent provoquer la flottation des particules colloïdales coagulées, et empêcher aussi la formation d'un dépôt sur la cathode, ce qui améliore l'efficacité de l'électrocoagulation [10].

En solution aqueuse, les ions Al^{3+} ou Fe^{3+} générés réagissent avec l'eau pour former les hydroxydes suivants selon les équations 6 et 7:



En fonction du pH de l'environnement, l'hydrolyse des ions Al^{3+} peut conduire à la création des hydroxydes $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$ et $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_4^{2+}$. Il convient de souligner que l'utilisation d'électrodes de fer peut conduire à la production d'ions ferreux (Fe^{2+}) ou ferriques (Fe^{3+}), qui, en fonction du pH ambiant, peuvent donner naissance à une espèce monomérique. Des composés tels que $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et des espèces polymériques complexes comme $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^{2+}$, ainsi que $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$ et $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$ sont présents [12].

I.2.3 Les particules colloïdales et le potentiel zêta :

Contrairement à la coagulation classique qui utilise des réactifs chimiques pour la coagulation de MES et des particules colloïdales retrouvées dans les eaux brutes [12], l'EC est effectuée dans une cellule électrochimique où les électrodes sont arrangées en configuration monopolaire ou bipolaire (figure 6).

Les rejets industriels se caractérisent par la présence de polluants adsorbés sur des particules colloïdales de petite taille (moins de 1 μm), rendant leur élimination par sédimentation seule impossible. Leur stabilité est déterminée par leur interaction avec l'eau, d'où leur classification en deux catégories :

I.2.3.1 Les colloïdes hydrophiles :

Ce sont des particules d'origine organique (protéines, glucides) qui possèdent des groupements polaires ($-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$). Ces groupements créent des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau pour former une enveloppe protectrice appelée couche de solvation. Cette dernière empêche l'agglomération des particules en neutralisant les forces de Van der Waals.

I.2.3.2 Les colloïdes hydrophobes :

Il s'agit généralement de métaux ou d'oxydes qui n'ont pas d'affinité pour l'eau. Leur stabilité découle des forces de répulsion électrostatiques créées par la double couche électrique qui est composée de deux régions distinctes :

1. **La couche de Stern (la couche fixe) :** c'est la partie interne de la particule qui contient des ions de charges opposées adsorbés sur sa surface.
2. **La couche diffuse :** la partie externe de la particule où les ions se déplacent librement sous l'effet de la diffusion thermique.

La stabilité de ces suspensions est mesurée par le potentiel zêta, qui correspond à la différence de charge électrique entre les deux couches. Une suspension est considérée comme stable si le potentiel zêta est inférieur à -30 mV, ou supérieur à 30 mV, dont les forces de répulsion sont assez fortes pour que les particules puissent se collisionner [12].

Pour réduire ces forces de répulsion ou ces barrières d'énergie, il est nécessaire d'introduire des agents de coagulation qui vont perturber les colloïdes, ce qui va diminuer la double couche et éliminer le potentiel zêta (ζ), comme l'indique le schéma ci-dessous (figure 3) dans la courbe rouge, suivie par la floculation des colloïdes.

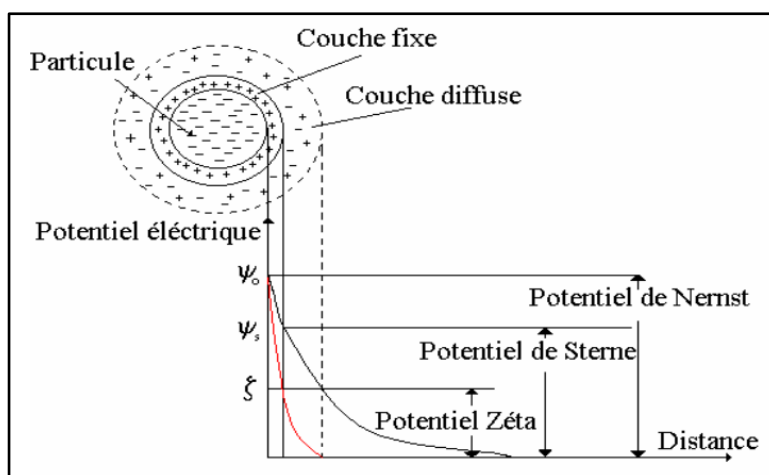


Figure 3, Double couche et potentiel zêta [12].

Le potentiel zêta est donné par la relation suivante [14] :

$$\zeta = \frac{4\pi e q}{D} \dots \dots \dots (8)$$

ζ : Potentiel Zêta.

e: Épaisseur effective de la couche diffuse.

q: Charge de l'entité mobile par unité de surface.

D: Constante diélectrique du milieu (capacité du milieu à laisser passer le courant électrique).

Le potentiel électrostatique est influencé par la force ionique Ω de l'eau selon l'équation 9.

$$\Omega = \frac{1}{2} \sum C_i (z_i)^2 \dots\dots\dots (9)$$

Ω : force ionique (mol/l).

C_i : concentration de l'ion i (mol/l).

z_i : Valence de l'ion i.

À mesure que Ω croît, les ions se dirigent vers la particule, l'épaisseur effective se réduit, ce qui entraîne également une diminution du potentiel zêta.

I.2.4. Matériaux et modes de branchement des électrodes:

Dans l'EC, les électrodes peuvent être configurées de différentes manières, en plaques, en boules, en tubes, en fils ou encore en sphères à lit fluidisé. Ces dernières peuvent être composées de divers métaux, utilisés pour améliorer le traitement. Les deux matériaux les plus couramment employés dans l'anode sont l'aluminium et le fer, grâce à leur coût raisonnable et à leur valence élevée [10].

Concernant la cathode, elle est généralement constituée d'un matériau inerte tel que l'acier inoxydable ou le titane revêtu de platine. Dans certaines situations, le même matériau que l'anode est employé pour la cathode.

Le matériau choisi pour l'électrode influe sur l'efficacité du traitement et les performances du réacteur d'EC, et ce choix dépend des contaminants présents et des conditions environnementales du milieu. Cependant, des recherches ont démontré que, par rapport à l'aluminium, les anodes en fer offrent une meilleure efficacité dans l'élimination des contaminants tout en nécessitant moins d'énergie électrique [13].

Il existe trois modes de branchement des électrodes :

I.2.4.1 Le mode monopolaire en série : le courant passe par chaque cellule successivement, fait appel à une haute tension et un faible courant.

I.2.4.2 Le mode monopolaire parallèle : toutes les anodes sont connectées au pôle positif et toutes les cathodes au pôle négatif. Il est nécessaire que le courant soit élevé, car il se répartit entre toutes les plaques.

I.2.4.3 Le mode bipolaire : seules les deux plaques aux extrémités sont connectées au générateur, et par induction, les plaques du milieu deviennent positives d'un côté et négatives de l'autre.

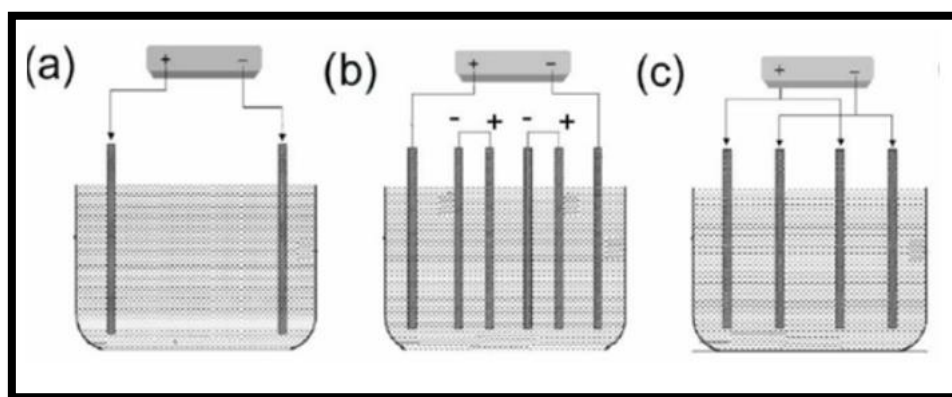


Figure 4, mode de branchement, a) monopolaire simple, b) monopolaire en série, c) bipolaire [10]

Le mode en série nécessite une tension plus importante que le mode en parallèle, car les résistances de chaque espace entre les plaques s'additionnent ($V_{\text{tot}} = V_1 + V_2 + V_3 \dots$). En outre, en mode série, le courant qui traverse les électrodes reste constant, à l'inverse du mode parallèle où il est influencé par la résistance de chaque cellule.

Le mode bipolaire se distingue par une consommation d'énergie électrique réduite et une moindre nécessité de connexions physiques.

I.2.5. Paramètres influençant l'électrocoagulation :

L'efficacité du procédé d'électrocoagulation (EC) dépend d'un ensemble de paramètres opératoires et physico-chimiques qui interagissent entre eux.

I.2.5.1. Intensité et densité de courant :

L'intensité du courant est l'un des paramètres les plus déterminants du procédé d'EC. Elle conditionne simultanément la cinétique de dissolution anodique, la production d'hydroxydes métalliques et le dégagement de bulles d'hydrogène à la cathode. D'après la loi de Faraday, la masse d'aluminium dissoute à l'anode est directement proportionnelle à la quantité d'électricité fournie [23].

Un courant trop faible entraîne une production insuffisante d'hydroxydes, ce qui allonge le temps de traitement nécessaire. À l'inverse, un courant excessif provoque une consommation énergétique importante, une usure accélérée des électrodes et peut réduire l'efficacité en raison de la coalescence des bulles de gaz. [24]

I.2.5.2. Nature et configuration des électrodes :

Le choix du matériau des électrodes influence directement la nature des espèces métalliques produites, la consommation énergétique et l'efficacité globale du traitement. Les électrodes en aluminium (Al) et en fer (Fe) sont les plus répandues en raison de leur faible coût et de leur innocuité. L'aluminium et le fer sont tous deux largement utilisés pour le traitement des eaux

usées, le choix entre les deux dépend principalement de la nature de l'effluent, du pH du milieu et de l'efficacité d'élimination recherchée. Le choix de l'aluminium plutôt que le fer se justifie par la couleur neutre des floes d' $\text{Al}(\text{OH})_3$, contrairement aux hydroxydes de fer qui colorent l'effluent traité, et par son efficacité sur une gamme de pH plus large incluant le pH neutre des effluents laitiers. [23]

I.2.5.3. pH initial de la solution

Le pH est l'un des paramètres les plus étudiés dans le procédé d'EC. Il conditionne la spéciation des ions métalliques en solution et, par conséquent, la nature et l'efficacité des agents coagulants formés [23,24]. Dans le cas d'électrodes en aluminium, on distingue les espèces prédominantes suivantes selon la plage de pH :

- à $\text{pH} < 3$: l'aluminium est principalement sous forme trivalente Al^{3+} ;
- entre pH 5 et 8: l'espèce prédominante est $\text{Al}(\text{OH})_3$ avec un maximum de 95 % vers $\text{pH} = 6,5$;
- $\text{pH} > 10$: $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ devient dominant, réduisant fortement l'efficacité du traitement.

Ces observations expliquent que l'efficacité de l'EC est optimale pour des pH compris entre 5,8 et 7,4, plage dans laquelle $\text{Al}(\text{OH})_3$ se précipite abondamment. Les valeurs de pH très acides ($< 3,9$) ou très basiques (> 10) entraînent une chute brutale du taux d'élimination.

Durant le traitement, le pH tend généralement à augmenter en raison de la production d'ions OH^- à la cathode [24].

I.2.5.4. Conductivité de la solution:

La conductivité de l'effluent est directement liée à sa résistance électrique. Une conductivité suffisamment élevée assure un bon transfert ionique dans la cellule et réduit la tension nécessaire pour maintenir l'intensité souhaitée, diminuant ainsi la consommation d'énergie. À l'inverse, une faible conductivité impose une tension élevée et un coût opératoire plus important [23,24].

I.2.5.5. Distance interélectrodes :

La distance entre les électrodes influe sur la chute ohmique et les interactions entre les espèces ioniques en solution. L'augmentation de cet espacement entraîne une hausse de la résistance électrique et, par conséquent, une augmentation de la tension nécessaire pour maintenir une densité de courant constante.

Une distance optimale doit être maintenue. Si la distance est trop faible, la forte attraction électrostatique entraîne la dégradation des floes lors des collisions. À l'inverse, une distance trop grande ralentit la migration des ions et freine la formation des floes [23].

La littérature suggère qu'un espacement de l'ordre de 1 à 2 cm constitue un compromis satisfaisant pour la plupart des applications [24].

I.2.5.6. Concentration initiale en polluants :

La concentration initiale des polluants dans l'effluent à traiter influe fortement le déroulement du procédé. Une concentration élevée en contaminants tend à augmenter la conductivité de la solution, mais elle stimule également la formation d'une couche passive à la surface des électrodes, ce qui réduit la libération d'ions métalliques et augmente l'impédance du système.

Lorsque la tension est maintenue constante, une quantité fixée d'ions est libérée par l'anode. Ainsi, pour des concentrations croissantes en polluants, la dose de coagulant produite peut devenir insuffisante pour assurer une sédimentation efficace. De plus, des concentrations élevées accentuent les réactions d'oxydation à la surface de l'anode, réduisant sa capacité à libérer des ions métalliques et à générer des radicaux hydroxyles [23].

I.2.5.7. Température :

La température de l'effluent influe sur la viscosité de la solution, la diffusivité ionique et les constantes de solubilité des précipités métalliques. Une augmentation de la température améliore généralement la conductivité et le transfert ionique, réduisant ainsi la consommation énergétique. Cependant, au-delà d'un seuil (environ 60 °C selon certaines études), l'efficacité diminue en raison d'une passivation accrue des électrodes due à la formation de couches d'oxydes métalliques protecteurs [23].

Des températures élevées provoquent également la contraction des pores du gel d' $\text{Al}(\text{OH})_3$, ce qui conduit la formation de floccs compacts davantage enclins à se déposer sur la surface des électrodes. C'est pourquoi la plupart des chercheurs recommandent de maintenir la température du réacteur d'EC entre 20 et 25 °C [24].

I.2.5.8. Temps d'électrolyse :

La durée du traitement électrolytique est un paramètre directement lié à l'efficacité du procédé et à son coût. Plus le temps d'électrolyse est long, plus la concentration en ions métalliques et en floccs d'hydroxydes augmente dans la solution, ce qui améliore le taux d'élimination des polluants [23].

Cependant, la consommation énergétique et l'usure des électrodes augmentent proportionnellement avec le temps de traitement [23]. Le taux d'élimination croît avec la durée d'hydrolyse avant de plafonner, généralement entre 30 et 100 minutes, selon l'intensité du courant appliquée. Il est donc nécessaire de déterminer le temps de traitement optimal permettant d'atteindre l'efficacité souhaitée avec la consommation énergétique minimale [24].

I.2.6. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation

Comme tout procédé de traitement des eaux, l'électrocoagulation (EC) présente des avantages significatifs qui la distinguent des méthodes conventionnelles, ainsi que des inconvénients

susceptibles d'en limiter l'application selon les conditions opératoires et le type d'effluent traité.

Tableau 4, Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation

Avantages	Inconvénients
Absence de réactifs chimiques : Produit les ions coagulants in situ par dissolution anodique ; élimine les coûts de transport, stockage et manipulation de produits chimiques [23, 40].	Coût énergétique : La consommation électrique peut représenter une part significative des charges d'exploitation, surtout pour grands volumes [23, 40].
Simplicité et compacité : équipement sans pièces mobiles, faible maintenance, automatisation complète, adaptable aux petites unités [40].	Passivation des électrodes : formation d'un film d'oxyde en surface entraînant une perte d'efficacité progressive et une augmentation de la résistance électrique [23, 40].
Efficacité sur les colloïdes fins : le champ électrique accélère l'agglomération des particules colloïdales, y compris celles résistantes aux méthodes classiques [23, 40].	Conductivité minimale requise : Les effluents de faible conductivité nécessitent l'ajout d'un électrolyte (NaCl), impliquant un coût supplémentaire [23].
Qualité des boues : Boues denses, peu hydrophiles, à sédimentation rapide, résistantes aux acides et faciles à filtrer [23, 40].	Gestion des boues humides : Les boues peuvent contenir jusqu'à 80 % d'eau, ce qui nécessite des étapes complémentaires de séchage ou de filtration [23].
Réduction des solides dissous : L'effluent traité contient moins de TDS que celui obtenu avec les traitements chimiques, ce qui réduit les étapes de traitement aval [40].	Maintenance des électrodes : L'usure progressive et les nettoyages périodiques impliquent des arrêts et des coûts de remplacement non négligeables [23].
Flottation naturelle : Les bulles d'H ₂ formées à la cathode transportent les floccs en surface sans équipement supplémentaire [40].	
Amélioration de la biodégradabilité : Facilite un traitement biologique subséquent grâce à la non-toxicité de l'aluminium produit et à la faible salinité [23].	
Effet bactéricide : le champ électrique réduit la charge microbienne sans recourir à des désinfectants chimiques [23].	

I.2.7. Application du procédé d'électrocoagulation :

En raison de sa polyvalence et de son efficacité sur une large gamme de polluants, le procédé d'électrocoagulation (EC) a été appliqué avec succès dans de nombreux domaines du traitement des eaux et des eaux usées. Les principales applications recensées dans la littérature sont présentées ci-après.

I.2.7.1. Traitement des eaux chargées en huiles et graisses

L'une des premières applications industrielles de l'EC concerne le traitement des eaux usées chargées en huiles émulsifiées, notamment les eaux de raffinerie et de restaurants. Le procédé EC est particulièrement adapté dans ce contexte: les floccs d'hydroxyde métallique adsorbent les huiles, tandis que les bulles d'hydrogène facilitent leur flottation vers la surface du réacteur [32]. La charge appliquée et le temps de rétention sont les paramètres opératoires les plus déterminants pour ce type de traitement.

I.2.7.2. Traitement de l'eau potable et des composés inorganiques

Dans le domaine de l'eau potable, l'EC nécessite des doses d'aluminium nettement inférieures (2,2 mg/L) à celles de la coagulation chimique classique (6 mg/L) pour atteindre le même taux d'abattement de la turbidité, avec des volumes de boues plus faibles. L'EC a également été appliquée à l'élimination des fluorures (78 % d'abattement par adsorption sur $\text{Al}(\text{OH})_3$) et des nitrates, avec des taux atteignant 95 % avec des électrodes de fer en 7,5 minutes [41].

I.2.7.3. Élimination des métaux lourds

L'EC présente une excellente capacité d'élimination des métaux lourds par adsorption sur les hydroxydes métalliques formés in situ. Des expériences comparatives ont montré que les électrodes de fer permettent d'atteindre 99 % d'élimination de l'arsenic à pH 6-8, grâce à la forte capacité d'adsorption des hydroxydes ferriques [37].

I.2.7.4. Traitement des eaux usées urbaines et industrielles

L'EC a été appliquée avec succès au traitement d'eaux usées complexes chargées en matière organique, turbidité, phénol et agents de surface. Des électrodes combinées Al/Fe ont permis d'éliminer 96,5 % de la turbidité et 88,7 % de la DCO en moins de 30 minutes d'électrolyse [32].

Tableau 5, Synthèse des principales applications de l'EC recensées dans la littérature [41]

Domaine d'application	Polluants cibles	Électrodes	Rendement
Huiles et graisses	Émulsions huile/eau, hydrocarbures	Fe, Al	Élimination efficace par électrocoagulation-flottation
Colorants / textiles	Colorants synthétiques	Fe	Jusqu'à 98,5 %
Métaux lourds	Arsenic, cadmium, chrome	Fe, Al, Ti	99 % As (Fe, pH 6-8)
Eaux usées industrielles	DCO, turbidité, phénol, surfactants	Al, Fe	96,5 % turbidité
Lixiviats	DCO, MES, métaux traces	Al, Fe	Rendements élevés
Eau potable	Turbidité, COD, couleur	Al	Supérieur à la coagulation chimique classique
Fluorures	Ions F ⁻	Al	78 % d'élimination
Nitrates/nitrites	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺	Fe, Al	95 % (Fe, 7,5 min)

L'électrocoagulation est un procédé polyvalent dont les applications couvrent aussi bien le traitement de l'eau potable que celui des effluents industriels complexes. Ses performances sont comparables, voire supérieures, à celles de la coagulation chimique classique dans de nombreux domaines. Ces résultats justifient pleinement son application au traitement des effluents laitiers, objet de la présente étude.

I.3. Production d'hydrogène par procédé électrochimique

L'hydrogène est largement considéré comme un vecteur énergétique prometteur pour la transition vers des systèmes énergétiques plus durables. Cependant, son principal défi réside dans les méthodes de production, qui doivent être à la fois efficaces, économiquement viables et respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, parmi les procédés électrochimiques, l'électrocoagulation suscite un intérêt croissant. Cette technologie permet l'utilisation de rejets organiques, ce qui constitue un avantage supplémentaire, tout en produisant de l'hydrogène avec moins d'énergie. Ainsi, ce procédé contribue non seulement à la production d'énergie, mais également à la réduction de la pollution.

I.3.1. Caractéristiques de l'hydrogène

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple et le plus léger du tableau périodique, de symbole H et de numéro atomique 1. Il est également le plus abondant de l'univers, Sur notre planète, il se présente en grande quantité sous forme combinée avec d'autres éléments, notamment dans l'eau des océans, les hydrocarbures fossiles et la matière organique, qu'elle soit vivante ou inerte. Non toxique et incolore, il est souvent considéré comme le carburant du futur en raison de ses nombreuses caractéristiques physico-chimiques, résumées dans le tableau 6.

Tableau 6, Principales propriétés physico-chimiques de l'hydrogène (H_2) [45,46].

Propriété	Valeur
Formule chimique	H_2
N° CAS	1333-74-0
Masse molaire	2,02 g/mol
État physique (CNT)	Gazeux
Point de fusion	-259,2 °C
Point d'ébullition	-253 °C
Température d'auto-inflammation	560 °C
Température critique	-240 °C
Pression critique	13 atm
Densité (gaz, 0 °C, 1 atm)	0,0899 kg/m ³
Densité (liquide, -253 °C)	70,9 kg/m ³
Solubilité dans l'eau	1,6 mg/L à 21 °C
Énergie de dissociation ($H_2 \rightarrow 2H$)	104 kcal/mol
Limite inférieure d'explosivité (LIE)	4 % vol. dans l'air
Limite supérieure d'explosivité (LSE)	75 – 77 % vol. dans l'air
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	120 MJ/kg
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	142 MJ/kg
Chaleur de combustion (H_2O liquide)	-57,8 kcal/mol

Parmi les propriétés les plus remarquables de l'hydrogène figurent son pouvoir calorifique élevé. Sa combustion est décrite par la réaction fortement exothermique :



Cette réaction libère une quantité importante d'énergie tout en produisant uniquement de l'eau comme sous-produit. L'hydrogène présente également une large plage d'inflammabilité dans l'air comprise entre 4 % et 77 % en volume. En raison de l'absence d'émissions directes de dioxyde de carbone (CO₂) et de la faible production de polluants lors de sa combustion, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique propre et prometteur pour la transition énergétique [46].

I.3.2.Classification des types d'hydrogène par couleur

Une classification par couleur a été adoptée à l'échelle internationale afin de différencier les filières selon leur source d'énergie et des émissions de CO₂ qui y sont associées [49].

Parmi toutes ces catégories, l'hydrogène vert suscite le plus grand intérêt dans la transition énergétique, car il est le seul à ne générer aucune émission de CO₂ sur l'ensemble de son cycle de vie. L'hydrogène bleu constitue une solution intermédiaire permettant de réduire significativement les émissions tout en s'appuyant sur des infrastructures existantes [47,49]

Tableau 7, Classification de l'hydrogène selon son mode de production [49]

Couleur	Source / Procédé	Émissions CO ₂	Remarques
Noir / Brun	Gazéification du charbon (bitumineux / lignite)	~19 tCO ₂ /tH ₂	Procédé le plus émetteur. Noir = charbon bitumineux, brun = lignite.
Gris	Reformage du méthane (SMR) ou gazéification fossile	10–19 tCO ₂ /tH ₂	Représente plus de 95 % de la production mondiale actuelle.
Bleu	SMR + captage et stockage du carbone (CCS)	1–4 tCO ₂ /tH ₂	Alternative propre la moins coûteuse. Le CO ₂ est capté et séquestré.
Vert	Électrolyse de l'eau — énergie renouvelable (éolien, solaire)	0	Moins de 0,1 % de la production mondiale. Coût en baisse rapide.
Jaune	Électrolyse de l'eau — énergie solaire uniquement	0	Sous-catégorie du vert. Potentiellement la forme renouvelable la moins chère.
Rose	Électrolyse de l'eau — énergie nucléaire	0	Propre mais non renouvelable. Pas d'émissions directes.
Violet	Électrolyse — nucléaire + chaleur	0	Utilise à la fois l'électricité et la chaleur issues du nucléaire.
Rouge	Thermolyse catalytique — chaleur nucléaire haute T°	0	Moins électro-intensif que l'électrolyse classique. En R&D.
Turquoise	Pyrolyse du méthane	Carbone solide	Produit du carbone solide (non gazeux). En début de développement.
Orange	Pyrolyse des déchets plastiques	Variable	Valorisation des plastiques + énergie propre. Phase expérimentale.
Blanc (naturel)	Formation géologique naturelle (eau + minéraux ferreux)	0	Hydrogène naturel extrait de la croûte terrestre. Aucun procédé d'exploitation à ce jour.

I.3.3. Procédés de production d'hydrogène

Actuellement, la production d'hydrogène repose majoritairement sur des ressources fossiles. Le gaz naturel représente la principale source, avec près de 40 % provenant du vaporeformage, suivi du pétrole (30 %) et du charbon (18 % via la gazéification), tandis que l'électrolyse de l'eau ne couvre qu'une faible part, estimée à environ 4 % [50]. Ces filières traditionnelles sont largement utilisées mais restent coûteuses et fortement émettrices de CO₂. Dans ce contexte, des alternatives plus durables se développent, notamment les procédés électrolytiques couplés aux énergies renouvelables, les procédés biologiques et certaines voies thermochimiques. Bien que prometteuses sur le plan environnemental, ces technologies demeurent encore en phase de développement et font face à d'importantes contraintes économiques et techniques.

a) Procédés conventionnels

Parmi les procédés conventionnels, le vaporeformage du méthane (SMR) est le plus développé et le plus couramment utilisé à grande échelle. Il repose sur la conversion catalytique du méthane et de la vapeur d'eau en hydrogène et en oxydes de carbone, avec un rendement de conversion compris entre 74 et 85 %. La gazéification du charbon, procédé thermochimique opérant à des températures élevées, convertit des matières carbonatées solides en un gaz de synthèse riche en H₂ et CO par réaction avec un agent oxydant.

L'électrolyse de l'eau se distingue des procédés précédents en ne faisant pas appel aux combustibles fossiles ; elle décompose l'eau par courant électrique en produisant de l'hydrogène à la cathode et de l'oxygène à l'anode, avec un rendement atteignant 73 % pour

Les électrolyseurs alcalins commerciaux. Ces filières sont certes largement maîtrisées et économiquement compétitives, mais elles demeurent fortement émettrices de CO₂ et tributaires de ressources épuisables, ce qui constitue la principale motivation au développement de procédés alternatifs plus durables [50].

b) Procédés en voie de développement

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles, le développement de procédés durables de production d'hydrogène constitue une priorité majeure. En effet, la valorisation de la biomasse représente une alternative prometteuse, reposant sur des procédés thermochimiques tels que la gazéification à haute température et la pyrolyse en l'absence d'oxydant, ainsi que sur des voies biologiques incluant la fermentation sombre, la photo-fermentation[50].

Par ailleurs, plusieurs procédés électrochimiques, tels que l'électrooxydation, la photo-électrolyse, ainsi que l'électrocoagulation permettent la production d'hydrogène ou la valorisation de l'eau en utilisant différentes formes d'énergie, notamment des sources renouvelables [1]. Ces approches occupent une place de plus en plus importante dans la transition vers des systèmes plus durables, en offrant un compromis entre l'optimisation énergétique et la réduction des impacts environnementaux négatifs.

I.3.4. Synthèse de quelques travaux sur l'électrocoagulation appliquée à l'élimination des polluants et à la production

L'électrocoagulation est une technique efficace qui permet d'un seul coup l'élimination de plusieurs types de polluants provenant de rejets de différentes industries, et la production d'hydrogène considéré comme un produit valorisable.

L'analyse d'environ 120 études a montré que l'EC permet la réduction de la DCO jusqu'à 98 % et une élimination de la turbidité de 80 à 99 %, des rendements faradiques de 60 à 95 % et des rendements en hydrogène de 80 à 300 L H₂ m⁻³, pour une consommation énergétique comprise entre 25 et 120 kWh kg⁻¹ H₂ [39].

Afin de mettre la lumière sur ce procédé, le tableau récapitulatif ci-dessous présente une synthèse de différents travaux et recherches scientifiques, il met en évidence la capacité du réacteur du traitement des effluents aqueux simultanément avec la production et la récupération de l'hydrogène au niveau de la cathode.

Tableau 8, Synthèse des études portant sur la production et la récupération de l'H₂ par EC.

Type de l'effluent	Matériaux d'électrodes	Conditions optimales	Le mode utilisé	rendement d'élimination (%)	Rendement de production d'hydrogène	Référence
Effluents textiles (Reactive Blue 140, Direct Red 23)	acier inoxydable	V _{Réactionnel} = 900 L Alimentation panneau solaire PV (540 W) Espacement = 3 mm U = 15 V	Réacteur fermé hermétique (polypropylène)	• Élimination couleur = 100 % • DOC = 92 % • Turbidité = 99,53 %	V _{H₂max} = 898 676,9 ppm (89,87 % v/v)	[28]
Eaux usées hospitalières contenant de la ciprofloxacine (antibiotique) et du bleu de méthylène	•Al (anode) •Acier inoxydable (cathode)	t = 4 h pH = 10 U = 50 V Volume réactionnel= 1L	Non mentionné	Non mentionné	97,85 × 10 ⁻³ mmol de H ₂ soit 0,2 % v/v par litre de solution traitée	[31]
eaux usées de l'industrie pétrolière contenant du phénol	Al (anode) Acier inoxydable	U = 20 V pH = 10 t = 3 h Mode batch		Elimination de 22% du phénol	123,31 mmol H ₂ /m ²	[32]

	(cathode)					
des eaux produites par les champs pétrolifères (huile + MES)	Al (cathode et anode)	I = 4,24 A Espacement = 2,70 cm pH = 7-9 Mode batch	Réacteur EC fermé optimisé	une élimination de l'huile de 95,10 %	V _{H₂} = 172,90 mL Concentration H ₂ : 90,14 %	[34]
Eau usée de galvanoplastie contenant des métaux lourds (Cr, Ni)	Al (cathode + anode)	t = 5 min	Réacteur oxyhydrogène (HHO Cell)		V _{H₂ max} = 2,875 L	[36]
Les eaux de biomasse algale (microalgues Dunaliella salina)	Fe cylindrique solide (anode) et Acier inox hélicoïdal (cathode)	U = 20 V t = 30 min Mode batch	Réacteur batch acrylique fermé	• Efficacité de récolte algues : 84,74 %	• H ₂ dissous max : 1,753 ppm • Volume HHO max : 1 978 mL	[35]

Chapitre 2 :

Matériels

et méthodes

II. Matériels et méthodes

Ce chapitre présente une description détaillée de l'appareillage expérimental, des matériaux utilisés et des protocoles appliqués dans cette étude.

La démarche expérimentale adoptée repose sur les points suivants :

- La préparation de l'effluent simulé et la caractérisation physico-chimique avant traitement (pH, conductivité, DCO, turbidité, TDS)
- La mise en place du montage expérimental, comprenant le réacteur d'électrocoagulation ainsi que le système de collecte et de mesure de l'hydrogène produit.
- L'étude de l'influence des principaux paramètres opératoires, tels que la densité du courant, le pH, la durée d'électrolyse, et la DCO initiale sur l'efficacité du système.
- Le suivi du traitement de l'effluent et de l'élimination de la matière organique au cours du procédé.
- La quantification et l'évaluation de gaz généré dans la cathode
- Enfin, l'évaluation de la consommation énergétique du système d'électrocoagulation.

II.1. Préparation de l'effluent synthétique

Les rejets issus des industries laitières sont caractérisés par une charge organique élevée et une biodégradabilité importante, ils se composent principalement de glucides (lactose), de protéines (caséines), de matières grasses, ainsi que de divers sels et minéraux.

Etant donné que les effluents industriels présentent des caractéristiques physico-chimiques variables, et afin d'assurer la reproductibilité de nos essais expérimentaux tout en évitant les variations des rejets industriels réels, nous avons utilisé au laboratoire un effluent synthétique simulant les caractéristiques physico-chimiques d'un rejet laitier type.

La préparation consiste à dissoudre une quantité de poudre de lait et d'autres additifs dans l'eau distillée, sous agitation. La composition détaillée de cet effluent est présentée dans le tableau 10.

Tableau 9, composition de l'effluent laitier synthétique étudié.

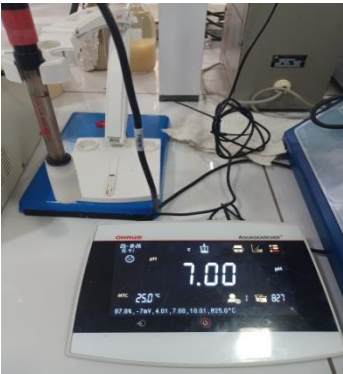
Constituant	Formule chimique	Concentration (g/L)
Poudre de lait	/	2,5
Urée	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	2,7
Bicarbonate de soude	NaHCO_3	1,56
Sulfate de magnésium heptahydraté	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,6
Chlorure de calcium dihydraté	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,036
Chlorure d'ammonium	NH_4Cl	0,58
Dihydrogénophosphate de sodium	NaH_2PO_4	0,9
Sulfate de fer(II) heptahydraté	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,024

II.2. Caractérisation de l'effluent synthétique

La caractérisation de l'effluent synthétique constitue une étape préalable indispensable au début du traitement. Cette démarche permet ensuite d'évaluer les performances du procédé d'électrocoagulation en termes de rendement d'abattement.

Les mesures nécessaires à cette caractérisation sont effectuées immédiatement après la préparation de l'effluent synthétique, afin d'éviter toute dégradation, à l'aide d'appareils de mesure préalablement étalonnés. Le tableau ci-dessous récapitule l'ensemble des équipements que nous avons utilisés pour la caractérisation.

Tableau10, Récapitulatif du matériel de caractérisation utilisé.

Paramètre	Matériel utilisé	Principe et description	Photo du matériel
Turbidité	Turbidimètre de la marque WTW	Mesure le degré de l'opacité ou de la clarté de l'eau, et reflète directement la concentration de matières colloïdales et en suspension présentes dans l'effluent. Plus l'eau est trouble, plus la cellule photoélectrique de l'appareil reçoit de lumière diffusée, ce qui se traduit par une valeur de turbidité exprimée en NTU (nephelometric turbidity units).	
Conductivité	Conductimètre de la marque OHAUS	Indique la capacité d'un matériau à conduire le courant électrique, elle est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ et permet également de quantifier les TDS (Total Dissolved Solides).	
Ph	pH-mètre marque OHAUS	Mesure la concentration d'ions H^+ dans l'eau.	

DCO	Bloc chauffant (digesteur) Modèle WTW Termoréacteur CR 3200 Spectrophotomètre UV-Visible de la marque Shimadzu	Utilisé pour l'analyse de la DCO. Mesure l'absorbance de l'échantillon digéré à l'aide d'un spectrophotomètre qui se compose d'une source lumineuse, d'un monochromateur qui permet la sélection d'une longueur d'onde spécifique (en nm), d'un port cuve et d'un détecteur photoélectrique relié à une interface numérique. Lorsqu'un faisceau de lumière traverse la cuve contenant notre effluent, une partie des photons est absorbée par les polluants, et l'appareil mesure la différence d'intensité entre la lumière incidente et la lumière transmise pour calculer l'absorbance, qui est proportionnelle à la concentration selon la loi de Beer-Lambert : $A = \varepsilon . l . c$	 
-----	--	--	--

II.2.1. Principe de l'analyse de la demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène (DCO) correspond à la quantité d'oxygène consommée par les matières organiques ou minérales présentes dans l'eau et oxydables dans des conditions opératoires définies. Ce paramètre constitue un indicateur clé pour estimer la charge polluante de l'effluent laitier.

La DCO a été mesurée selon la méthode à reflux en système fermé à haut niveau (0-1500 mg L⁻¹), suivie d'un dosage colorimétrique utilisant le bichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) comme oxydant, en milieu acide (H₂SO₄) et en présence d'un catalyseur (Ag₂SO₄) [45]. La concentration de DCO dans l'effluent liquide a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible (le protocole détaillé, ainsi que la courbe d'étalonnage sont présentés en annexe 1).

II. 3. Description du montage expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour les expériences se compose de plusieurs éléments essentiels, chacun ayant une fonction déterminante pour le bon déroulement du procédé électrochimique. Ce dispositif est présenté à la figure 5. Les différentes composantes sont détaillées ci-après :

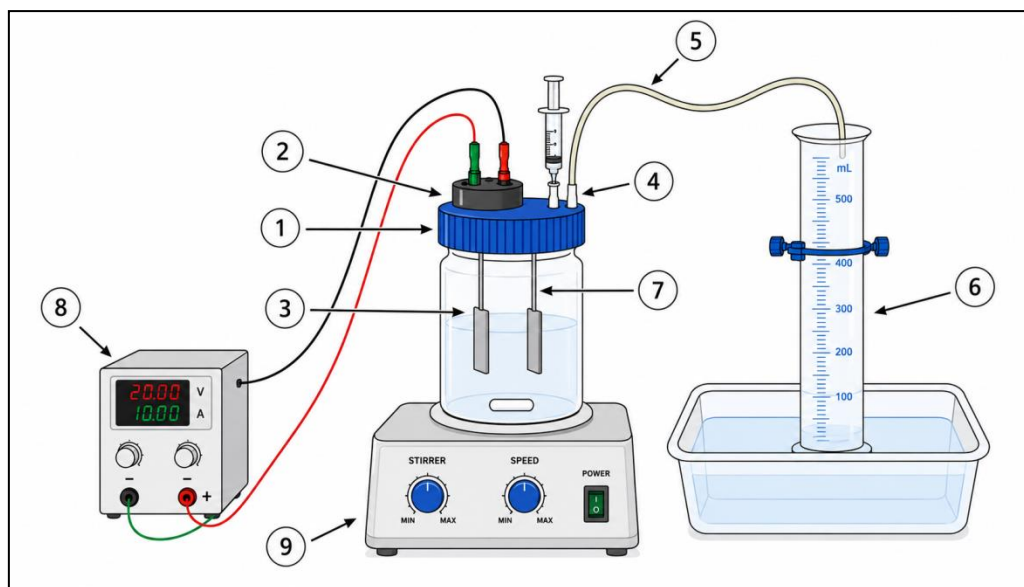


Figure 5, Dispositif expérimental

II.3.1. Réacteur électrochimique

Le réacteur électrochimique présenté sur la figure 5 se compose d'une cellule en verre cylindrique (1) d'une capacité de 500 mL. Il est équipé d'un couvercle à quatre ports (2) permettant l'introduction de deux électrodes de dimensions identiques (3), le prélèvement de la solution d'électrolyte pour analyse (4), ainsi que la collecte du gaz produit via un tuyau rigide (5) relié à un système de déplacement de gaz (6) ou à une poche de gaz. Les électrodes sont fixées sur des tiges conductrices en titane (7), elles-mêmes reliées par des fils au générateur de courant continu (8). L'étanchéité du réacteur est assurée par un joint torique situé dans la partie supérieure intérieure du couvercle. Enfin, le réacteur est placé sur un agitateur magnétique (9) afin d'assurer l'homogénéisation du milieu réactionnel.

II.3.2. Électrodes utilisées

Deux plaques rectangulaires de dimensions identiques (40 mm × 40 mm × 1 mm) ont été utilisées comme électrodes. L'anode est constituée d'aluminium (Al) et la cathode de l'acier inoxydable. Ces matériaux ont été choisis pour leurs propriétés électrochimiques favorables au procédé d'électrocoagulation et à la production de gaz.

Le choix de l'aluminium comme matériau anodique se justifie par sa capacité à libérer des ions Al^{3+} lors de la dissolution anodique, formant des hydroxydes métalliques $Al(OH)_3$ qui

agissent comme coagulants efficaces pour la déstabilisation et l'agrégation des colloïdes et des matières organiques en suspension. De plus, l'aluminium est un matériau léger, peu coûteux et largement disponible.

II.3.3. Générateur de courant

L'alimentation électrique du réacteur est assurée par un générateur de courant continu de type UTP1310, avec une intensité et une tension maximales de 10 A et 32 V, respectivement, permettant un réglage précis des conditions opératoires.

II.3.4. Systèmes de prélèvement (liquides et gaz)

- **Prélèvement liquide** : la solution traitée est prélevée au cours du traitement via le port d'échantillonnage intégré au couvercle du réacteur, ce qui permet un suivi analytique continu sans interruption de l'expérience.

- **Collecte du gaz** : le gaz produit au niveau de la cathode est acheminé par un tuyau rigide vers un système de collecte par déplacement d'eau. Ce système est composé d'un récipient rempli d'eau et d'une éprouvette graduée renversée, également remplie d'eau. Le gaz refoule progressivement l'eau, permettant ainsi la mesure directe du volume de dihydrogène (H_2) collecté.

II.4. Démarche expérimentale

II.4.1. Préparation des électrodes

Avant chaque essai, les électrodes sont soigneusement préparées afin de garantir la reproductibilité des résultats. Leurs surfaces sont d'abord frottées à l'aide d'un papier abrasif afin d'éliminer les impuretés et les dépôts éventuels. Elles sont ensuite rincées à l'eau distillée, puis plongées dans une solution acide (HCl, 0,1 M) pendant quelques minutes afin d'éliminer toute couche d'oxyde superficielle susceptible de perturber le transfert de charge. Enfin, elles sont de nouveau rincées à l'eau distillée, séchées et pesées à l'aide d'une balance de précision, afin de déterminer la perte en masse de l'anode en fin d'expérience.

II.4.2. Déroulement des essais

Les essais ont été menés en mode discontinu (batch) dans un volume réactionnel de 450 mL, sous agitation constante à 100 rpm et à température ambiante. Les électrodes ont été entièrement immergées dans le milieu réactionnel avant le démarrage de chaque essai. Après la mise en place du couvercle et le réglage du générateur aux conditions opératoires souhaitées (intensité, tension), le traitement est lancé. Des prélèvements liquides de 2 ml sont effectués à intervalles de temps réguliers via le port d'échantillonnage, puis centrifugés à 50 tr/min pendant 10 minutes, afin d'éliminer les floccs formés et de permettre la détermination du

taux d'abattement de la DCO (%). Le volume de gaz produit est mesuré en parallèle à l'aide du système de déplacement d'eau.

II.4.3. Étude de l'effet des paramètres physico-chimiques sur la performance du procédé

L'étude porte sur l'influence de quatre paramètres opératoires sur l'efficacité du procédé d'électrocoagulation, à savoir : le pH initial, l'intensité du courant appliqué, le temps d'électrolyse et la concentration initiale de la solution. L'impact de ces variables a été quantifié à travers les indicateurs suivants :

a. Taux d'abattement de la DCO (%)

La performance de traitement vis-à-vis de la matière organique est évaluée par le taux d'élimination de la demande chimique en oxygène, donné par l'équation suivante :

$$DCO(\%) = \frac{DCO_0 - DCO_t}{DCO_0} \times 100 \dots \dots \dots (11)$$

Avec :

DCO_0 : Demande chimique en oxygène au temps 0 (mg L^{-1})

DCO_t : Demande chimique en oxygène au temps t (mg L^{-1})

b. Réduction de la turbidité (%)

c. La clarification de la solution est suivie par le taux de réduction de la turbidité :

$$T(\%) = \frac{T_0 - T_t}{T_0} \times 100 \dots \dots \dots (12)$$

Avec

T_0 : Turbidité au temps 0 (NTU)

T_t : Turbidité au temps t (NTU)

c. Perte en masse de l'anode

La dissolution anodique est quantifiée par la différence de masse de l'anode avant et après chaque essai :

$$\Delta m = m_0 - m_t \dots \dots \dots (13)$$

Où m_0 et m_t sont les masses de l'anode (g) avant et après électrocoagulation. Cette valeur est comparée à la dissolution théorique prédite par la loi de Faraday :

$$m_{th} = \frac{I \cdot t \cdot M}{F \cdot n} \dots \dots \dots (14)$$

Avec :

I : intensité du courant (A)

t : durée d'électrolyse (s)

M : masse molaire de l'aluminium = 26,98 g/mol

n : nombre d'électrons échangés = 3

F : constante de Faraday = 96 485 C/mol

d. Volume de dihydrogène produit (ml)

Le volume cumulatif de H₂ produit à la cathode est mesuré par déplacement d'eau. La quantité de dihydrogène théorique produite lors du procédé d'électrocoagulation est déterminée à partir de la relation suivante :

$$n_{H_2} = \frac{J \cdot A \cdot t \cdot H}{F} \dots \dots \dots (15)$$

Avec :

- n_{H_2} : nombre de moles de gaz d'hydrogène produit (mol)
- J : densité de courant (A/m²)
- A : aire totale de l'électrode (m²)
- t : temps d'électrolyse (s)
- H : nombre de molécules d'hydrogène produites par électron lors de la réaction redox,

$$H = \frac{I}{2}$$

- F : constante de Faraday (96 485 C/mol)
- Le volume correspondant de dihydrogène est ensuite calculé en appliquant la loi des gaz parfaits.

$$PV = nRT \dots \dots \dots (16)$$

Avec :

P : pression atmosphérique (Pa)

V : volume de gaz produit (m³)

n : quantité de matière (mol)

R : constante des gaz parfaits = 8,2057 m³·Pa/(mol·K)

T : température ambiante (K)

e. Collecte et identification du gaz produit :

Afin de confirmer la nature du gaz généré lors du procédé d'électrocoagulation, le gaz libéré à la sortie du réacteur a été collecté dans une poche de prélèvement étanche. L'échantillon ainsi obtenu a été soumis à une analyse par détection gazeuse, permettant de déterminer la composition du mélange gazeux recueilli et d'identifier la présence d'hydrogène (H₂).

II.5 Consommation énergétique :

Afin d'évaluer les performances économiques du procédé d'électrocoagulation mise en œuvre, il est important de quantifier la consommation énergétique associée à chaque essai ,

En effet , l'énergie électrique constitue la principale source de ce type de traitement , et son optimisation représente un enjeu majeur pour l'application à l'échelle industrielle
Elle dépend directement des paramètres électriques appliqués au réacteur et elle est déterminée par la formule suivante [51]:

$$E = \frac{U.I.t}{Vr} \dots \dots \dots (17)$$

Avec :

E : la consommation énergétique (Wh/m³)

I : intensité électrique (A)

U : la tension appliquée aux électrodes (V)

t : le temps d'électrolyse (h)

Vr : Volume de l'effluent traité, en m³ ou en L

Chapitre 3 : Résultats et discussions

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des principaux résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude du procédé d'électrocoagulation appliqué à un effluent laitier. Dans un premier temps, une caractérisation physico-chimique de l'effluent avant traitement est présentée afin de constituer une base de référence pour l'évaluation des performances du traitement.

Par la suite, une étude détaillée est menée sur l'influence des principaux paramètres opératoires du procédé, notamment le pH initial, le temps d'électrolyse, la densité de courant et la concentration du polluant, sur le taux d'abattement de la demande chimique en oxygène (DCO), la turbidité ainsi que sur la production du gaz contenant l'hydrogène. L'ensemble des résultats obtenus permet de déterminer les conditions optimales de fonctionnement assurant une élimination maximale de la DCO. En outre, une étude est consacrée à la dissolution de l'anode sacrificielle. Enfin, la production d'hydrogène générée au cours du traitement est mise en évidence et quantifiée, confirmant ainsi le potentiel énergétique associé à ce procédé.

III.1. Caractérisation physico-chimique de l'effluent simulé avant le traitement par électrocoagulation

Les effluents laitiers se caractérisent généralement par une forte charge en matière organique, due principalement aux pertes de lait au cours des différentes étapes de la production. Ils contiennent essentiellement de l'eau, des résidus de lait, du lactose, des protéines, des matières grasses ainsi que des traces de produits laitiers dilués. La composition et les caractéristiques de ces effluents varient considérablement en fonction du type de transformation réalisée sur le site industriel (production de lait de consommation, de fromage, de yaourt ou de poudre de lait) ainsi que des opérations de nettoyage mises en œuvre [15].

Nous avons procédé à la caractérisation de l'effluent synthétique préparé au laboratoire en déterminant ses caractéristiques initiales sont le pH, la conductivité électrique, les solides dissous totaux (TDS), la turbidité et la demande chimique en oxygène (DCO).

Les résultats de la caractérisation physico-chimique de l'effluent sont présentés dans le *Tableau 11*.

Tableau 11, Caractéristiques physico-chimiques initiales de l'effluent synthétique

Paramètre	Unité	Valeur mesurée
Turbidité	NTU	1844
Conductivité	mS/cm	3,92
TDS	g/L	2,004
pH	/	7,13
DCO	mg O ₂ /L	2416,5

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que l'effluent synthétique préparé présente des caractéristiques physico-chimiques proches de celles d'un effluent laitier réel, selon la littérature, avec notamment une turbidité très élevée, une charge organique importante et un pH quasi-neutre. L'ensemble de ces paramètres confirme la représentativité de l'effluent simulé et justifie son utilisation comme substrat d'essai pour les expériences d'électrocoagulation.

La turbidité mesurée est de 1844 NTU, traduisant une très forte teneur en matières en suspension (MES) au sein de l'effluent. Ces valeurs élevées s'expliquent par la présence de particules colloïdales de graisses et de protéines issues du lait en poudre dissous. Une turbidité aussi élevée est caractéristique des effluents laitiers bruts et constitue l'un des principaux critères de pollution à éliminer.

La conductivité électrique de l'effluent synthétique est 3,92 mS/cm. Une conductivité suffisante est indispensable pour minimiser la résistance ohmique de la solution et permettre la circulation du courant électrique entre les électrodes lors du traitement par électrocoagulation.

La valeur mesurée du TDS, de 2,004 g/L, indique une concentration significative en espèces ioniques et en matières dissoutes. Cette valeur est cohérente avec la conductivité mesurée, les deux paramètres étant étroitement liés par la mobilité ionique en solution.

Le pH initial de l'effluent synthétique mesuré à 7,13 correspond à une valeur neutre et s'aligne avec les données de la littérature concernant les effluents laitiers. Un pH neutre est favorable au procédé d'électrocoagulation utilisant des électrodes en aluminium, car il favorise la formation d'hydroxydes d'aluminium Al(OH)₃ en phase solide, lesquels agissent comme agents coagulants actifs responsables de la capture des polluants colloïdaux.

La demande chimique en oxygène (DCO) initiale de l'effluent est de 2416,5 mg_{O2}/L, reflétant une charge organique très élevée. Cette valeur est caractéristique des effluents laitiers réels. La DCO constitue le principal paramètre de référence pour évaluer l'efficacité du traitement.

Le taux d'abattement sera calculé après chaque essai d'électrocoagulation afin de quantifier les performances du procédé.

En résumé, l'ensemble des résultats obtenus confirme que l'effluent synthétique préparé présente des caractéristiques similaires à celles d'un effluent laitier réel en termes de charge polluante et de propriétés physico-chimiques. Par conséquent, Il constitue donc un substrat d'essai approprié pour l'étude du procédé d'électrocoagulation dans le cadre de ce travail.

III.2 Étude de l'effet des paramètres opératoires influençant le taux d'abattement et la turbidité

Afin d'optimiser les performances du traitement de notre système d'électrocoagulation, nous présentons ci-après une étude détaillée de l'influence de chaque paramètre sur les principaux indicateurs de pollution, à savoir la turbidité et la demande chimique en oxygène (DCO).

III.2.1 Effet du pH initial

Le pH est l'un des paramètres les plus importants influençant le procédé d'EC, puisqu'il affecte la forme chimique des espèces métalliques dissoutes ainsi que la formation des hydroxydes métalliques responsable de la coagulation.

Dans cette étude, les paramètres opératoires ont été fixés à une concentration en poudre de 2,5 g/L, une densité de courant de 62,5 mA/cm² et un temps d'électrolyse de 50 minutes.

a) Influence sur l'abattement de la DCO

La variation de DCO en fonction du pH est présentée dans la Figure 6.

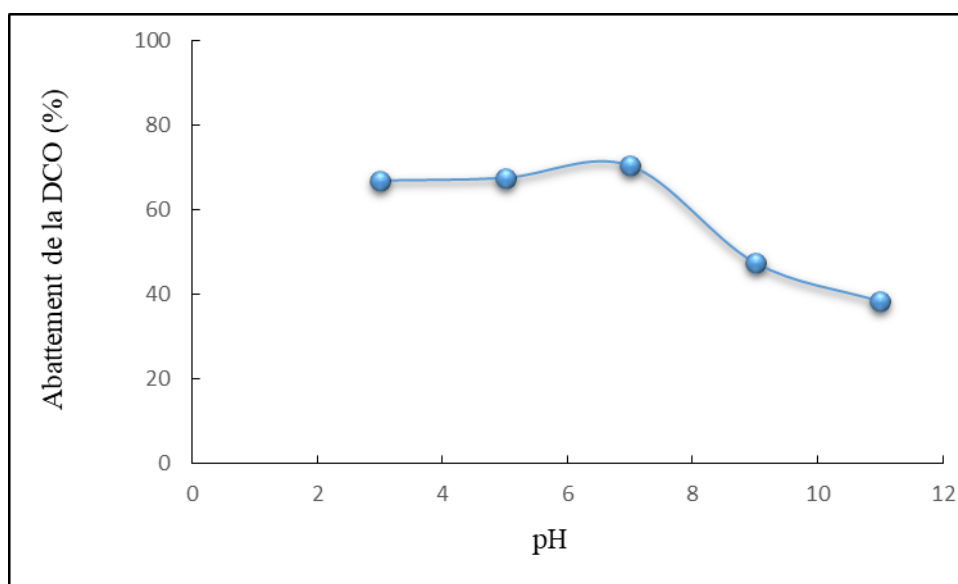


Figure 6, Abatement de la DCO en fonction du pH initial

D'après la figure ci-dessus, nous avons observé que l'élimination de la DCO augmente avec l'augmentation du pH, pour atteindre sa valeur maximale à pH 7, avec un abatement de 70,37%.

En milieu acide (pH3 et pH5), les rendements sont élevés (66,85 % et 67,47 % respectivement). Cependant, lorsque le milieu devient basique (pH9), l'efficacité du traitement diminue fortement, avec un rendement de 47,49 % à pH9, et un minimum de 38,3% à pH11.

b) Influence sur la turbidité

Les histogrammes ci-dessous montrent l'effet du pH initial de l'effluent (allant de 3 à 11) sur le rendement d'élimination de la turbidité après traitement par électrocoagulation. La turbidité initiale de l'effluent était de 1844 NTU.

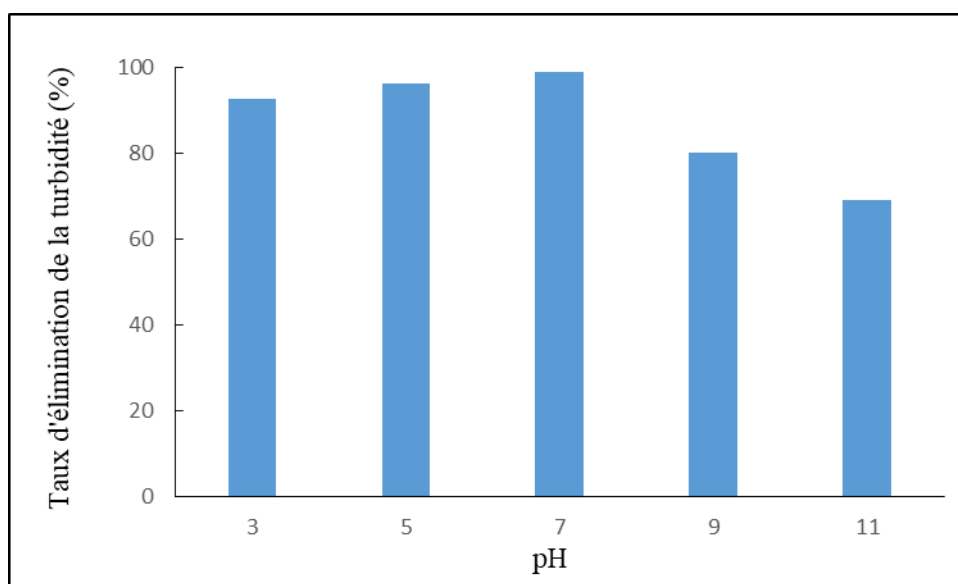


Figure 7, Taux d'élimination de la turbidité en fonction du pH initial

D'après la figure 7, le rendement d'élimination de la turbidité atteint sa valeur maximale à un pH de 7 avec un taux de 98,87 % rendant l'effluent totalement limpide. Par ailleurs, en milieu acide (pH=3 et pH=5), les taux d'élimination restent élevés, atteignant respectivement de 92,62% et 96,20%. L'efficacité de clarification diminue d'environ 18 % en milieu alcalin (pH=9), avec un rendement de 80,10%, et atteint son niveau le plus bas de 69,03% pour un pH=11.

Les figures 6 et 7 démontrent que l'élimination de la charge organique et la clarification de l'effluent sont régies par le même phénomène chimique, et ce comportement dépend directement des différentes formes que prend le métal dans l'eau selon le pH :

- A pH 7, le milieu neutre favorise la formation d'hydroxydes métalliques solides et insolubles ($\text{Al}(\text{OH})_3$), qui agissent comme coagulants emprisonnant les matières en suspension (MES), notamment les protéines et les graisses responsables de la turbidité de l'eau, par agglomération sous forme de floccs. Ces particules colloïdales sont ensuite entraînées vers la surface par flottation, portées par les bulles d'hydrogène générées à la cathode.

- En milieu acide, l'aluminium est sous forme Al^{3+} et le traitement reste efficace (plus de 66% pour la DCO et plus de 92% pour la turbidité), car ces ions positifs neutralisent les charges négatives des polluants d'origine laitière, facilitant ainsi l'agrégation des particules [52].
- En milieu alcalin, l'excès d'ions OH^- formé empêche la formation des hydroxydes métalliques nécessaires à la capture des polluants. Le métal se transforme alors en ions complexes chargés négativement $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (ion aluminate), qui ne possèdent aucun pouvoir coagulant. Par conséquent, les floccs ne peuvent pas se former, le phénomène de répulsion électrostatique aura lieu, et la pollution reste suspendue dans l'eau, ce qui se traduit par une réduction de l'efficacité du traitement (DCO et turbidité très élevée) [53,54].

Ces résultats confirment de manière claire que le $\text{pH}=7$ est la condition opératoire optimale permettant de maximiser simultanément la dégradation de la pollution chimique (DCO) et physique (la turbidité).

III.2.1.2 Variation du pH après traitement

La Figure 8 présente les variations des valeurs de pH 3, 5, 7, 9 et 11 observées lors du traitement à une densité de courant de $62,5 \text{ A/cm}^2$ pendant une durée de réaction de 50 minutes.

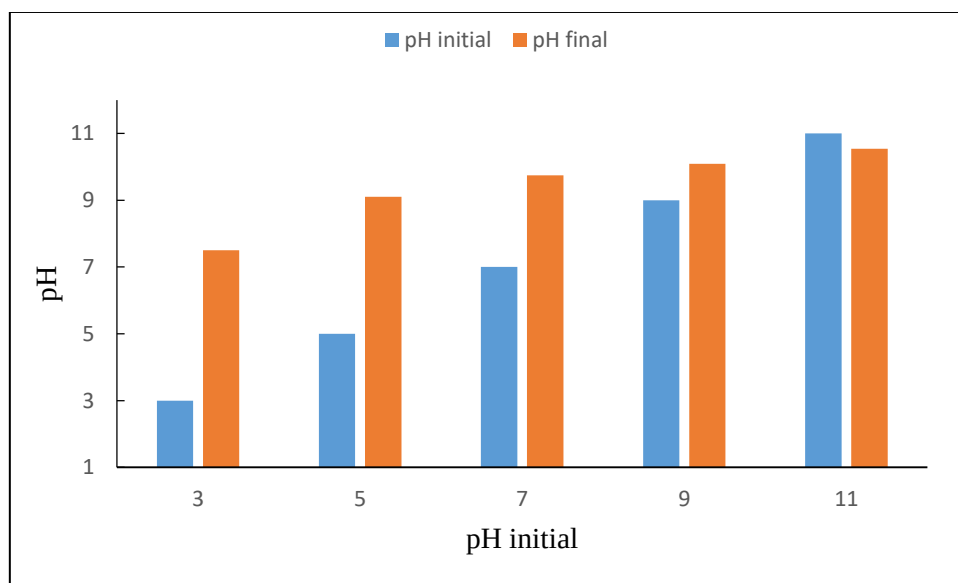


Figure 8, Variation du pH de l'effluent avant et après traitement

Une augmentation significative du pH a été observée à la fin du traitement pour des conditions acide et neutre, avec des valeurs passant respectivement de 3 à 7,5, de 5 à 9,1 et de 7 à 9,74. Pour un pH initial de 9, une légère augmentation a été constatée, atteignant 10,09. En revanche, à pH 11, une légère diminution a été enregistrée, le pH final étant de 10,54.

De plus, les conditions fortement basiques de cet essai ont provoqué une corrosion marquée de la cathode (électrode en acier inoxydable, comme l'illustre la figure 9).



Figure 9, Etat de la cathode après traitement à pH=11.

L'augmentation du pH est due aux ions hydroxydes OH^- et au dihydrogène généré au niveau de la cathode lors de la réduction de l'eau ; les ions OH^- neutralisent l'acidité du milieu et rendent progressivement la solution alcaline [27]. La légère diminution du pH à 11 s'explique par la formation des ions $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Au cours de la réaction, les ions hydroxydes produits à la cathode sont consommés par l'aluminium libéré par les plaques métalliques.

Ces ions basiques, piégés lors de la formation de l'aluminate, entraînent une diminution de la basicité globale et provoquent ainsi une légère chute du pH de l'effluent [34], selon la réaction suivante :



Les conditions fortement alcalines ($\text{pH} = 11$), combinées à l'application d'un courant électrique, peuvent altérer la stabilité de la couche de passivation de l'acier inoxydable et favoriser des phénomènes de corrosion. Ainsi, les milieux fortement basiques sont susceptibles d'accélérer la dégradation des équipements tout en réduisant l'efficacité du traitement [28].

III.2.2 Effet du temps d'électrolyse

La figure 10 illustre l'évolution de la DCO en fonction du temps d'électrolyse, pour un pH 7, une densité de courant de 62,5 mA/cm² et une concentration en poudre de lait de 2,5g/L.

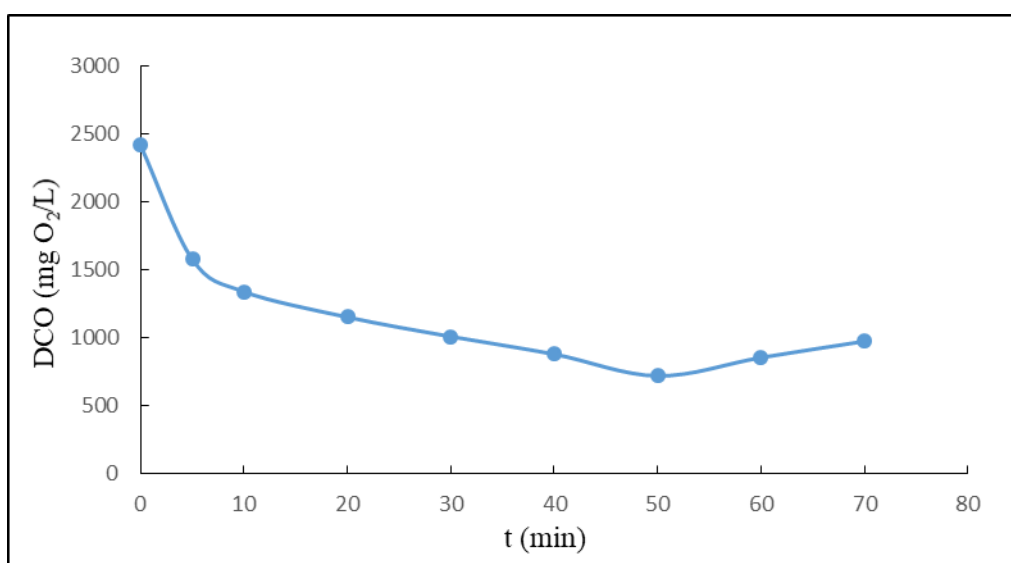


Figure 10, Cinétique d'évolution de la DCO en fonction du temps.

Selon la figure .., le temps d'électrolyse lors du processus d'électrocoagulation a une influence significative sur la réduction de la DCO. Une diminution continue de la DCO a été observée au fil du temps, atteignant environ 50 minutes, avec une baisse de 2416,5 mg_{O₂}/L à un 716 mg_{O₂}/L, soit un taux d'abattement de 70,37 %. Au-delà de cette période, la réduction de la DCO s'interrompt et une stabilisation, voire une légère augmentation, est observée. En effet, des expériences préliminaires ont révélé qu'au-delà de cette durée d'électrolyse, le taux d'abattement varie très légèrement, voire reste presque constant.

En effet, pendant les 50 premières minutes, la dissolution de l'anode libère des ions d'aluminium Al^{3+} , qui réagissent avec les ions hydroxydes OH^- libérés à la cathode pour former les hydroxydes d'aluminium, principalement $Al(OH)_3$. Ces hydroxydes constituent les principales espèces coagulantes du procédé et leur formation est favorisée tant que la charge polluante est élevée. Les floccs ainsi formés adsorbent les composés organiques responsables de la DCO et sont entraînés vers la surface par les bulles de dihydrogène (H_2) produites à la cathode, facilitant leur séparation du milieu liquide.

L'augmentation de la DCO au bout de 50 minutes est attribuée probablement aux phénomènes suivants :

- Au-delà de 50min, les floccs d' $Al(OH)_3$ qui ont adsorbé les polluants commencent à les relâcher dans la solution, ce qui entraîne une augmentation de la DCO.

- Par ailleurs, comme indiqué précédemment, le pH après traitement a augmenté jusqu'à 9,74, favorisant la formation des ions aluminate $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ solubles, caractérisé par une faible capacité d'adsorption et donc diminution de l'efficacité du traitement[38].

En conclusion, le temps optimal d'électrolyse pour le traitement de cet effluent est de 50 min.

III.2.3 Effet de la densité du courant

Afin d'étudier l'influence de la densité de courant, une série d'essais a été réalisée en appliquant les densités de courant suivantes : 12,5 ; 25 ; 37,5 ; 50 et 62,5 mA/cm².

a) Influence sur l'abattement de la DCO

Selon la figure 11, le rendement d'élimination de la DCO augmente progressivement avec la densité du courant, passant de 54,02 % à 12,5 mA/cm² pour atteindre un maximum de 70,37 % à 62,5 mA/cm².

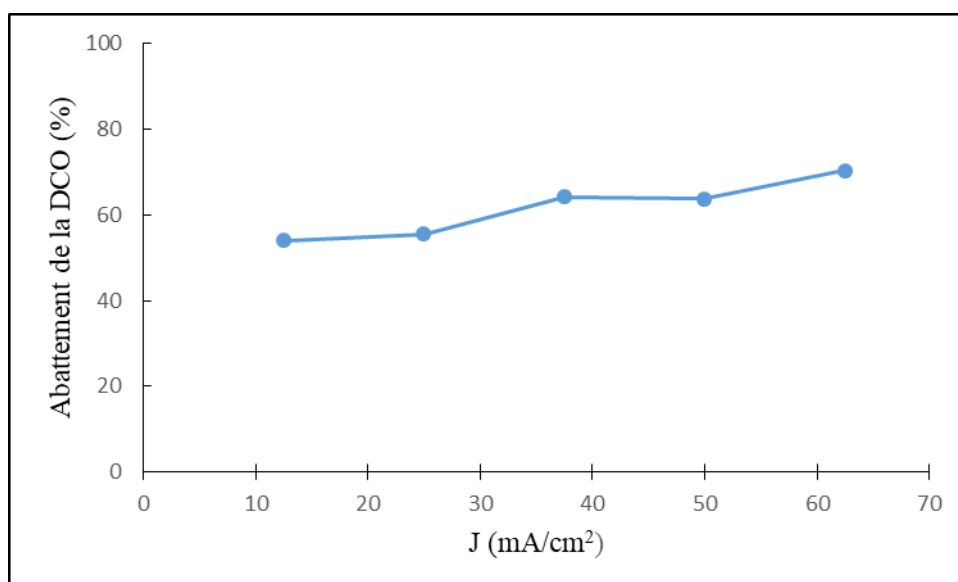


Figure 11, Variation de l'abattement de la DCO en fonction de la densité de courant (J).

Une légère diminution est également observée entre $J=37,5$ mA/cm² et $J=50$ mA/cm², mais celle-ci reste négligeable et peut être attribuée à la variabilité expérimentale.

Cette augmentation s'explique par la loi de Faraday : une densité plus élevée du courant entraîne une dissolution importante de l'anode, produisant ainsi davantage d'ions métalliques Al^{3+} qui forment des floccs capables de piéger une grande quantité de pollution organique.

b) Influence sur la turbidité

D'après la figure 12, l'évolution de la turbidité présente une tendance croissante, avec une progression plus rapide aux faibles densités. Cela qu'une faible augmentation du courant suffit à améliorer l'élimination des particules en suspension.

A partir de $J=50 \text{ A/m}^2$, les valeurs se stabilisent autour de 98% car la production de coagulant devient suffisante pour éliminer la totalité des particules. Dans ces conditions, une augmentation supplémentaire du courant n'améliore plus la turbidité.

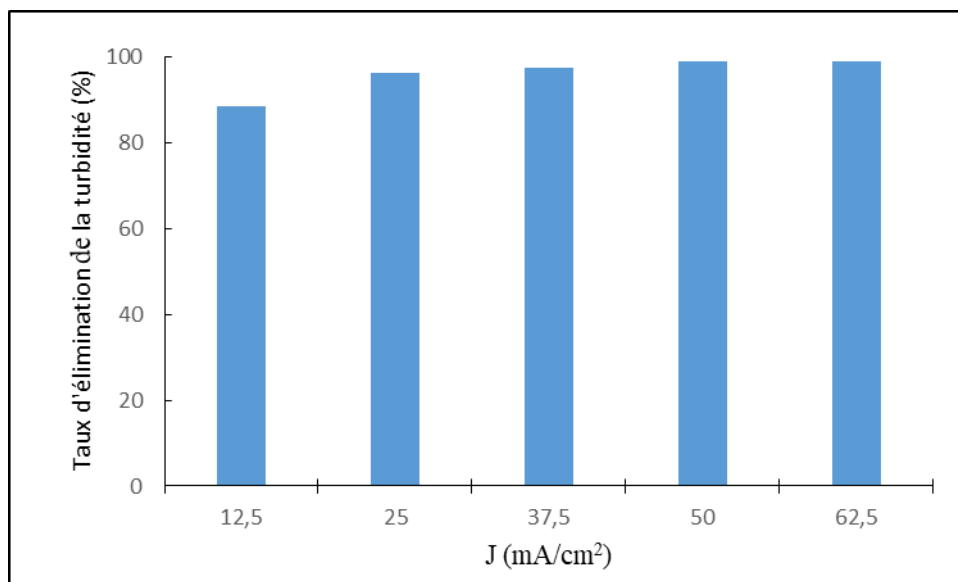


Figure 12, Taux d'élimination de la turbidité en fonction de la densité du courant (J).

Les résultats obtenus montrent qu'une densité du courant de $62,5 \text{ A/m}^2$ permet d'obtenir les meilleurs rendements (70,37 % pour la DCO et 98,87 % pour la turbidité). Cependant, un choix technico-économique s'impose car un courant plus fort augmente la consommation énergétique et, par conséquent, le coût d'exploitation du procédé.

III .2.4. Effet de la concentration en poudre du lait

Le tableau 12 présente les concentrations initiales de la DCO correspondant aux différentes concentrations en poudre de lait utilisées pour la préparation de l'effluent.

Tableau 12, La DCO initiale pour chaque masse de poudre de lait.

Concentration de poudre (g/L)	DCO (mgO_2/L)
1	921
2,5	2416,5
5	3878

a) Influence sur l'abattement de la DCO

La figure 13 illustre l'effet de la masse de poudre de lait sur les rendements d'élimination de la charge organique après 50 minutes de traitement.

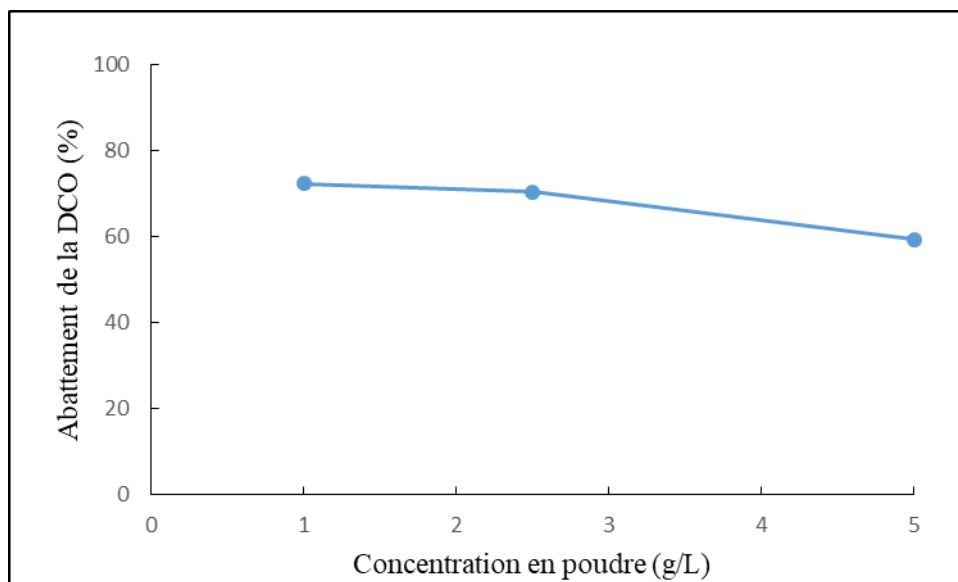


Figure 13, Effet de la masse de poudre sur l'abattement de la DCO

Le taux d'élimination de la DCO reste relativement stable pour des concentrations en poudre de lait entre 1g/L et 2,5g/L, avec des rendements respectifs de 72,38 % et 70,37 %. Cependant, une diminution significative a été observée à une concentration de 5 g/L, avec un rendement de 59,36%.

L'augmentation de la concentration en poudre de lait ajoutée entraîne une diminution de la DCO, ce qui est cohérent avec les principes théoriques. Puisque le courant et la durée d'électrolyse sont maintenus constants, la loi de Faraday indique que la quantité d'aluminium libérée par l'anode, est donc la quantité des floccs hydroxyde formés, reste constante. Ces résultats peuvent être expliqués comme suit :

- À 1 g/L (DCO = 921mg O₂/L), le rapport entre la quantité de coagulant générée et la charge polluante est très favorable. Les floccs d'Al(OH)₃ sont présents en quantité suffisante pour adsorber les protéines et les matières grasses, ce qui explique le rendement de 72,38 %.
- À 2,5 g/L (DCO = 2416,5 mg O₂/L), l'augmentation de la concentration en matière organique entraîne une légère diminution du rapport entre la quantité de coagulant généré et la charge polluante. Toutefois, ce rapport reste suffisant pour maintenir un abattement satisfaisant de 70,37 %, proche de l'optimum.

- À 5 g/L (DCO = 3878 mg O₂/L), la charge organique devient plus importante et la quantité de floccs produite devient insuffisante pour adsorber l'ensemble des matières organiques dans ce qui entraîne une diminution du rendement à 59,36 %.

c) Influence sur la turbidité

D'après la figure 14, le rendement d'élimination de la turbidité dépend de la concentration en poudre de lait utilisée pour préparer l'effluent.

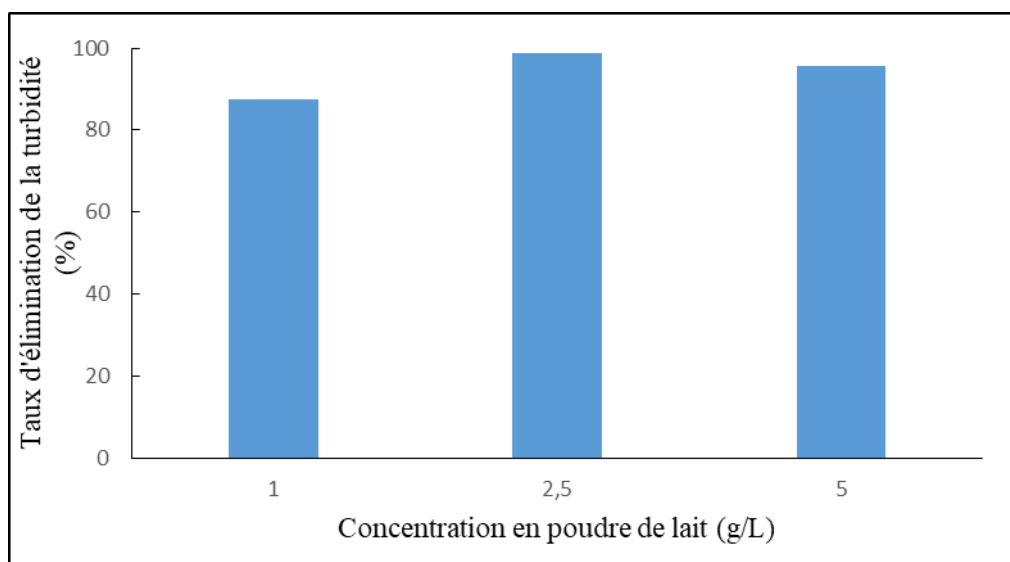


Figure 14, Effet de la masse de poudre sur l'élimination de la turbidité.

- À 1 g/L de poudre, le taux d'élimination de la turbidité atteint environ 87,95 %. A cette faible charge organique, la quantité de particules en suspension est relativement limitée. Les floccs d'hydroxydes d'aluminium formés sont suffisants pour neutraliser et agglomérer efficacement les colloïdes présents, mais certaines particules fines peuvent rester en solution, ce qui explique un rendement légèrement inférieur.
- À 2,5 g/L de poudre, le taux d'élimination de la turbidité augmente jusqu'à 98,87%. Cette valeur traduit un équilibre optimal entre la quantité de flocc produit et la charge colloïdale à éliminer. Dans ces conditions, les agrégats Al(OH)₃ assurent l'adsorption et l'entraînement des particules colloïdales, tandis que les bulles d'H₂ favorisent leur séparation par électroflottation, améliorant ainsi l'efficacité globale du procédé [57,58].
- À 5 g/L, le taux d'élimination de la turbidité obtenu est de 95,55 %. Toutefois, l'augmentation de la charge organique favorise la formation des floccs plus volumineux et plus denses. Ces floccs formés deviennent très lourds et nombreux pour être entraînés efficacement par les bulles d'hydrogène.

Les deux figures précédentes indiquent quela concentration de 2,5 g /L de poudre de lait (2416,5 mg O₂/L) représente le point de fonctionnement optimal du réacteur d'électrocoagulation. A cette concentration, une clarification de 98,87 %, une réduction significative de la DCO de 70,37 % et une utilisation efficace du coagulant sans gaspillage sont simultanément obtenues.

III.2.5. Caractéristiques de l'effluent laitier traité par électrocoagulation dans les conditions opératoires optimales

Après le traitement par électrocoagulation, une modification significative des caractéristiques de l'effluent a été observée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 14:

Tableau 13, Caractéristiques de l'effluent avant et après traitement.

Paramètre	Unité	Avant traitement	Après traitement
Turbidité	NTU	1844	20,9
Conductivité	mS/cm	3,92	3,1
TDS	g/L	2,004	1,545
pH	/	7,13	9,56
DCO	mg O ₂ /L	2416,5	716

Nous avons constaté :

- Une diminution quasi-totale de la turbidité a été rapportée après traitement.
- L'abattement de la DCO est significatif grâce aux conditions opératoires optimisées.
- La diminution des TDS et de la conductivité reflète l'élimination d'une partie des espèces ioniques et colloïdales [55,56].
- L'élévation du pH résultant de la production en excès d'ions hydroxyle à la cathode lors de la réduction de l'eau.

Ces résultats confirment clairement que le pH 7 est la condition opératoire optimale permettant de maximiser simultanément la dégradation de la pollution chimique (DCO) et de la turbidité.

La figure 15 illustre le changement de l'aspect visuel de l'effluent après 50 min de traitement.

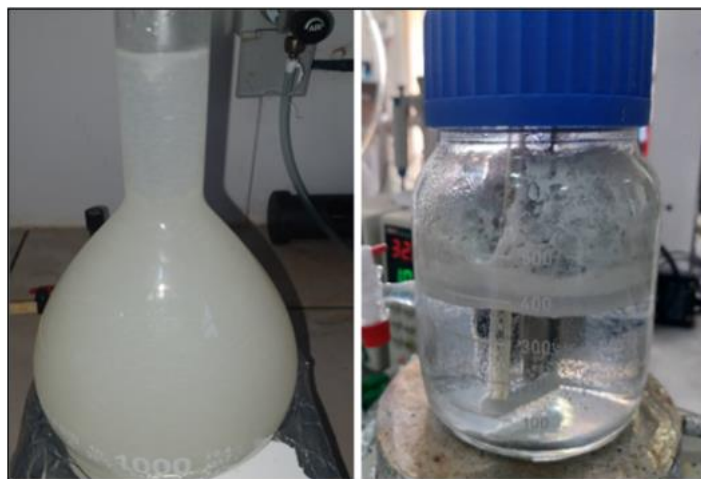


Figure 15, Comparaison de l'effluent brut et de l'effluent traité.

III.3 Masse dissoute de l'anode sacrificielle

L'évaluation de la masse dissoute de l'anode sacrificielle constitue une étape fondamentale dans l'étude du procédé d'électrocoagulation, car elle détermine la quantité de coagulant disponible dans l'effluent l'élimination des polluants.

Cette masse est calculée théoriquement par la loi de Faraday, en appliquant des densités de courant de 12,5, 25, 37,5, 50 et 62,5 mA/cm² pendant 50 minutes, avec une concentration en poudre de lait de 2,5g/L.

En pratique, la masse dissoute (m-expérimentale) a été mesurée par pesée précise des plaques d'anode avant et après chaque essai.

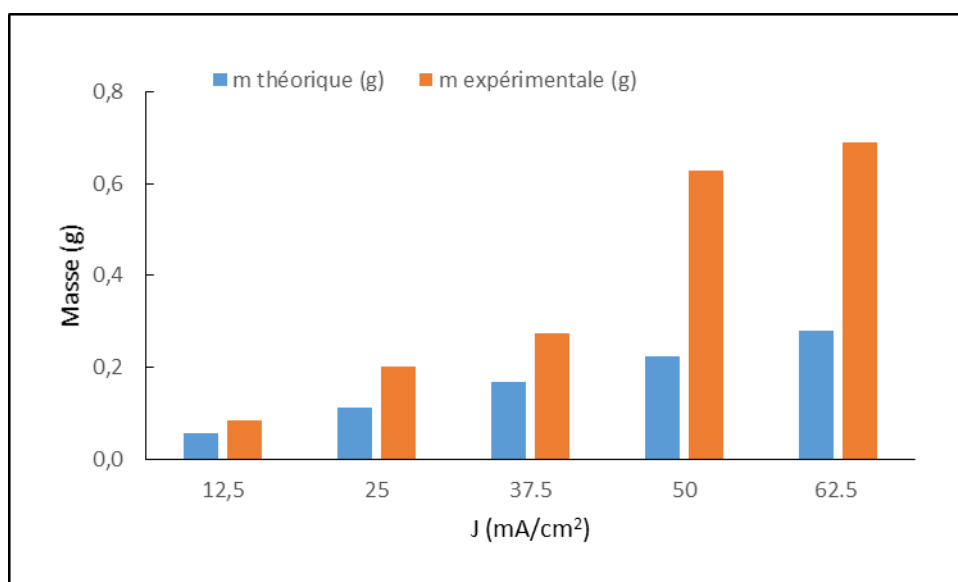


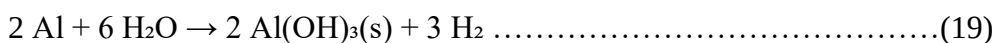
Figure 16, Comparaison entre la masse théorique et expérimentale de l'anode dissoute en fonction de la densité du courant.

La figure 16, montre que les deux masses, théorique et expérimentale, augmentent avec la densité du courant, conformément à la loi de Faraday. Plus la densité de courant (J) augmente, plus d'électrons circulent et plus d' Al^{3+} se libèrent, ce qui conduit à une croissance linéaire de la masse théorique.

Il a également été observé que la masse expérimentale est toujours supérieure à la masse théorique, et que cet écart s'accroît avec l'augmentation du courant. La dissolution de l'anode dépasse systématiquement les prévisions de Faraday, ce qui s'explique par combinaison de plusieurs phénomènes :

1. Corrosion chimique directe :

Etant donné que l'effluent contient divers ions, l'aluminium peut subir une attaque chimique par l'eau et ces ions, selon la réaction suivante :



Cette réaction se produit à la surface de l'anode, indépendamment du courant, et s'ajoute à la dissolution faradique [42].

2. Dégradation de la couche protectrice :

L'aluminium est protégé par une couche d'oxyde Al_2O_3 . Lorsque l'effluent contient les ions Cl^- (CaCl_2 , NH_4Cl), ceci peut provoquer une corrosion par piquûre, entraînant une dissolution rapide de l'anode [43].

Ce phénomène peut également résulter d'un effet mécanique, à des densités de courant très élevées, la production accrue de bulles de gaz génère une turbulence dans le milieu qui détruit la couche d' Al_2O_3 , ce qui augmente la dissolution chimique de l'aluminium [44].

III.4 Effet des paramètres opératoires sur la production du gaz par électrocoagulation

L'étude paramétrique vise à identifier les conditions opératoires optimales favorisant la récupération de l'hydrogène à partir d'un effluent laitier, en examinant spécifiquement l'effet du pH du milieu, de la densité de courant appliquée et de la concentration du polluant. Le temps de traitement a été fixé à 50 min, correspondant à la durée nécessaire au procédé d'électrocoagulation pour assurer l'élimination de la DCO. Il est à noter que le gaz collecté au cours de ces essais n'est pas de l'hydrogène pur, mais un mélange gazeux pouvant contenir d'autres espèces produites au niveau des électrodes, ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation des volumes mesurés.

III.4.1. Effet du pH

Cette partie examine l'effet du pH initial (pH 3, 5, 7, 9 et 11) sur la production du gaz à une densité de courant de $62,5 \text{ mA/cm}^2$. Comme indiqué dans la Figure ci-contre, le volume de

gaz le plus élevé (555 ml) a été obtenu à pH neutre (pH 7), traduisant l'existence d'un optimum de production gazeuse autour de la neutralité.

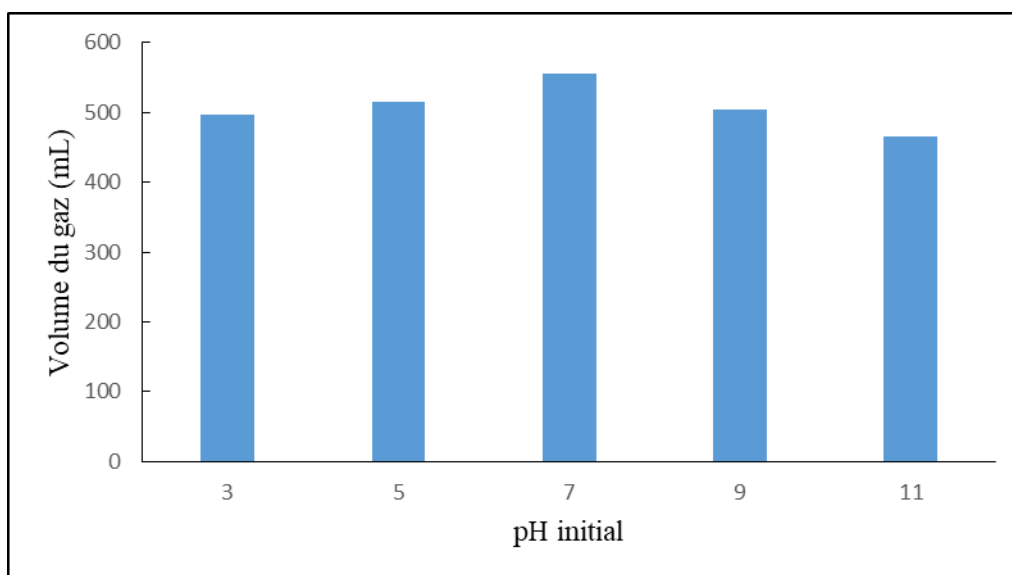
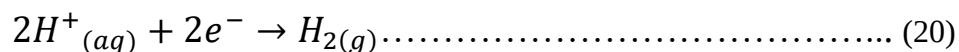


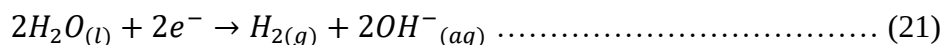
Figure 17, Effet du pH initial sur la production du gaz

En milieu acide (pH 3 et 5), la réaction cathodique principale est la réduction directe des protons H^+ selon l'équation :



Cependant, une forte concentration en protons limite la précipitation des espèces aluminiques. Les ions Al^{3+} restent majoritairement sous forme soluble et ne contribuent pas efficacement à la formation des floccs $Al(OH)_3$, ce qui réduit l'efficacité globale du procédé et la quantité de gaz collectée [24].

En milieu neutre et alcalin, la réaction cathodique responsable du dégagement de l'hydrogène est :



Les bulles d'hydrogène produites à pH neutre sont fines et homogènes, favorisant la création d'une interface liquide-gaz-solide propice à l'accumulation et à la flottation des particules colloïdales. Cette configuration contribue à augmenter la quantité nette de gaz collecté.

En milieu basique (pH 9 et 11), une diminution progressive du volume de gaz a été observée, respectivement de 505 ml et 465 ml. Bien que la réaction cathodique demeure identique à

celle observée en milieu neutre, lorsque le pH dépasse 9, l'espèce prédominante de l'aluminium en solution devient l'ion tétrahydroxoaluminate Al(OH)_4^- , une espèce amphotère soluble qui ne forme pas de floccs et se redissout dans la solution [41].

En synthèse, ces résultats confirment que l'efficacité maximale du procédé d'électrocoagulation, en termes de production gazeuse, est obtenue pour des pH proches de la neutralité (pH 7). En conséquence, le pH initial de 7 sera retenu comme condition optimale pour la suite de l'étude paramétrique.

III.4.2. Effet de la densité du courant

Dans cette partie, l'effet de la densité de courant sur le volume de gaz produit a été étudié pour des densités de courant de 12,5 ; 25 ; 37,5 ; 50 et 62,5 mA/cm^2 . Les résultats montrent que le volume de gaz produit augmente avec l'augmentation de la densité de courant. Le volume maximal a été obtenu en appliquant 62,5 mA/cm^2 .

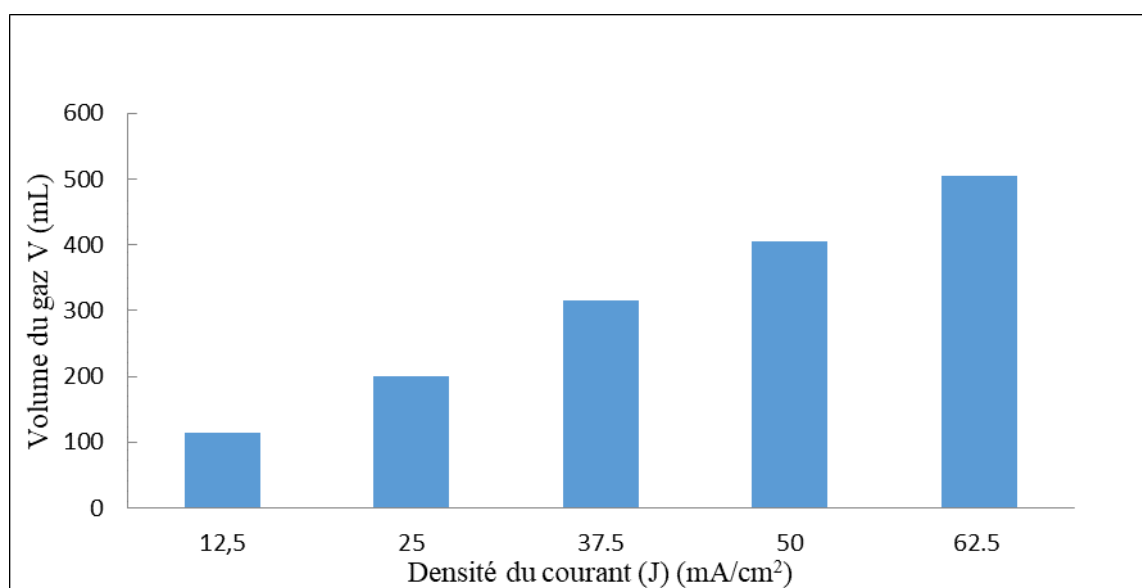


Figure 18, Effet de la densité de courant sur la production du gaz

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que le volume de gaz produit augmente de manière progressive et régulière avec l'augmentation de la densité de courant.

Cette augmentation s'explique par la loi de Faraday. Une densité de courant plus élevée implique un flux d'électrons plus important entre les électrodes, ce qui accélère la réaction cathodique de dégagement de l'hydrogène selon l'équation (21)

En effet, à des densités de courant élevées, le taux d'électrons libérés dans le milieu à partir de l'électrode en aluminium est plus important, ce qui favorise à la fois la dissolution anodique de l'aluminium (production de floccs $\text{Al}(\text{OH})_3$) et la production cathodique d'hydrogène gazeux. Plus la densité de courant augmente, plus la quantité d' H_2 dégagée par unité de temps est élevée [42].

En synthèse, ces résultats confirment que la densité de courant est un paramètre déterminant pour la production d'hydrogène par électrocoagulation. Une densité de courant de $62,5 \text{ A/m}^2$ assure la production gazeuse maximale dans nos conditions expérimentales.

III.4.3. Effet de la concentration du polluant

Cette partie présente l'étude de l'effet de la concentration initiale du polluant sur la production du gaz, en variant la concentration de lait en poudre introduite dans le réacteur (1 g/L, 2,5 g/L et 5 g/L) à un pH de 7 et à une densité de courant de $62,5 \text{ mA/cm}^2$. Comme indiqué dans la Figure 19, le volume de gaz produit diminue avec l'augmentation de la concentration du polluant.

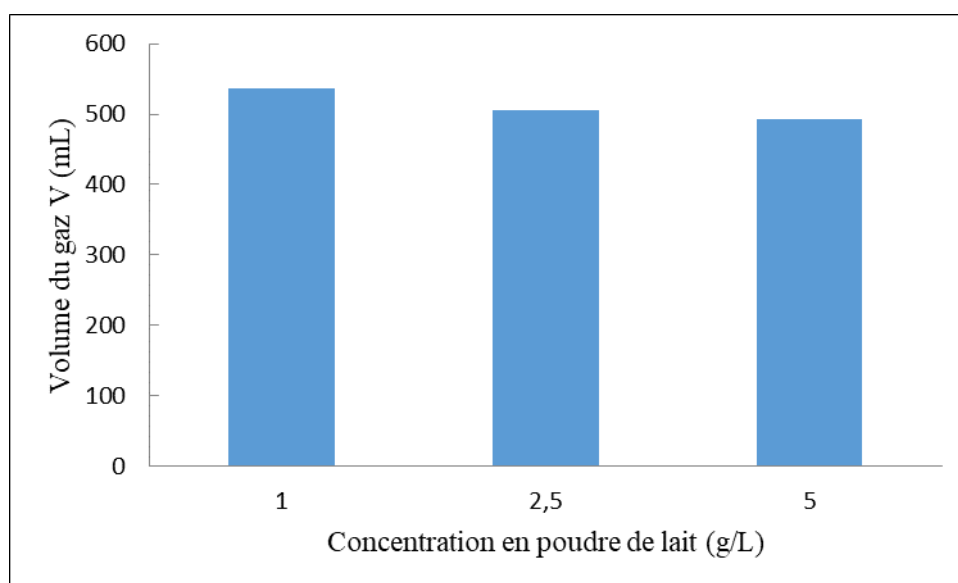


Figure 19, Effet de la concentration en poudre de lait sur la production du gaz

Les résultats obtenus indiquent que le volume de gaz produit diminue progressivement avec l'augmentation de la concentration initiale en lait en poudre.

Il également été observé que la production maximale du gaz est atteinte à la concentration la plus faible (1 g/L). De plus, l'écart entre les volumes de gaz produits aux différentes

concentrations reste relativement faible, ce qui suggère que la densité de courant appliquée constitue le facteur prépondérant dans la production du gaz, plutôt que la concentration du polluant.

Enfin, nous avons noté que, malgré l'augmentation de la charge polluante, le procédé d'électrocoagulation maintient une production gazeuse satisfaisante pour les trois concentrations testées, ce qui indique que la génération de gaz reste peu affectée par la concentration initiale du polluant dans les conditions expérimentales considérées.

III.4.4. Évolution du gaz en fonction du temps dans les conditions optimales

Nous avons suivi l'évolution du volume de gaz produit dans les conditions optimales déterminées lors de l'étude paramétrique, à savoir un $\text{pH} = 7$ et une densité de courant de $62,5 \text{ mA/cm}^2$ pendant une durée totale de 50 minutes.

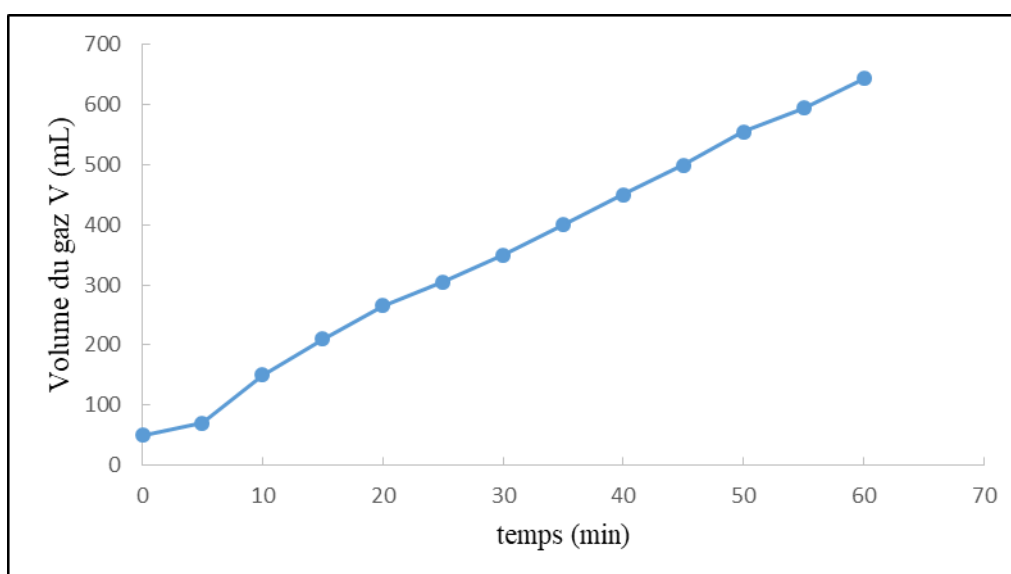


Figure 20, Evolution du gaz en fonction du temps

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le volume de gaz produit augmente progressivement au fil du temps. Cette augmentation est régulière et continue tout au long du traitement, sans ralentissement ni saturation notables. Nous avons également constaté que la production de gaz commence dès les premières minutes du traitement, avec un volume de 70 mL enregistré à $t = 5 \text{ min}$, ce qui indique que la réaction électrochimique débute rapidement après l'application du courant.

Enfin, nous avons noté que le volume de gaz produit à chaque intervalle de 5 minutes reste approximativement constant tout au long de l'expérience, ce qui traduit une cinétique de dégagement stable dans les conditions opératoires appliquées.

III.4.5. Analyse préliminaire du gaz produit

Afin de vérifier la présence d'hydrogène dans le gaz produit par électrocoagulation, celui-ci a été collecté dans une poche de prélèvement, puis analysé à l'aide d'un analyseur de gaz. Cette analyse a permis de confirmer la présence d'hydrogène dans le mélange gazeux et d'en estimer la teneur. Toutefois, le dispositif de prélèvement utilisé ne permettait pas la circulation du gaz en système fermé, ce qui entraînait la vidange progressive de la poche au cours de la mesure. Par conséquent, le pourcentage obtenu ne peut être considéré comme représentatif de la composition réelle du gaz produit et les résultats doivent être interprétés uniquement comme une confirmation qualitative de la présence d'hydrogène.

III.4.6. Estimation théorique de la quantité d'hydrogène produite

La quantité de matière et le volume théoriques d'hydrogène produits au cours du procédé d'électrocoagulation ont été estimés à partir de la loi de Faraday, en utilisant respectivement les équations (15) et (16). Le tableau 14 présente les valeurs théoriques de la quantité de matière et du volume d'hydrogène produits pour les différentes densités de courant étudiées, dans les mêmes conditions expérimentales.

Tableau 14, la quantité de matière et du volume d'hydrogène

Densité du courant	Quantité théorique d'H ₂ (mol)	Volume théorique d'H ₂ (ml)
12,5	$3,109 \times 10^{-3}$	74,8
25	$6,219 \times 10^{-3}$	149,6
37,5	$9,328 \times 10^{-3}$	224,4
50	$1,244 \times 10^{-2}$	299,2
62,5	$1,555 \times 10^{-2}$	374,0

Les résultats montrent que la quantité théorique d'hydrogène produite augmente avec l'intensité du courant appliqué, ce qui est en parfait accord avec la loi de Faraday

Par ailleurs, les volumes de gaz obtenus expérimentalement sont supérieurs aux volumes théoriques calculés par la loi de Faraday, pour l'ensemble des densités de courant étudiées. Cet écart est probablement dû à la présence d'autres gaz produits au sein du réacteur, notamment l'oxygène dégagé à l'anode.

III.5 Calcul de la consommation énergétique

L'étude expérimentale menée en laboratoire visait à évaluer l'efficacité énergétique de l'électrocoagulation pour le traitement d'un effluent laitier.

Les essais ont été réalisés sur un volume fixe de 450 mL pendant 50min, un pH initial de 7 et une charge initiale de 2,5 g/L La figure 21 présente l'évaluation de la consommation énergétique (kWh/m³) en fonction de la densité du courant (J).

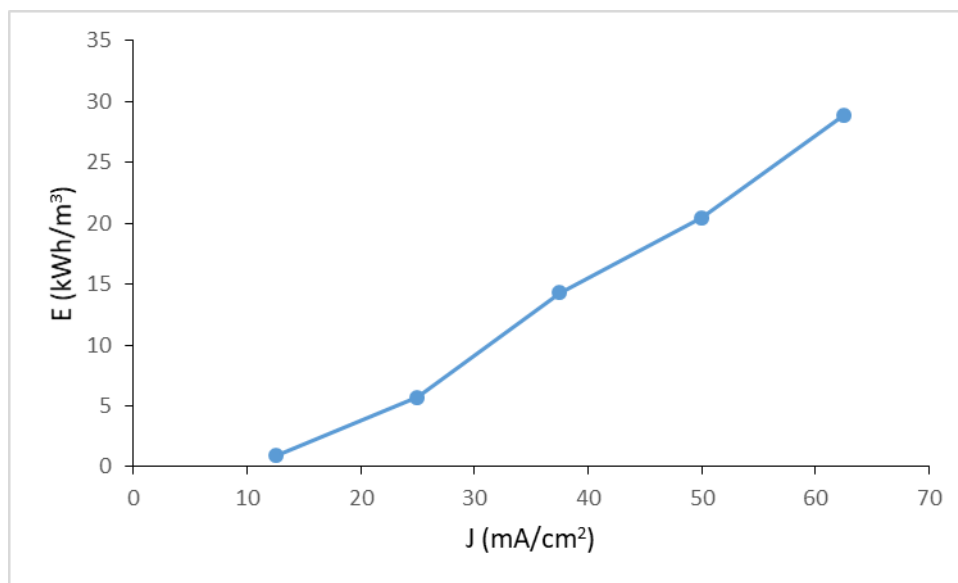


Figure 21, Consommation énergétique en fonction de la densité de courant

Une augmentation progressive, continue et quasi-linéaire de la consommation énergétique en fonction de la densité de courant a été observée. En effet, lorsque la densité de courant passe de 12,5 à 62,5 mA/cm², la consommation énergétique augmente d'environ 0,93 kWh/m³ à 28,88 kWh/m³.

Par ailleurs, des densités de courant élevées favorisent la dissolution anodique et accélèrent les réactions électrochimiques, améliorant ainsi les performances de traitement et la production d'hydrogène. Toutefois, cette amélioration s'accompagne d'une augmentation significative des coûts énergétiques.

Dans notre étude, la densité de courant de 62,5 mA/cm² présente la consommation énergétique la plus élevée, mais elle correspond également aux meilleures performances du procédé en termes d'abattement de la DCO, de réduction de la turbidité et de production de gaz. Ce résultat montre que le choix des conditions opératoires doit reposer sur un compromis entre les performances du procédé et son coût énergétique.

Conclusion générale

Les travaux réalisés dans cette étude ont montré que les performances du procédé d'électrocoagulation dépendent fortement des conditions opératoires, soulignant ainsi l'importance de leur optimisation afin d'améliorer simultanément l'efficacité de la dépollution et la production d'un gaz contenant de l'hydrogène. Au-delà de sa capacité à réduire la charge polluante des effluents, ce procédé offre la possibilité de valoriser les eaux usées en générant simultanément un vecteur énergétique à fort potentiel, renforçant ainsi son intérêt dans une perspective de développement durable.

L'étude expérimentale a permis d'évaluer l'influence des principaux paramètres opératoires, notamment le pH de l'effluent, la densité de courant, la concentration en poudre de lait et le temps d'électrolyse, sur les performances du procédé en termes d'abattement de la demande chimique en oxygène (DCO), d'élimination de la turbidité et de production de gaz. L'optimisation de ces paramètres a conduit à un taux d'abattement de la DCO supérieur à 70 % et à une élimination de la turbidité supérieure à 98 %, tout en permettant la production de plus de 500 mL de gaz. Une analyse préliminaire de ce dernier a confirmé la présence d'hydrogène, mettant en évidence le potentiel de l'électrocoagulation comme technologie intégrée associant le traitement des effluents et la valorisation énergétique.

Afin de consolider ces résultats et d'envisager une application à plus grande échelle, plusieurs perspectives de recherche peuvent être proposées :

- Intégrer des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire ou éolienne, afin de réduire la consommation électrique du procédé et les coûts d'exploitation, tout en tirant parti du fort potentiel énergétique de l'Algérie ;
- Étudier le procédé à plus grande échelle afin d'évaluer sa faisabilité technique et économique dans des conditions proches de l'exploitation industrielle ;
- Recourir à des techniques analytiques avancées pour caractériser précisément la composition du gaz produit, quantifier la teneur en hydrogène et évaluer son degré de pureté.

ANNEXES

Annexe 1 :**Courbe d'étalonnage de la DCO**

La courbe d'étalonnage a été tracée à partir de la solution standard de biphtalate de potassium (KHP) avec des concentrations comprises entre 100 et 1100 mgO₂/l. La longueur d'onde est de $\lambda=600$ nm.

- Préparations des réactifs :

- Réactif acide : pour 4,6 kg d'acide sulfurique, on ajoute 25,23 g d'Ag₂SO₄.
- Solution de digestion : 10,2 g de bichromates de potassium (K₂Cr₂O₇) préalablement séchés sont introduits dans 500 ml d'eau distillée auxquels on ajoute 167 ml d'acide sulfurique pur et 33,3 g de sulfate de mercure (HgSO₄).

- Mode opératoire :

- Introduire dans un tube de DCO 2,5 ml de l'échantillon à analyser.
- Ajouter 1,5 ml de solution de digestion.
- Ajouter lentement et avec précaution 3,5 ml de réactif acide.
- Agiter pendant quelques secondes à l'aide de l'agitateur vortex.
- Porter à ébullition dans un bloc chauffant pendant 2 h.
- Laisser refroidir jusqu'à température ambiante

Lire la valeur de la densité optique au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 600 nm.

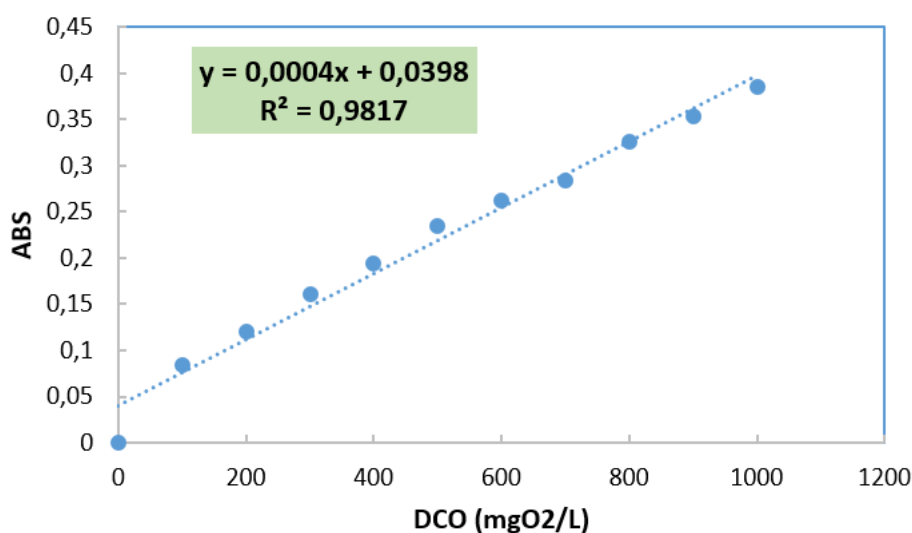


Figure 22 Courbe d'étalonnage de la DCO.

Références

Référence

- [1] M. Robin et al., "A Comprehensive Analysis of Hydrogen Production Through Electrolysis of Industrial Wastewater: Prospects and Challenges," *Energy Reviews*, vol. 4, p. 100155, 2025.
- [2] Authors, "Wastewater treatment technologies and challenges in Algeria and their future prospects," *Discover Sustainability*, Springer Nature Open Access, 2025.
- [3] Sharma et al., "Hydrogen as a clean energy carrier: advancements, challenges, and its role in a sustainable energy future," *Clean Energy*, Oxford Academic, 2025.
- [4] CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), "Dossier : L'eau, une ressource vitale," Centre d'Information sur l'Eau (C.I.Eau), 2020.
- [5] A. Tansaout, "L'Algerie face a la hantise d'une penurie d'eau," *Jeune Afrique*, 2026.
- [6] S. H. H. Al-Taai, "Water pollution: Its causes and effects," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 790, p. 012026, 2021.
- [7] "Industrial wastewater examples," *Learning Center*, 2025.
- [8] R. Abrane, "Depollution d'un effluent de laiterie par electrocoagulation," *These de doctorat*, UniversiteBadji Mokhtar, Annaba, Algerie, 2022.
- [9] A. Aitbara et al., « Etude comparative d'efficacité de prétraitement des effluents d'une laiterie industrielle par coagulation-floculation et électrocoagulation en dynamique », *Rev. Sci. Technol., Synthese*, vol. 26, pp. 103-111, Laboratoire de traitement des eaux, Université d'Annaba, 2013.
- [10] Z. Bouakrif, "Traitement d'un rejet laitier par électrocoagulation," *Mémoire de fin d'études*, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2015.
- [11] S. Sami, H. Hafsaoui, and Y. Amani, "Impact environnemental des entreprises laitières en Algérie, cas de la wilaya de Tiaret," 2017.
- [12] I. B. OureSanni, "Combinaison des procédés d'électrocoagulation et d'électro-oxydation pour le traitement des eaux uséesrésiduairees issues des opérations de nettoyage de cuves industrielles," *Mémoire de maitrise*, Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, 2018.
- [13] I. Mickova, "Advanced Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment Part I: Electrocoagulation," *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, vol. 14, no. 2, pp. 233-257, 2015.

Référence

- [14] G. K. Meriem, "Valorisation d'un rejet laitier par technique membranaire (Ultrafiltration)," Mémoire de Master, Université M'Hamed BougaraBoumerdes (UMBB), sous la dir. de L. Bensadallah, 2020.
- [15] B. Bourbon and ACTALIA, "AQUAREL - Gestion des effluents et des boues issus de la transformation laitière," projet de recherche initié par CNIEL avec le soutien financier des Agences de l'Eau Seine-Normandie et Loire-Bretagne, Feb. 2018.
- [16] E. Brelot, "Impact des rejets sur les milieux récepteurs," GRAIE, Lyon, France, B. Chocat, Professeur à l'INSA de Lyon.
- [17] M. Bharti et al., "Soil properties under wastewater irrigation in Ranipur Rao watershed," in *Advances in Environmental Pollution Management*, 2020.
- [18] INRAE, "Impacts de l'infiltration d'eaux usées traitées sur les sols," HAL Science, 2021, hal-03155946.
- [19] GIEC, Emissions de méthane issues des eaux usées, Rapport d'inventaire mondial.
- [20] J. Hobson, CH₄ and N₂O Emissions from Waste Water Handling, IPCC/OECD/IEA.
- [21] G. Bhendekar, P. Bele, and V. Wankhade, "Effect of water pollution on flora and fauna," *International Journal of Life Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 219-224, 2024.
- [22] République Algérienne Démocratique et Populaire, "Décret exécutif no 06-141 du 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels," *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, no. 26, Alger, Algerie, 23 Apr. 2006.
- [23] S. F. Abed AL-Rubaye, N. A. AlHaboubi, and A. H. Al-Allaq, "Factors Affecting Electrocoagulation Process for Different Water Types: A Review," *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 17-32, Mar. 2024. doi: 10.22153/kej.2024.10.001.
- [24] M. Beloudah, "Traitement des eaux par électrocoagulation," Mémoire de Master, Spécialité: Hydraulique Urbaine, Filière: Hydraulique, Université Mohamed Khider, Biskra, encadreur: S. Guergazi, co-encadreur: A. Ouakouak.
- [25] M. S. Najafinejad, S. Chianese, A. Fenti, P. Iovino, and D. Musmarra, "Application of Electrochemical Oxidation for Water and Wastewater Treatment: An Overview," *Molecules*, vol. 28, p. 4208, 2023.

- [26] O. Dia, P. Drogui, R. Dube, and G. Buelna, "Utilisation des procédés électrochimiques et leurs combinaisons avec les procédés biologiques pour le traitement des lixiviats de sites d'enfouissement sanitaires - revue de littérature," *Revue des sciences de l'eau*, vol. 25, no. 01, 2016.
- [27] G. Mouedhen et al., "Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 150, no. 1, pp. 124-135, 2008.
- [28] M. Jiang et al., "Research on the difference of characteristics at Steel/electrolyte interface under cathodic protection and in High-pH alkaline solution," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022. doi: 10.1016/j.jelechem.2022.
- [29] A. Rabahi, "Etude de traitement des lixiviats de CET par électrocoagulation et la faisabilité de leurs biodégradation," Thèse de doctorat, Fac. Genie des Procédés, Univ. Constantine 3 Salah Boubnider, Constantine, Algeria, 2020.
- [30] M. Behera and A. K. Verma, "Electrocoagulation using scrap aluminium electrodes for Reactive Black 5 removal from aqueous media: Process modelling and techno-economic evaluation," *Sustainable Chemistry One World*, vol. 9, p. 100202, 2026.
- [31] R. Pratiwi and Slamet, "The opportunity of using hydrogen produced from electrocoagulation process of hospital liquid waste as renewable energy source," Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Universities Indonesia, Depok, Indonesia.
- [32] R. Pratiwi et al., "Electrocoagulation process as an alternative treatment of petroleum industry liquid waste and renewable energy sources," *Earth Environ. Sci.*, vol. 1239, p. 012004, 2023.
- [33] M. S. Najafinejad, S. Chianese, A. Fenti, P. Iovino, and D. Musmarra, "Application of Electrochemical Oxidation for Water and Wastewater Treatment: An Overview," *Molecules*, vol. 28, p. 4208, 2023.
- [34] J. N. Hakizimana et al., "Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches," *Desalination*, vol. 404, pp. 1-21, 2017.
- [35] PURWONO et al., "Harvesting of Dunaliella salina using electrocoagulation with helix electrode and producing HHO gas as promising Hydrogen fuel," *Global NEST Journal*, vol. 25, pp. 1-6, 2023.

- [36] Rusdianasari, A. Taqwa, A. Syarif, and Y. Bow, "Hydrogen Recovery from Electroplating Wastewater Electrocoagulation Treatment," *IJASEIT*, vol. 13, no. 2, pp. 592-598, 2023.
- [37] A. Ndukwe et al., "Electrocoagulation and electrooxidation of automobile industry wastewater," *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 26, no. 8, pp. 446-457, 2024.
- [38] T. Harif, M. Khai, and A. Adin, "Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics," *Water Research*, vol. 46, no. 10, pp. 3177-3188, 2012.
- [39] Alhajri et al., "Integrated Electrocoagulation Strategies for Wastewater Treatment and Renewable Hydrogen Production," *ChemBioEng Reviews*, Wiley, 2026. doi: 10.1002/cben.70042.
- [40] A. Dura, "Electrocoagulation for Water Treatment: the Removal of Pollutants using Aluminium Alloys, Stainless Steels and Iron Anodes," Ph.D. thesis, Dept. of Chemistry, National University of Ireland Maynooth, Maynooth, Ireland, Aug. 2013, Supervisor: Prof. C. B. Breslin.
- [41] G. Mouedhen, M. Feki, M. De Petris-Wery, and H. F. Ayedi, "Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 150, no. 1, pp. 124-135, 2008.
- [42] M. Vepsalainen, M. Pulliainen, and M. Sillanpaa, "Electrochemical dissolution of aluminium in electrocoagulation experiments," *Separation and Purification Technology*, 2016.
- [43] K. Mansouri, A. Hannachi, A. Abdel-Wahab, and N. Bensalah, "Anodic Dissolution of Pure Aluminum during Electrocoagulation Process," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 5, pp. 2428-2437, 2012.
- [44] S. E. Amrose et al., "Electrode Corrosion, pH, and Dissolved Oxygen Dynamics during Aluminum Electrocoagulation of Hypersaline Produced Water," *ACS ES&T Engineering*, 2024.
- [45] CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUEBEC, "Détermination de la demande chimique en oxygène : méthode de reflux en système ferme suivi d'un dosage par colorimétrie avec le bichromate de potassium,"

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, MA. 315 - DCO 1.1, Rev. 4, 12 p, 2016.
- [46] I. Benslimane and C. Chemlal, "Faisabilité de production d'hydrogène à partir d'un traitement électrochimique des eaux de rejets de la raffinerie d'Alger," *Mémoire de fin d'études*, soutenu le 06 juillet 2023.
- [47] Belgian Academy Council of Applied Science (BACAS), Hydrogen as an Energy Carrier, *Tech. Rep.*, Brussels, Belgium, Apr. 2006.
- [48] P. Aiqiang, L. Jing, L. Zhipeng, Y. Yunwei, Y. Xiu, and Z. Meixia, "Application of Hydrogen Energy and Review of Current Conditions," in *Proc. ACCESE 2020, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 526, p. 012124, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/526/1/012124.
- [49] N. De Blasio, "The Colors of Hydrogen", *Harvard Kennedy School, Belfer Center for Science and International Affairs*, Cambridge, MA, USA, Rep., Jul. 2024.
- [50] P. Nikolaidis and A. Poulikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 597-611, 2017.
- [51] D. T. Moussa, M. H. El-Naas, M. Nasser, and M. J. Al-Marri, "A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges," *Journal of Environmental Management*, vol. 186, no. 1, pp. 24–41, 2017.
- [52] M. M. Emamjomeh and M. Sivakumar, "Electrocoagulation in Water Treatment," in *Handbook of Environmental Engineering*, Humana Press, 2009.
- [53] M. F. Lopes Silva et al., "Boron Removal from Mining and Synthetic Effluents by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes," *Water*, vol. 11, no. 6, p. 1179, 2019.
- [54] G. Jing et al., "Electrocoagulation in a packed aluminium scraps anode reactor for mineral processing wastewater treatment," *Minerals Engineering*, vol. 198, p. 108093, 2023.
- [55] A. Jain et al., "A sustainable approach to dairy wastewater treatment through electrocoagulation: From beverage cans to clean water," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 5, p. 100314, 2021.
- [56] S. Tchamango et al., "Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes," *Science of the Total Environment*, vol. 408, no. 4, pp. 947–952, 2010.

Référence

- [57] S. Tchamango et al., "Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes," *Science of the Total Environment*, vol. 408, no. 4, pp. 947–952, 2010.
- [58] E. J. Ruiz-Ruiz et al., "Optimization of the Electrocoagulation Process with Aluminum Electrodes for Rainwater Treatment," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, p. 860011, 2022.
- [59] Naje, AS., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, MA.,Sopian, K., Hasan, HA, "Electrocoagu-lation by solar energy feed for textile wastewater treatment including mechanism and hy-drogen production using a novel reactor design with a rotating anode", *RSC Adv* 6 (12),10192-101204 (2016).
- [60] Deghles, A., Kurt, U., "Hydrogen gas production from tannery wastewater by electrocoagu-lation of a continuous mode with simultaneous pollutants removal",*JApplChem* 10(3), 40-50 (2017).
- [61] A. Rotbardt, La Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) – Perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action, Rapport, Agence Française de Développement (AFD), 2011.
-

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Centre de Développement des Energies Renouvelables



IncubeTECH – Incubateur du Centre de Développement des Énergies Renouvelables

RAPPORT DU PROJET START-UP Intitulé :

AquaFusionEnergy

Réalisé par :

HARRAR Hanane & MEZIANI Zineb

Présenté et soutenu publiquement le (30/06/2026)

Encadré par :

Promotrice : Dr. LASSOUANE Fatiha

Co-promotrice : DR.DJELLOULI Naima

ENP 2026

Sommaire

Introduction	91
Premier axe : Présentation du projet	93
1. L'idée du projet	94
2. Les valeurs proposées :	94
2.1. La modernité	94
2.2. La performance	94
2.3. La flexibilité	94
2.4. L'accomplissement de tâches	95
2.5. La Conception	95
2.6. La réduction des coûts	95
2.7. La réduction des risques	95
2.8. L'accessibilité	95
3. Équipe de travail :	96
4. Objectifs du projet	96
5. Le planning de réalisation du projet	97
Deuxième axe : aspects innovants	99
1. La nature des innovations	100
2. Les domaines d'innovation :	100
Troisième axe : Analyse stratégique du marché	101
1. Le segment du marché	102
1.1 Le marché potentiel	102
1.2 Le marché cible (le segment)	102
1.3 Justification du choix du marché cible	102
1.4 Possibilité de conclure des contrats avec de grands clients	102
2. La mesure de l'intensité de la concurrence	103
3. La stratégie marketing	103
3.1 La politique de distribution	103
3.2 La politique de communication	104
Quatrième axe : Plan de production et organisation	105
1. Processus de production	106
1.1 . Achat des matières premières	106
1.2. Fabrication et assemblage du réacteur	106
1.3. Personnalisation et calibration	106
1.4 Emballage, livraison et mise en service	106
2 Approvisionnement	106
2.1. Politique d'achat	107
2.2. Fournisseurs stratégiques	107
2.3. Politique de paiement et gestion des stocks	107
Cinquième axe : Plan financier	109
1. Investissements initiaux (CAPEX)	110
2. Charges d'exploitation : amortissement	110
3. Plan de financement et amortissement	111
3.1 Tableau d'amortissement de l'emprunt (BDL)	111
4. Compte de résultats prévisionnel (Scénario réel année 1)	112
Sixième axe : Prototype expérimental	114
1. Description du prototype	115
2. Présentation visuelle du prototype	116
3. Étapes de réalisation	116

Liste deTableaux :

Tableau 14, Présentation des membres de l'équipe et leurs responsabilités.....	96
Tableau 15, Calendrier de réalisation du projet.....	98
Tableau 16, Analyse comparative des concurrents sur le marché algérien	103
Tableau 17, Catégories d'achats	107
Tableau 18, Investissements initiaux.....	110
Tableau 19, Charges d'exploitation	111
Tableau 20, Tableau d'amortissement de l'emprunt (BDL).....	112
Tableau 21, Compte de résultats prévisionnel.....	113
Tableau 22, BMC	117

Liste des figures:

Figure 1, Prototype pilote de traitement électrochimique des effluents agroalimentaires avec récupération et stockage de l'hydrogène produit	116
---	-----

Introduction

Face à l'augmentation des volumes d'effluents industriels et au renforcement des exigences environnementales, les industries agroalimentaires sont confrontées à des défis majeurs en matière de gestion et de traitement de leurs rejets liquides. Ces effluents présentent des charges élevées en matière organique et en matières en suspension, susceptibles de dégrader la qualité des milieux récepteurs en l'absence traitement adéquat.

Le projet présenté vise la conception et le développement d'un système de traitement électrochimique destiné aux effluents agroalimentaires. Au-delà de la dépollution des eaux usées, cette technologie offre la possibilité de valoriser le gaz produit au cours du procédé et de favoriser la réutilisation de l'eau traitée, contribuant aux objectifs de l'économie circulaire et du développement durable.

Ce rapport est structuré en six axes complémentaires, couvrant la présentation du projet, ses aspects innovants, l'analyse stratégique du marché, le plan de production, le plan financier et, enfin, la présentation du prototype

**Premier axe :
Présentation du
projet**

1. L'idée du projet

Les industries agroalimentaires génèrent des volumes importants d'effluents liquides à forte charge organique. Les méthodes de traitement biologiques utilisées actuellement présentent des limitations significatives : lenteur du procédé et occupation importante d'espace au sol, rendant leur déploiement difficile pour les petites et moyennes entreprises industrielles algériennes.

Notre solution consiste à développer un système de traitement électrochimique compact, rapide et nécessitant un espace limité. Ce système traite efficacement les rejets liquides des industries agroalimentaires en éliminant la charge polluante avec des rendements élevés, tout en valorisant le gaz produit lors du procédé électrochimique comme vecteur d'énergie propre, réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et diminuant les impacts environnementaux.

2. Les valeurs proposées :

Le système développé dans le cadre de ce projet fournit un ensemble de valeurs distinctives répondant aux besoins réels des industries agroalimentaires et des gestionnaires d'effluents industriels. Ces valeurs se déclinent en huit axes stratégiques présentés ci-dessous.

2.1. La modernité

Le procédé proposé intègre, au sein d'un même système compact, le traitement électrochimique des effluents agroalimentaires ainsi que la récupération et la valorisation de l'hydrogène produit au cours du procédé. Cette approche innovante répond à un besoin non couvert sur le marché algérien, où aucune technologie similaire n'est actuellement disponible dans un format adapté aux exigences opérationnelles des industries agroalimentaires.

2.2.La performance

La solution développée assure un traitement efficace des effluents agroalimentaires tout en optimisant l'utilisation des ressources. Elle permet d'obtenir une élimination de la turbidité supérieure à 99 % et un abattement de la DCO d'environ 70% dans les conditions optimales. En parallèle, le procédé réduit les impacts environnementaux des rejets industriels et produit de l'hydrogène, un vecteur énergétique propre et valorisable.

2.3. La flexibilité

Le système est conçu pour être adapté aux spécificités de chaque client. Plusieurs paramètres opératoires peuvent être ajustés selon le type et le volume d'effluent à traiter, ainsi que le dimensionnement de l'unité selon le débit journalier de l'industrie cliente.

2.4. L'accomplissement de tâches

Le système aide directement le client à accomplir des tâches spécifiques et obligatoires : mise en conformité environnementale, gestion des effluents et les rapports réglementaires. Concrètement, il permet :

- de satisfaire les exigences légales de traitement avant rejet dans le milieu naturel.
- de valoriser une partie de l'énergie consommée lors du traitement sous forme d'hydrogène, qui peut être récupéré et utilisé comme vecteur énergétique.

2.5. La Conception

Le système a été conçu pour répondre aux contraintes des unités de production agroalimentaires. Son architecture compacte facilite son intégration au sein des installations existantes, tandis que sa conception modulaire permet une mise en œuvre flexible et adaptée aux besoins des industriels.

2.6. La réduction des coûts

La solution proposée présente un potentiel de réduction des coûts d'exploitation grâce à la limitation de l'utilisation de réactifs chimiques et à la valorisation de l'hydrogène produit au cours du procédé. Cette approche contribue à améliorer l'efficacité globale du système tout en favorisant une gestion plus durable des ressources.

2.7. La réduction des risques

Le procédé électrochimique contrôlé offre un niveau de sécurité élevé pour l'exploitant et l'environnement :

- aucun produit chimique dangereux stocké ou manipulé sur site,
- réduction du risque de non-conformité lors des contrôles environnementaux,
- processus stable et reproductible, minimisant les incidents opérationnels.

2.8. L'accessibilité

La solution vise à rendre les technologies avancées de traitement des effluents plus accessibles aux industries. Son approche intégrée et sa conception adaptable permettent de répondre aux besoins des petites et moyennes entreprises, souvent confrontées à des contraintes de coût, d'espace et de gestion des rejets.

3. Équipe de travail :

Notre équipe est une synergie de compétences scientifiques, techniques et managériales, structurée pour mener ce projet de l'échelle laboratoire jusqu'à sa viabilité économique.

Tableau 15 Présentation des membres de l'équipe et leurs responsabilités.

Nom	Description	Rôle
Mme LASSOUANE Fatiha	Chercheuse, docteur en génie des procédés et de l'environnement, expertise en traitement des eaux et électrochimie.	Encadrante scientifique et conseillère technique du projet.
HARRAR Hanane & MEZIANI Zineb	Étudiantes en master en génie des procédés et de l'environnement à l'ENP, porteuses du projet incubé au CDER.	Sur le plan technique : traduire les orientations de l'encadrante en actions de laboratoire. Sur le plan économique : suivre les formations de l'incubateur pour structurer le modèle économique.

4. Objectifs du projet

Le projet vise à développer et déployer à l'échelle nationale une solution écologique et compacte de traitement des eaux industrielles, limitant l'usage de produits chimiques et favorisant la valorisation des sous-produits du procédé.

Pour transformer cette innovation en une start-up viable et compétitive, la stratégie se déploie selon une trajectoire progressive :

- **Démontrer la faisabilité (Le Pilote)** : Valider l'efficacité technique et la fiabilité du procédé en conditions réelles grâce à l'installation d'un premier système pilote chez un industriel partenaire.
- **Structurer et commercialiser (Le Lancement)** : Créer officiellement l'entreprise, standardiser les équipements et lancer l'offre sur le marché (notamment le secteur agroalimentaire) en intégrant des services d'installation et de maintenance.
- **Changer d'échelle (L'Industrialisation)** : Augmenter les capacités de production pour imposer cette technologie comme l'alternative majeure aux procédés

conventionnels, avec pour ambition de capter à terme 10 % à 15 % du marché national ciblé.

5. Le planning de réalisation du projet

Le calendrier pour la réalisation de notre projet se divise en deux phases distinctes :

- **la phase académique (1^{er}mois au4^{ème}mois) :** dédiée à la recherche scientifique, au développement du prototype au laboratoire et à la modélisation économique au sein de l'incubateur de CDER.
- **Phase commerciale (4^{ème}moisau 12^{ème} mois au minimum):** qui vise le lancement industriel et l'implantation de notre système de production sur le marché, (la commande des équipements industriels ...)

Ainsi, nous avons besoin d'au moins 12 mois pour transformer notre idée en une start-up viable. L'objectif final est divisé en 6 tâches partielles, planifiées comme suit :

Tableau 16 Calendrier de réalisation du projet.

N°	Tâche partielle	Temps requis (mois)	Résultats
1	Études préalables et R&D au laboratoire : • Choix des paramètres du procédé	1 mois	• Caractérisation de la pollution initiale • Validation des meilleurs couples d'électrodes
2	Réalisation et test du prototype expérimental : • Faire le montage du réacteur	2 mois	
3	Modélisation économique : • Etude du marché (BMC ,SWOT analysis ...) • Etude financière (charges ,CA , BFR...)	1 mois	• Rédaction d'un modèle économique validé. • Détermination du cout nécessaire pour la réalisation de ce projet.
4	Etude d'implantation et démarches administratives.	2 mois	• Obtenir une localisation de l'unité et enregistrement légal de l'entreprise.
5	Commande d'équipements industriels et achat de matières premières.	3 à 4 mois	• Matières premières stockées • Réception des machines industrielles et outils du montage
6	Installation et mise en service des équipements.	4 mois à 6 mois	• Assemblage et installation de la première unité commerciale. • Mise en service et essais de démarrage.
7	Lancement commercial et suivi des premières opérations.	2 mois	• Déploiement de la solution auprès des premiers clients. • Évaluation des performances techniques et économiques.

**Deuxième axe :
aspects innovants**

1. La nature des innovations

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une innovation technologique. Il repose sur le développement et la maîtrise d'un procédé électrochimique avancé appliqué au traitement des effluents d'industries agroalimentaires, avec valorisation simultanée du gaz produit. Cette double fonctionnalité, inédite dans le contexte industriel algérien, implique une expertise technique élevée tout en ciblant un marché identifié et des besoins clairement exprimés.

La nature technologique de cette innovation se manifeste à travers le développement d'un système compact à double fonction, l'optimisation des paramètres opératoires pour atteindre des rendements élevés, et la conception d'un système adaptable et reproductible répondant aux contraintes des PME agroalimentaires algériennes.

2. Les domaines d'innovation :

Notre projet se positionne comme une innovation à fort impact environnemental et économique, à travers trois domaines majeurs :

- Nouveaux procédés : contrairement aux stations d'épuration classiques, souvent volumineuses et coûteuses, notre système utilise un procédé électrochimique optimisé, permettant un traitement plus rapide et plus compact des effluents agroalimentaires.
- Nouvelles fonctionnalités : notre système ne se limite pas à la dépollution de l'eau. Sa fonctionnalité innovante réside dans sa capacité à capter et à valoriser le gaz produit pendant le procédé électrochimique comme source d'énergie.
- Valorisation des sous-produits : au-delà de la dépollution des effluents, la technologie permet de transformer une partie de l'énergie consommée par le procédé en hydrogène valorisable. Cette approche contribue à améliorer l'efficacité globale du système tout en s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire et de développement durable.

Troisième axe :
Analyse stratégique
du marché

1. Le segment du marché

1.1 Le marché potentiel

Le marché potentiel englobe l'ensemble des industries et usines de transformation agroalimentaire en Algérie qui rejettent des effluents liquides pollués. Ces acteurs sont motivés par la nécessité de se conformer à la réglementation environnementale.

1.2 Le marché cible (le segment)

Le marché cible du projet est constitué des industries agroalimentaires générant des effluents liquides nécessitant un traitement avant rejet ou réutilisation. Il s'adresse en particulier aux unités de production de taille moyenne et grande, opérant dans différents secteurs.

1.3 Justification du choix du marché cible

- Les industries agroalimentaires produisent généralement des effluents à forte charge organique, nécessitant des solutions de traitement efficaces, compactes et adaptées aux contraintes industrielles.
- Ces unités sont souvent confrontées à des coûts élevés liés aux solutions de traitement conventionnelles, notamment en termes d'infrastructure et d'exploitation.
- L'intégration de procédés de valorisation énergétique au sein des systèmes de traitement constitue un levier d'optimisation économique et environnementale pour ces industries.
- Le marché présente ainsi un potentiel important pour des solutions innovantes combinant performance de traitement et valorisation des ressources.

1.4 Possibilité de conclure des contrats avec de grands clients

La possibilité est élevée pour les deux raisons suivantes :

- La méthode de projet pilote pour le secteur privé : nous proposons un contrat de test durant lequel nous installons notre prototype dans leurs usines pendant quelques semaines, leur permettant d'évaluer concrètement les performances du système en conditions réelles. Cette approche constitue une innovation de notre modèle économique, puisqu'elle réduit le risque perçu par le client et facilite la transition vers un contrat d'achat.
- Notre solution présente des atouts commerciaux majeurs pour les industriels du secteur laitier : il s'agit d'un système peu coûteux, robuste — ne contenant aucun élément mécanique complexe susceptible de tomber en panne — et facile à entretenir, ce qui en fait une réponse concrète et accessible aux besoins croissants de dépollution des rejets et de maîtrise des coûts opérationnels.

2. La mesure de l'intensité de la concurrence

Tableau 17 Analyse comparative des concurrents sur le marché algérien

Concurrent	Type	Forces	Faiblesses
Les stations biologiques (lagunage, boues activées, biofiltration)	Direct	Technologie établie, faible coût d'investissement initial, opérateurs formés.	Lente, grande emprise foncière, inefficace sur les effluents à forte charge organique.
Les stations classiques (chimiques)	Direct	Efficacité reconnue, procédé bien documenté.	Coûts en réactifs élevés, risques de manipulation, pas de valorisation énergétique.
Bureaux d'études et prestataires STEP	Indirect	Réseau institutionnel, crédibilité auprès des industriels.	Pas de solution propre, dépendance à des tiers, coûts élevés à long terme.
Inaction / déversement non conforme	Indirect	Coût nul à court terme.	Risque réglementaire majeur, sanctions, impact environnemental grave.

3. La stratégie marketing

3.1 La politique de distribution

Dans un contexte B2B à long cycle de vente, la distribution directe et la construction de réseaux de confiance sont prioritaires. Nos canaux sont les suivants :

- **Vente directe** : démarchage direct des directeurs techniques et des responsables environnement des unités industrielles, avec des démonstrations techniques appuyées par les résultats obtenus.
- **Salons professionnels** : participation aux salons nationaux et internationaux de l'industrie, de l'eau et de l'énergie (ex. : Pollutec, salons nationaux).
- **Réseau scientifique et technique** : valorisation des publications, des conférences et des partenariats avec des centres de recherche tels que le CDER.

3.2 La politique de communication

Notre stratégie de communication est orientée vers la crédibilité technique et la preuve de concept :

- **Communication technique et démonstration du savoir-faire** : présentation des performances de la technologie lors de salons professionnels, de journées techniques, de forums d'innovation et de rencontres avec les industriels.
- **Supports techniques** : fiches techniques, plaquettes commerciales et rapports de performance.
- **Présence numérique** : site web et page LinkedIn professionnelle, ciblés vers les décideurs industriels.
- **Relations institutionnelles** : engagement auprès du ministère de l'Environnement pour l'obtention des agréments réglementaires.

Quatrième axe : Plan de production et organisation

1. Processus de production

Le processus de production repose sur la conception, la fabrication et l'installation de systèmes de traitement électrochimique destinés aux effluents. Chaque unité est conçue selon les caractéristiques spécifiques des effluents du client afin d'assurer des performances optimales.

1.1 . Achat des matières premières

La première étape consiste à approvisionner l'ensemble des matériaux et équipements nécessaires à la fabrication du système. À leur réception, les matériaux font l'objet d'un contrôle qualité visant à vérifier leur conformité aux spécifications techniques établies.

1.2.Fabrication et assemblage du réacteur

Après validation des composants, le réacteur est assemblé selon les paramètres techniques développés lors des phases de recherche et développement.

Cette étape comprend :

- La préparation et le découpage des électrodes ;
- Le montage des électrodes dans la cuve de traitement ;
- L'installation des systèmes électriques et hydrauliques ;
- L'intégration du dispositif de récupération de l'hydrogène produit ;
- L'installation des équipements de mesure et de contrôle.

Des essais préliminaires sont ensuite réalisés afin de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble du système.

1.3.Personnalisation et calibration

Chaque réacteur est adapté aux besoins spécifiques du client à partir d'une caractérisation préalable de ses effluents.

Cette étape comprend :

- L'analyse physico-chimique des effluents ;
- Le dimensionnement du réacteur ;
- Le réglage des paramètres opératoires ;
- L'étalonnage des capteurs ;
- La validation des performances du système.

Cette approche permet d'assurer une efficacité élevée du traitement tout en optimisant la consommation énergétique.

1.4 Emballage, livraison et mise en service

Une fois les tests validés, le réacteur est préparé pour le transport et accompagné de l'ensemble de la documentation technique nécessaire à son exploitation.

L'installation sur site comprend :

- Le raccordement du système ;
- Les essais de mise en service ;
- La formation des opérateurs ;
- Le suivi des performances durant les premières semaines d'exploitation.

2 Approvisionnement

L'approvisionnement constitue un élément stratégique pour assurer la continuité de la production et la qualité des équipements fabriqués.

2.1.Politique d'achat

Tableau 18 Catégories d'achats

Catégorie	Éléments concernés
Matières premières	Matériaux conducteurs pour les électrodes.
Matériaux et fournitures	Cuves de réaction, câblage, raccords, capteurs, joints.
Équipements industriels	Alimentation électrique, équipements de mesure et de contrôle.

Les achats sont réalisés selon des critères de qualité, de disponibilité et de compatibilité avec les exigences techniques du procédé.

2.2.Fournisseurs stratégiques

L'entreprise privilégie une combinaison de fournisseurs locaux et spécialisés :

- Fournisseurs nationaux pour les équipements standards et les composants courants
- Fournisseurs spécialisés pour les électrodes et les équipements techniques de précision
- Partenaires institutionnels et laboratoires de recherche pour l'accès aux équipements analytiques nécessaires aux phases de développement et de contrôle.

Les critères de sélection reposent principalement sur :

- La qualité des produits ;
- La conformité aux spécifications techniques ;
- La fiabilité des délais de livraison ;
- Le rapport qualité-prix.

2.3.Politique de paiement et gestion des stocks

Durant la phase de démarrage, les achats sont effectués principalement au comptant afin de sécuriser les approvisionnements.

À mesure que l'activité se développe, l'entreprise prévoit la mise en place de contrats fournisseurs permettant d'obtenir des délais de paiement et des conditions commerciales plus avantageuses.

La gestion des stocks repose sur :

- Un stock minimal en phase de prototypage ;
- Un stock tampon en phase commerciale ;

Cette organisation permet de garantir la continuité de la production tout en limitant les risques de rupture d'approvisionnement.

3. La main-d'œuvre

3.1 Le nombre de postes

- **À court terme** : le projet sera porté par l'équipe fondatrice, qui assurera les activités de conception, de développement, de validation expérimentale et de préparation à la commercialisation du produit. À ce stade, l'objectif principal est de finaliser la solution et de démontrer sa faisabilité technique avant son déploiement sur le marché.

- **À moyen terme** : avec la commercialisation du produit et l'augmentation de la demande, la start-up prévoit de recruter progressivement afin d'atteindre environ **15 emplois directs**, notamment des techniciens pour l'assemblage et la maintenance des équipements, ainsi que du personnel commercial et administratif.

3.2 Type et nature de la main-d'œuvre

- **Un ingénieur en automatique**, chargé de la conception, de l'optimisation et de l'amélioration continue du système.
- **Trois techniciens supérieurs** en électricité industrielle et en maintenance, responsables de l'assemblage, de l'installation, de la mise en service et du service après-vente chez les clients.
- **Du personnel administratif et commercial**, disposant de compétences en gestion, en comptabilité, en logistique et en développement commercial. Une formation interne sera assurée afin de les familiariser avec les caractéristiques techniques du produit et les procédures de sécurité.

4. Les principaux partenaires

- Centre de recherches des énergies renouvelables CDER.
- Fournisseurs de la matière première (fournisseur des électrodes...).
- Partenaires financiers (les banques et les investisseurs).

Cinquième axe : Plan financier

1. Investissements initiaux (CAPEX)

Afin de disposer d'une véritable unité industrielle, les dépenses éliminent le matériel de laboratoire non essentiel au profit d'outils de production lourds, de pompes de recirculation et de matériel de manutention.

Tableau 19 Investissements initiaux

Réf.	Désignation du matériel professionnel	Qté	Prix unitaire (DA)	Total (DA)
N° 01	Réacteur électrochimique industriel (cuve PP renforcée de 2 m³)	1	500 000	500 000
N° 02	Armoire industrielle d'alimentation, de puissance et de contrôle automatisé	1	400 000	400 000
N° 03	Électrodes consommables (lot initial)	8		110 000
N° 04	Pompes centrifuges industrielles de recirculation et de transfert des effluents	2	75 000	150 000
N° 05	Tuyauterie industrielle haute pression, vannes papillons et raccords PVC-U (DN40)	1 lot	45 000	45 000
N°06	Capteurs numériques de flux en ligne (mesure continue du pH et de la conductivité)	1 lot	100 000	100 000
N°07	Machines-outils pour l'atelier d'assemblage (découpe, cintrage, soudure plastique/métal)	1 lot	450 000	450 000
N°08	Équipements d'atelier, de sécurité et moyens de manutention (transpalette lourd)	1 lot	150 000	150 000
TOTAL INVESTISSEMENTS INITIAUX (CAPEX)			1 905 000 DA	

2. Charges d'exploitation : amortissement

Les dépenses récurrentes intègrent le loyer d'un local industriel adapté, la masse salariale technique ainsi qu'une enveloppe marketing indispensable pour la prospection B2B.

Tableau 20 Charges d'exploitation

Nature de la charge d'exploitation	Montant mensuel (DA)	Montant Annuel (DA)
Loyer de l'atelier de fabrication et d'assemblage industriel	120 000	1 440 000
Énergie de production, eau industrielle et gaz	30 000	360 000
Budget marketing opérationnel et communication B2B (salons, plaquettes)	29 166	350 000
Honoraires professionnels d'accompagnement (notaire, avocat, expert-comptable)	20 833	250 000
R&D continue, réactifs de tests et consommables d'essais	25 000	300 000
Masse salariale de démarrage (équipe technique resserée)	100 000	1 200 000
Frais de transport, télécoms, assurances atelier et divers matériels professionnels, fournitures	33 333	400 000
TOTAL CHARGES EXPLOITATION ANNUELLES	358 333	3 300 000 DA

3. Plan de financement et amortissement

Le projet requiert un financement global de 5 683 500 DA pour couvrir le CAPEX et le fonds de roulement initial. Il est structuré ainsi :

- Investisseurs privés (apports en capital) : 2 000 000 DA (35 % des parts)
- Prêt bancaire (BDL) : 2 500 000 DA (44 %, taux préférentiel de 5,5 % sur 7 ans)
- Subvention publique d'innovation (NASDA) : 1 183 500 DA (21 %, non remboursable)

3.1 Tableau d'amortissement de l'emprunt (BDL)

Calcul sur la base d'une annuité constante fixe de **439 911 DA** par an :

Tableau 21 Tableau d'amortissement de l'emprunt (BDL)

Période	Capital Début (DA)	Amortissement principal (DA)	Intérêts courus (5,5 %) (DA)	Annuité totale (DA)	Capital restant dû (DA)
Année 1	2 500 000	302 411	137 500	439 911	2 197 589
Année 2	2 197 589	319 044	120 867	439 911	1 878 545
Année 3	1 878 545	336 591	103 320	439 911	1 541 954
Année 4	1 541 954	355 104	84 807	439 911	1 186 850
Année 5	1 186 850	374 634	65 277	439 911	812 216

4. Compte de résultats prévisionnel (Scénario réel année 1)

Contrairement au plan initial sans vente, la start-up intègre désormais la commercialisation de **4 systèmes dès la première année**. Le prix de vente ajusté à l'entrée du marché est fixé à 3 000 000 DA par unité, pour un coût de revient (COGS) de 1 510 000 DA par unité.

Tableau 22 Compte de résultats prévisionnel

Poste budgétaire	Détail / Mode de calcul	Montant (DA)
Chiffre d'affaires	4 systèmes × 3 000 000 DA	12 000 000
Coût des ventes (COGS)	4 systèmes × 1 510 000 DA	-6 040 000
MARGE BRUTE	Chiffre d'affaires – Coût des ventes	5 960 000
Charges d'exploitation (OPEX)	Frais de fonctionnement d'atelier ajustés	-3 138 000
Amortissements	Dotation linéaire sur le matériel d'atelier (5 ans)	-495 900
Annuité emprunt bancaire (BDL)	Remboursement annuel global du crédit	-439 911
RÉSULTAT AVANT IMPÔTS	Marge brute – charges – amortissements – annuité	1 886 189
Impôt sur les bénéfices (IBS)	Taux réglementaire appliqué de 19 %	-358 376
RÉSULTAT NET	Bénéfice net comptable de l'année 1	1 527 813 DA

Sixième axe : Prototype expérimental

1. Description du prototype

Le prototype développée st un système pilote de traitement électrochimique conçu pour traiter les effluents issus des industries agroalimentaires. Il permet simultanément d'éliminer la charge polluante de l'effluent et de valoriser le gaz produit lors du procédé comme source d'énergie propre. L'ensemble du système est compact, simple d'utilisation et ne nécessite aucun ajout de produits chimiques, ce qui le distingue des procédés de traitement conventionnels.

Il est composé d'un réacteur équipé d'électrodes métalliques, d'un système de circulation hydraulique, d'une alimentation électrique contrôlée ainsi que d'un dispositif de récupération du gaz produit au cours du procédé.

Le système assure simultanément :

- ✓ L'élimination des polluants organiques et des matières en suspension présents dans les effluents ;
- ✓ La production et la récupération d'hydrogène généré au niveau de la cathode ;
- ✓ L'absence d'ajout de produits chimiques pour le traitement des effluents;
- ✓ La possibilité de réutiliser l'eau traitée pour certains usages industriels.

Le prototype a été conçu selon une architecture modulaire permettant son adaptation à différents débits d'effluents et facilitant son passage à l'échelle industrielle.

2. Présentation visuelle du prototype



Figure 23 Prototype pilote de traitement électrochimique des effluents agroalimentaires avec récupération et stockage de l'hydrogène produit

3. Étapes de réalisation

La réalisation du prototype a suivi une démarche progressive comprenant trois phases principales :

- Assemblage du système de traitement électrochimique, intégrant le réacteur, les équipements hydrauliques, électriques et les dispositifs de contrôle.
- Mise en fonctionnement et suivi de l'évolution du traitement dans le temps.
- Mesure des performances obtenues et validation des résultats par rapport aux objectifs fixés.

Tableau 23 BMC

Le Business Model Canvas

1. Partenaires Clés - CDER / ENP - BANQUE (BDL) - FOURNISSEURS DE COMPOSANTS ELECTRIQUES	2. Activités Clés - Fabrication et assemblage des réacteurs - Recherche et Développement continu 6. Ressources Clés - Compétences humaines (Expertise CDER) - Matériaux locaux - Brevets / Propriété intellectuelle	3. Proposition de Valeur Avantages : - Conception compacte - Faible coût d'installation - Facilité d'utilisation - Rapidité de traitement Objectif : - Traitement et production d'énergie simultanée	4. Relations clients - Assistance technique - Service après-vente (SAV) - Formation des utilisateurs 7. Canaux - Vente directe - Salons et foires	5. Segments de clientèle - Industriels de l'agroalimentaire - Stations de traitement des eaux - Industriels de l'agroalimentaire - Bureaux d'études en environnement - Stations de traitement des eaux
8. Structure des Coûts - Matériaux - Salaires - R&D			9. Flux de Revenus - Vente de réacteurs - Maintenance - Contrats de services	