

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Technologies des procédés de l'hydrogène vert

**LA DISSOCIATION CATALYTIQUE DE L'EAU : EFFET DES
CONDITIONS OPERATOIRES**

Présenté par :

HIMOUD YUCEF

Sous la Direction de : Pr. NACEF MOUNA

Juin 2025

Remerciement

Je remercie d'abord Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté tout au long de mon projet.

Toute ma gratitude va à mon encadrante, Pr. Mouna Nacef, pour ses précieux conseils, son aide, ses orientations et ses encouragements durant toute la période de mon travail de recherche et d'expérimentation.

Tous mes remerciements vont au professeur Maxime Pontié de l'université d'Angers, France pour avoir fourni les mousses des métaux utilisées dans ce travail.

J'adresse mes chaleureux remerciements à tous les professeurs du département de génie des procédés de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma pour les connaissances acquises et les conseils prodigués au cours de ces années.

Mes vifs remerciements vont à l'ensemble des membres du jury qui ont bien voulu examiner mon travail.

Un grand merci à mes parents ainsi qu'à toutes les personnes qui ne sont pas citées ici et qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce projet.

Merci à tous

DÉDICACE

Je tiens à remercier Allah, qui illumine ma route chaque matin, me guide sur le droit chemin, renforce ma foi et a fait de moi ce que je suis devenu.

*Par **Bismi Allah El Rahmane El Rahim**, je dédie ce travail :*

- À mes parents, ceux qui n'ont jamais mis les pieds à l'école, mais qui ont été, et restent encore, **mon école tout au long de ma vie.***
- À mon encadrante, Madame **Mouna Nacef**, Par sa rigueur scientifique, son aide, et sa disponibilité constante et la qualité de ses orientations,*

Je la remercie sincèrement pour sa confiance, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de ce projet.
- À tous mes professeurs, qui m'ont transmis avec passion le meilleur de leur savoir.*
- À Mr **Dehiri Abdelali** pour son aide précieuse et son soutien.*
- À mes chères sœurs, frères et amis, pour leur présence, leur encouragement et leur affection.*
- À mes collègues de la promotion **2023/2025***
- Et à toutes les personnes qui me connaissent, de près ou de loin, et qui ont contribué, par un mot, un geste ou un sourire, à mon cheminement.*

HIMOUD YUCEF

Sommaire

Table des matières

Liste des tableaux.....	I
Listes des figures.....	II
INTRODUCTION GENERALE	3
Introduction générale	4
CHAPITRE I : HYDROGENE LE VECTEUR D'ENERGIE	6
I.1. Introduction.....	7
I.2. Les propriétés d'hydrogène	7
I.3. L'hydrogène : vecteur d'énergie	8
I.4. Production de L'hydrogène	10
I.4.1. Production de L'hydrogène à partir de combustibles fossiles.....	10
I.4.1.1. Hydrogène à partir du gaz naturel (vaporeformage).....	10
I.4.1.2. Hydrogène à partir du carbon	11
I.4.2. Production d'hydrogène par dissociation de l'eau	12
I.4.2.1. Les cycles thermochimiques.....	12
I.4.2.2. Procédées photo électrochimique	12
I.4.2.3. Procédés électrolytiques	13
I.4.3. Production à partir de biomasse	13
I.4.4. Production avec l'énergie nucléaire.....	14
I.5. Transport de l'hydrogène	14
I.5.1. Pipeline	14
I.5.2. Transport par camion	14
I.5.3. Transport par rail.....	15
I.5.4. Transport par navire	15
I.6. Les applications de l'hydrogène.....	15
I.6.1. Industrie	15
I.6.2. Mobilité.....	15
I.6.3. Production d'électricité et stockage.....	16
I.6.4. Secteur résidentiel et tertiaire	16
I.7. Stockage de l'hydrogène	16
I.7.1. Stockage gazeux.....	16
I.7.2. Stockage liquide.....	17
I.7.3. Stockage solide	17
I.8. Conclusion	17
CHAPITRE II : MATERIAUX D'ELECTROLYSE DE L'EAU.....	18
II.1. Introduction.....	19

II.2.	Electrolytes	19
II.3.	Matériaux d'électrolyse.....	20
II.4.	L'électrolyseur de l'eau.....	21
II.5.	Les différentes technologies d'électrolyseur.....	22
II.5.1.	Electrolyseur alcalin.....	23
II.5.2.	Electrolyseur PEM.....	24
II.5.3.	Electrolyseur à haute température (PCFC ou SOFC)	25
II.6.	Comparaison des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.....	26
II.7.	Conclusion	26
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES		27
III.1.	Introduction	28
III.2.	Montage électrochimique	28
III.2.1.	Produits chimiques	28
III.2.2.	Electrodes pour la dissociation électrolytique de l'eau :	28
III.2.3.	Cellule électrochimique.....	28
III.2.4.	Les électrodes	29
III.2.4.1	Electrodes de référence.....	29
III.2.4.2	Electrode auxiliaire.....	30
III.2.4.3	Electrode de travail (ET)	30
III.2.5.	Mesures électrochimiques	30
III.2.6.	Logiciels utilisés	31
III.3.	Principe de la voltampérométrie cyclique	31
III.4.	Principe de la voltamétrie linéaire.....	33
III.5.	Conclusion.....	33
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION		34
IV.1.	Introduction	35
IV.2.	Effet du traitement électrochimique de la mousse de nickel	35
IV.2.1.	Effet du traitement électrochimique sur la REO	36
IV.2.2.	Effet du traitement électrochimique sur la REH	38
IV.3.	Effet de la concentration de l'électrolyte.....	39
IV.3.1	Sur la réaction d'oxydation de l'eau	39
IV.3.2	Sur la réaction de réduction de l'eau	40
IV.4.	Effet de la température.....	41
IV.4.1	L'effet de la température sur l'évolution de la réaction d'oxydation de l'eau	43
IV.4.2	L'effet de la température sur la réaction de réduction de l'eau	44
CONCLUSION GENERALE		46
	Conclusion générale.....	47

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	49
Références bibliographiques	50
Résumé.....	53
Abstract.....	54
ملخص.....	55

Liste des tableaux

Tableau I.1: Principales caractéristiques chimiques et physiques de H₂08

Tableau I.2: Comparaison des propriétés chimiques et physiques de l'hydrogène au gaz naturel 09

Tableau II.1: Les avantages et les inconvénients des différentes technologies d'électrolyse24

Tableau III.1 : Caractéristiques des produits utilisés dans la partie expérimentale29

Listes des figures

Figure I.1: Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie	10
Figure I.2: Schéma de principe de la décomposition photochimique de l'eau.....	13
Figure II.1: Nickel Foam for AEM Hydrogen Generation Electrolyzer	22
Figure II.2: Schéma des différents systèmes électrochimiques pour la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau	23
Figure II.3: Schéma d'un électrolyseur alcalin.....	25
Figure II.4: Schéma de principe de l'électrolyse PEM	26
Figure II.5: Principe d'électrolyse à haute température	27
Figure III.1: Montage expérimental utilisé pour l'étude des réactions l'oxydation de l'eau et la réaction de réduction de l'eau.....	30
Figure III.2: Electrode de référence Ag/AgCl utilisée dans la partie expérimentale.....	30
Figure III.3: Electrode auxiliaire en platine.....	31
Figure III.4: Schéma du dispositif expérimental pour les mesures électrochimiques	32
Figure III.5: Voltampérogramme cyclique d'un couple redox.....	33
Figure III.6: Balayage linéaire du potentiel à partir du potentiel initial E_i	34
Figure IV.1: Voltammétrie cyclique de l'électrode de nickel en milieu alcalin	37
Figure IV.2: Effet du nombre de cycles utilisés dans le traitement électrochimique de la mousse de nickel sur la REO	38
Figure IV.3: Effet du nombre de cycles utilisés dans le traitement électrochimique de la mousse de nickel sur la REH	39
Figure IV.4: Influence de la concentrationsur l'activité électrocatalytique pour la ROE	40
Figure IV.5: Influence de la concentration de l'électrolyte sur la réaction de réduction de l'eau.	41
Figure IV.6: Comparaison des voltampérogramme cycliques de l'électrode de mousse de nickel à différentes températures dans l'électrolyte KOH (1 M)	43
Figure IV.7: Variation de l'amplitude du pic et du potentiel anodique	43
Figure IV.8: L'effet de la température sur la réaction d'oxydation de l'eau.	44
Figure IV.9: L'effet de la température sur la réaction d'évolution de l'hydrogène	45

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Face aux défis énergétiques croissants et à la nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre, la recherche de sources d'énergie propres et renouvelables est devenue une priorité mondiale. Parmi les solutions envisagées, l'hydrogène se distingue comme un vecteur énergétique prometteur en raison de sa densité énergétique élevée, de son caractère non polluant et de sa capacité à être stocké et transporté. L'une des voies les plus étudiées pour produire de l'hydrogène de manière durable repose sur la dissociation catalytique de l'eau, notamment par des méthodes électrochimiques.

La dissociation de l'eau en oxygène et hydrogène (réactions d'évolution de l'oxygène OER et de l'hydrogène HER) est une réaction thermodynamiquement défavorable qui nécessite des matériaux catalytiques actifs et stables pour réduire les surtensions et améliorer les rendements. Dans ce contexte, la mousse de nickel apparaît comme un matériau catalytique très prometteur, grâce à sa structure poreuse, sa grande surface spécifique, sa bonne conductivité électrique, sa stabilité en milieu alcalin et son faible coût. Elle est largement utilisée comme support d'électrode pour les réactions électrochimiques dans des solutions basiques.

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans cette dynamique et a pour objectif principal l'étude électrochimique de la dissociation de l'eau en milieu alcalin (KOH) sur la mousse de nickel comme électrode. Cette étude repose sur l'utilisation de techniques électrochimiques telles que la voltamétrie cyclique (CV) et la voltamétrie linéaire (LSV), nous avons évalué l'influence de différents paramètres opératoires sur les performances catalytiques de l'électrode : température, concentration de l'électrolyte, effet de cyclisation, ainsi que les comportements d'oxydation et de réduction.

Ce travail vise ainsi à mieux comprendre l'efficacité de la mousse de nickel dans les mécanismes de l'OER et de la HER, et à identifier les conditions expérimentales optimales pour améliorer l'efficacité catalytique de ce matériau en milieu alcalin.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux, suivis d'une conclusion générale :

Le premier chapitre est consacré à l'introduction de l'hydrogène comme vecteur énergétique d'avenir, en mettant en évidence ses avantages dans le contexte de la transition énergétique. Ce chapitre aborde également les principales méthodes de production, ainsi que les techniques de transport et de stockage de l'hydrogène, tout en soulignant les défis scientifiques et technologiques associés.

Le deuxième chapitre porte sur les matériaux catalytiques utilisés pour l'électrolyse de l'eau, en mettant en lumière leurs performances, leurs limites et les enjeux liés à leur utilisation. Les différentes technologies d'électrolyse sont également présentées, avec un accent particulier sur les systèmes fonctionnant en milieu alcalin, considérés comme plus stables et économiquement viables.

Le troisième chapitre décrit le matériel utilisé ainsi que la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour évaluer les propriétés électrochimiques de la mousse de nickel. Ce chapitre détaille notamment les paramètres opératoires étudiés : la concentration de la solution électrolytique (KOH), la température, le nombre de cycles utilisé dans le traitement électrochimique de la mousse de nickel...etc.

Le quatrième chapitre est dédié à l'analyse des résultats expérimentaux. Nous y examinons le comportement électrochimique de la mousse de nickel en tant qu'électrocatalyseur pour la réaction d'évolution de l'hydrogène (REH) et la réaction d'évolution de l'oxygène (REO). L'influence des conditions opératoires sur les performances électrochimiques, permettant d'identifier les paramètres favorables à une activité catalytique optimale.

Finalement, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale qui permettra de résumer les principaux résultats de ce travail

CHAPITRE I : HYDROGENE

LE VECTEUR D'ENERGIE

I.1. Introduction

La transition vers des sources d'énergie plus propres et durables est devenue une priorité. Dans ce contexte, l'hydrogène suscite un intérêt croissant en tant que vecteur énergétique polyvalent. Grâce à sa forte densité énergétique massique et à sa capacité de stockage à long terme, l'hydrogène pourrait jouer un rôle clé dans l'équilibre des réseaux électriques alimentés par des énergies renouvelables intermittentes.

Toutefois, son développement à grande échelle reste conditionné par des défis technologiques, économiques et environnementaux liés à sa production, son transport et son stockage.

Ce chapitre explore les caractéristiques fondamentales de l'hydrogène, ses modes de production, ses usages énergétiques, ainsi que ses avantages et limites dans le contexte de la transition énergétique mondiale.

I.2. Les propriétés d'hydrogène

De tous les éléments chimiques, l'hydrogène est le plus léger car il possède la structure atomique la plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. De ce fait, il tient donc la première place dans la classification périodique de Mendeleïev.

Incolore, inodore, non corrosif, le dihydrogène a l'avantage d'être particulièrement énergétique. La combustion d'1 kg de ce gaz libère environ 120 MJ d'énergie alors qu'un kg d'essence en libère 45 MJ/kg (Figure 1). En raison de sa faible densité à l'état gazeux 0.08988 kg/Nm³ (Tableau 3), il faudrait 4,6 litres de dihydrogène comprimé à 700 bars pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence.

Ces volumes importants sont une contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse. Comme de nombreux combustibles, le dihydrogène peut s'enflammer ou exploser au contact de l'air. Il doit donc être utilisé avec précaution. Toutefois la taille de ses molécules lui permet de diffuser très rapidement dans l'air (quatre fois plus vite que le gaz naturel), ce qui est un facteur positif pour la sécurité.

Bien que l'hydrogène soit très abondant à la surface de notre planète, il n'existe jamais à l'état pur mais surtout combiné à l'oxygène pour former de l'eau qui couvre 70 % du globe terrestre. Le dihydrogène pourrait être utilisé comme source quasi-inépuisable d'énergie à condition de savoir le produire en quantité suffisante.

On trouve également de l'hydrogène dans les hydrocarbures qui, comme leur nom l'indique, sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. Enfin, tout organisme vivant, animal ou végétal, est composé d'hydrogène : la biomasse est donc une autre source potentielle d'hydrogène.

Tableau I.1 : Principales caractéristiques chimiques et physiques de l'hydrogène [Bain2004].

Propriété	Valeur numérique
Masse atomique	1,0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Température critique	33,3 K
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	120 MJ/kg
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	142 MJ/kg
Energie d'évaporation	445 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Chaleur spécifique Cp	14,3 kJ/kg K
Chaleur spécifique Cv	10,3 kJ/kg K

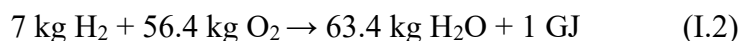
I.3. L'hydrogène : vecteur d'énergie

L'hydrogène semble très idéal. Celui-ci peut servir de carburant aux machines thermiques grâce à son pouvoir énergétique élevé (Tableau I.1).

Les progrès des piles à combustibles permettent aussi de produire, par combustion électrochimique de l'hydrogène, de l'électricité avec des rendements de 70 %.

La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène donne de l'eau sous forme vapeur, selon l'équation : $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 0.142 \text{ GJ} / \text{kg}_{(\text{H}_2)}$ (I.1)

Ou sous forme normalisée :



Cette vapeur d'eau peut être avantageusement recyclée pour obtenir l'hydrogène. Avec l'air, la

combustion dégage des oxydes d'azote. Deluchi [13, 14] a comparé les résultats de plusieurs études d'application de moteurs à combustion interne et a montré que pour l'hydrogène, les quantités rejetées restent inférieures à celles pouvant résulter de l'utilisation de l'essence ou du carburant Diesel.

Tableau I.2: Comparaison des propriétés chimiques et physiques de l'hydrogène au gaz naturel

Propriétés physique et chimique	Hydrogène	Gaz naturel
Densité gazeuse à 273 K	0,08988 kg/Nm³	0,6512 kg/Nm³
Densité liquide à 20.3 K	70,79 kg/m³	
Conductivité thermique du gaz	0,1897 W/m.K	0,034 W/m.K
Constante de gaz R/M	4124,5 J/kg.K	518,3 J/kg.K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K	813 K
Température de flamme dans l'air à 300 K	2318 K	(2148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4 - 75	5,3 - 15
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13 - 65	6,3 – 13,5
Energie minimale d'inflammation (J)	20	290
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³)	2,02	7,03
Surpression de détonation	14,7	16,8
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm/s	0,16
Vitesse de flamme dans l'air	260 km/s	7 fois le G. Naturel
Vitesse de détonation dans l'air	2,0 km/s	1,8 km/s
	29,53 %	9,48 %

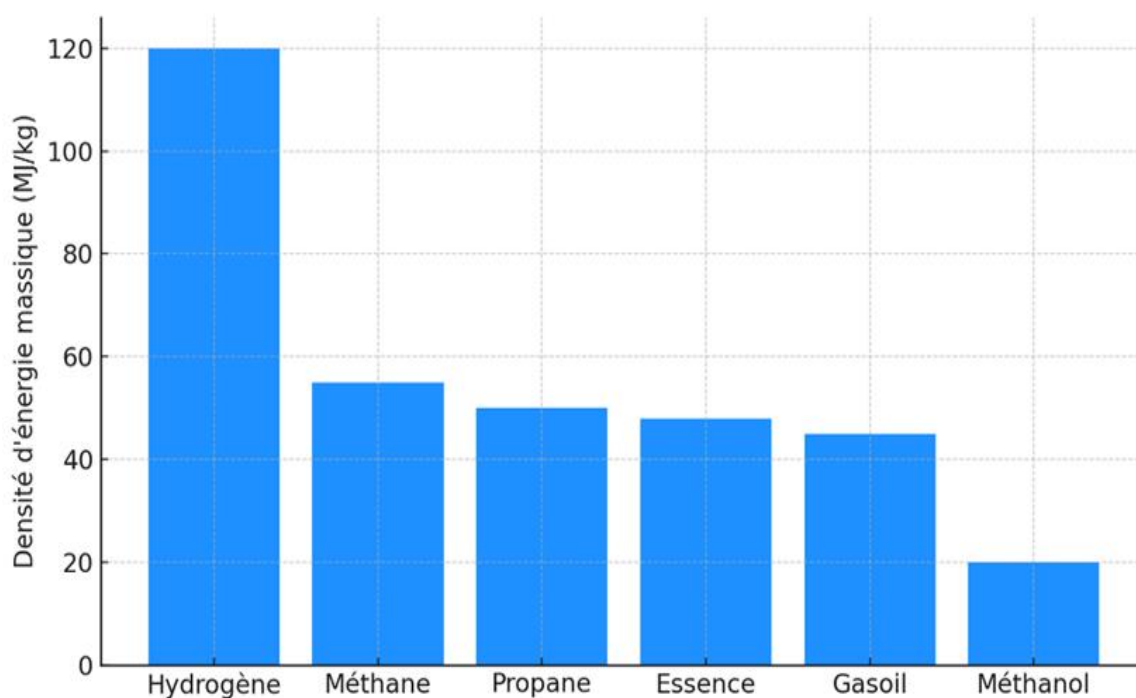


Figure I.1 : Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie [Germain, 2008].

I.4. Production de L'hydrogène

L'hydrogène, qui n'est pas présent dans la nature à l'état libre, est obtenu par dissociation des atomes avec lesquels il est associé. Dans le cas de l'eau, la séparation de l'Hydrogène et de l'oxygène nécessite une électrolyse. [Debiais, 2020].

I.4.1. Production de L'hydrogène à partir de combustibles fossiles

A l'heure actuelle, la fabrication de dihydrogène à grande échelle se fait majoritairement à partir des ressources fossiles. L'utilisation des hydrocarbures est intéressante en raison de leur disponibilité, de leur prix, de leur bonne réactivité chimique ainsi que de leur intégration dans les secteurs d'activité du raffinage et de la pétrochimie [Freund, 2012].

I.4.1.1. Hydrogène à partir du gaz naturel (vaporeformage)

Le vaporeformage du méthane (Steam Methane Reforming, SMR) est la méthode la plus répandue pour produire de l'hydrogène, représentant environ 50 % de la production mondiale. Ce procédé repose sur l'utilisation du gaz naturel (principalement du méthane) et de la vapeur d'eau à haute température. Il est très efficace mais entraîne une émission significative de CO₂, ce qui pose des enjeux environnementaux importants.

Les réactions principales sont :

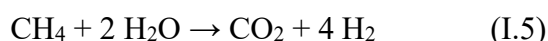
Réaction de reformage à la vapeur (endothermique, catalyseur Ni) :



Réaction de décalage du gaz à l'eau (Water-Gas Shift Reaction) :



En combinant les deux réactions, on obtient la réaction globale :



Ce procédé est réalisé à une température de 700–1000 °C et une pression de 3 à 25 bars. Le reformage peut être amélioré en association des technologies de captage et stockage du carbone (CCS).

I.4.1.2. Hydrogène à partir du carbon

La gazéification du charbon est une alternative au vaporeformage, surtout dans les régions riches en charbon. Ce procédé transforme le charbon en syngas ($\text{CO} + \text{H}_2$), qui est ensuite traité pour enrichir la teneur en hydrogène.

Réactions clés :

Combustion partielle :



Réduction du dioxyde de carbone :



Gazéification à la vapeur :



Water-Gas Shift:



L'hydrogène obtenu peut être purifié par séparation membranaire par exemple.

I.4.2. Production d'hydrogène par dissociation de l'eau

I.4.2.1. Les cycles thermochimiques

Les cycles thermochimiques permettent la production d'hydrogène sans émission directe de CO₂. Le plus étudié est le cycle soufre–iode (S–I), reposant sur trois réactions chimiques interconnectées :

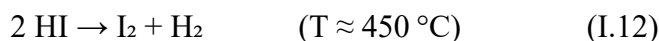
Réaction de Bunsen :



Décomposition de l'acide sulfurique :



Décomposition de l'acide iodhydrique :

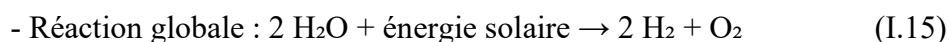
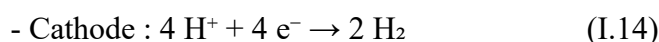
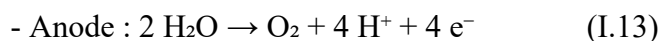


Les avantages de ce cycle sont l'utilisation d'eau comme seule matière première et la compatibilité avec l'énergie nucléaire à haute température.

I.4.2.2. Procédées photo électrochimique

La photoélectrolyse de l'eau est une méthode innovante qui utilise la lumière solaire pour exciter les électrons dans un semi-conducteur afin de séparer les molécules d'eau.

Réactions :



Les matériaux couramment utilisés pour les photoélectrodes sont TiO₂, WO₃, Fe₂O₃, ou des cellules tandem combinant différents semi-conducteurs.

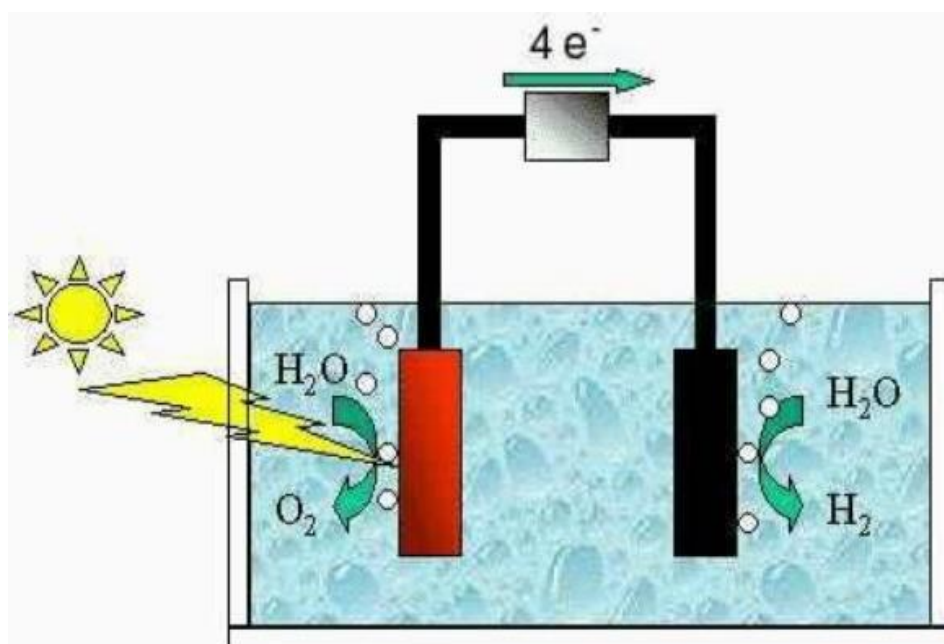
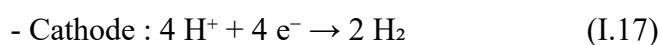
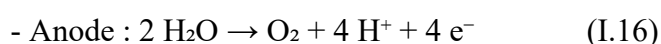


Figure I.2 : Schéma de principe de la décomposition photochimique de l'eau [Bulletin, 2006].

I.4.2.3. Procédés électrolytiques

L'électrolyse de l'eau est un procédé mature, pouvant être alimenté par de l'électricité renouvelable. Il en existe plusieurs types : électrolyse alcaline, électrolyse PEM (membrane échangeuse de protons) et électrolyse à haute température (SOEC).

Réactions électrochimiques :

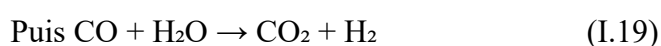
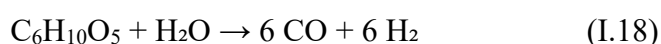


Avantages : zéro émission directe, flexibilité de fonctionnement. Inconvénient majeur : consommation énergétique élevée si électricité non verte.

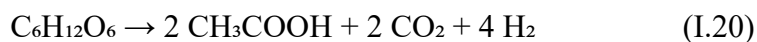
I.4.3. Production à partir de biomasse

La biomasse est une ressource renouvelable utilisée pour produire de l'hydrogène via deux principales voies :

- Gazéification :



- Fermentation sombre :

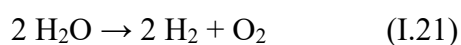


La biomasse lignocellulosique (résidus agricoles, déchets organiques) est largement disponible et améliore l'empreinte carbone de l'hydrogène.

I.4.4. Production avec l'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire peut alimenter des procédés à haute température comme :

- Électrolyse à haute température (HTSE), couplée à un réacteur nucléaire à haute température (HTGR) :



- Cycles thermochimiques comme S-I, particulièrement adaptés à la chaleur nucléaire.

L'utilisation du nucléaire permet une production massive d'hydrogène décarboné, notamment dans les stratégies H₂ de long terme.

I.5. Transport de l'hydrogène

Le transport d'hydrogène entre un centre de production et un lieu d'utilisation ou de distribution s'opère de diverses manières selon la durée souhaitée de ce transfert, la masse d'hydrogène en jeu, la géographie des lieux considérés et les facteurs technico-économiques.

I.5.1. Pipeline

Le transport d'hydrogène par pipeline est l'une des méthodes les plus rentables sur de longues distances pour de grands volumes. Il existe déjà plusieurs réseaux de pipelines d'hydrogène dans le monde (notamment en Europe, aux États-Unis et au Japon).

L'hydrogène peut être transporté sous forme gazeuse à haute pression (10 à 100 bars) ou sous forme liquide dans des conduites cryogéniques. Les matériaux utilisés doivent résister à l'embrittlement par l'hydrogène, phénomène qui fragilise certains métaux. [Dagdoui, 2011].

I.5.2. Transport par camion

Le transport routier de l'hydrogène est couramment utilisé pour des volumes moyens. Il peut se faire sous deux formes :

- Gaz comprimé dans des tubes à haute pression (350 à 700 bars).
- Hydrogène liquide cryogénique (à -253 °C), nécessitant des citernes spéciales.

Ce mode est flexible mais énergivore et coûteux pour le liquide en raison de la liquéfaction.

I.5.3. Transport par rail

Le rail est une solution émergente pour le transport massif de l'hydrogène, notamment sous forme liquide ou comprimée. Il présente des avantages environnementaux (émissions faibles) et économiques (efficacité sur longues distances).

Des prototypes de wagons-citernes pour hydrogène liquide sont en développement, principalement en Allemagne et au Japon.

I.5.4. Transport par navire

Le transport maritime est pertinent pour l'hydrogène à grande échelle entre continents. L'hydrogène peut être transporté :

- Sous forme liquide cryogénique,
- Sous forme ammoniacale (NH_3) ou LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier), plus stable et facile à stocker,

Les navires spécialisés pour le transport d'ammoniac ou de LOHC sont en cours de développement. [Bouziane, 2016].

I.6. Les applications de l'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique polyvalent dont les applications se développent dans plusieurs secteurs stratégiques, contribuant ainsi à la décarbonation de l'économie mondiale. Ces applications sont multiples, allant de l'industrie aux transports, en passant par la production d'électricité et les usages résidentiels.

I.6.1. Industrie

L'industrie est le premier secteur consommateur d'hydrogène, principalement utilisé comme matière première dans :

La production d'ammoniac (NH_3), via le procédé Haber-Bosch :



Le raffinage du pétrole, pour le désoufrage (hydrodésulfuration)

La production de méthanol :

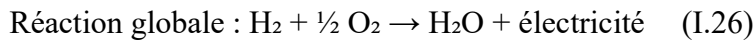
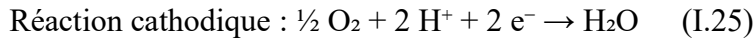
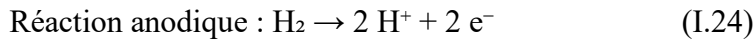


L'hydrogène est également utilisé dans la sidérurgie pour remplacer le coke comme agent réducteur dans les procédés directs de réduction du fer.

I.6.2. Mobilité

L'hydrogène alimente des véhicules à pile à combustible (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV), notamment des voitures, bus, trains et camions. Ces véhicules combinent hydrogène et oxygène

dans une pile pour produire de l'électricité :

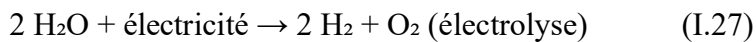


L'autonomie élevée et le temps de recharge rapide font de l'hydrogène une alternative intéressante aux batteries, surtout pour les transports lourds.

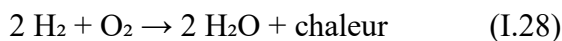
I.6.3. Production d'électricité et stockage

L'hydrogène peut servir à produire de l'électricité via des piles à combustible stationnaires ou par combustion dans des turbines adaptées. Il est également utilisé comme moyen de stockage d'énergie renouvelable dans des systèmes Power-to-Gas, où l'électricité excédentaire est convertie en hydrogène par électrolyse, selon les réactions suivantes :

Power-to-Gas :



Combustion :



L'hydrogène joue ainsi un rôle clé dans l'équilibrage du réseau et la continuité d'approvisionnement.

I.6.4. Secteur résidentiel et tertiaire

Dans certains pays (notamment au Japon et en Corée du Sud), l'hydrogène est utilisé pour alimenter des systèmes de cogénération résidentiels (appelés ENE-FARM), qui produisent simultanément électricité et chaleur domestique à partir de H_2 .

I.7. Stockage de l'hydrogène

I.7.1. Stockage gazeux

Le stockage gazeux de l'hydrogène est l'une des méthodes les plus simples et les plus répandues. Il consiste à stocker l'hydrogène sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs à haute pression, typiquement entre 350 et 700 bars. Ce type de stockage est largement utilisé dans les applications de mobilité (véhicules à hydrogène) et dans les installations stationnaires. Des matériaux composites modernes renforcés de fibres de carbone sont employés pour garantir la sécurité et minimiser le poids des réservoirs. Cette méthode de stockage a l'avantage d'une technologie mature en plus de la facilité de remplissage et la bonne réversibilité. Cependant, le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz nécessite des matériaux résistants à la pression en plus d'une infrastructure de compression coûteuse.

I.7.2. Stockage liquide

Le stockage sous forme liquide implique de refroidir l'hydrogène à une température cryogénique de -253 °C, ce qui permet d'augmenter sa densité volumique. Ce procédé nécessite des réservoirs isothermes complexes avec isolation sous vide. Il est utilisé principalement dans les domaines spatial, maritime et dans certaines applications industrielles où l'espace est limité. Cette technique de stockage offre une haute densité énergétique avec moins d'encombrement en plus de son adaptabilité aux applications de longue distance. D'un autre côté, le stockage liquide de l'hydrogène requiert des coûts énergétiques élevés pour la liquéfaction, pertes par évaporation (boil-off) et nécessite une isolation thermique poussée pour minimiser les risques liés aux variations de température.

I.7.3. Stockage solide

Le stockage solide repose sur l'absorption ou l'adsorption d'hydrogène dans des matériaux solides tels que les hydrures métalliques (LaNi_5H_6 , MgH_2), les structures poreuses (MOFs – Metal-Organic Frameworks), ou les nanomatériaux à base de carbone. Ces matériaux permettent de stocker l'hydrogène à des pressions et températures modérées, ce qui améliore à la fois, la sécurité et la densité énergétique.

Réaction typique avec hydrures :



Ce mode de stockage de l'hydrogène offre une sécurité accrue, une densité énergétique satisfaisante en raison de l'absence de risques de fuites gazeuses. Cependant, la cinétique lente, le besoin d'activation thermique pour la libération de l'hydrogène et le coût et la complexité des matériaux constituent des inconvénients à surmonter.

I.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté les diverses technologies de production, d'utilisation, de distribution et de stockage de l'hydrogène.

A travers ce chapitre, il ressort que, L'hydrogène semble être la solution miracle pour surmonter la crise énergétique et environnementale actuelle. Effectivement, l'hydrogène apparaît comme inépuisable et se trouve partout sous forme d'eau, ce qui permet de le produire dans tous les pays, résolvant ainsi les tensions économiques et sociopolitiques entre les pays. En outre, il ne génère apparemment aucune pollution s'il est issu d'énergies propres.

***CHAPITRE II : MATERIAUX
D'ELECTROLYSE DE L'EAU***

II.1. Introduction

L'électrolyse de l'eau est un processus clé dans la production de l'hydrogène. Ce processus repose sur l'utilisation d'un électrolyte et des électrodes qui facilitent la dissociation de l'eau en hydrogène et oxygène lorsque soumise à un courant électrique. Il est alors important de bien choisir ces deux composants afin de garantir un rendement élevé de l'électrolyseur.

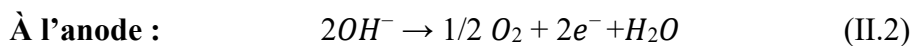
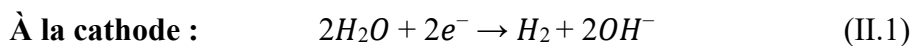
II.2. Electrolytes

Les électrolytes utilisés dans le processus d'électrolyse influencent la conductivité ionique et la stabilité du système. Parmi lesquels, on trouve :

- **Solutions alcalines :**

Les électrolytes alcalins sont généralement privilégiés par rapport aux milieux acides pour l'électrolyse de l'eau, en raison notamment des problèmes de corrosion associés aux environnements acides. À titre d'exemple, l'hydroxyde de potassium (KOH) est fréquemment utilisé en raison de sa bonne conductivité électrique. Par ailleurs, les électrodes en nickel sont souvent choisies dans ces conditions, car elles présentent une excellente stabilité en milieu alcalin.

Dans une solution alcaline, les réactions électrochimiques suivantes ont lieu :



- **Électrolytes acides :**

Les électrolytes acides comme l'acide sulfurique (H_2SO_4) ou l'acide perchlorique (HClO_4) sont utilisés pour fournir les ions H^+ nécessaires à la conduction du courant électrique. Ce type de milieu favorise une bonne cinétique des réactions électrochimiques, mais présente l'inconvénient majeur d'être très corrosif, ce qui nécessite l'utilisation d'électrodes nobles et coûteuses comme le platine (Pt) ou l'iridium (Ir) pour assurer la stabilité à long terme.

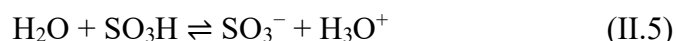
Les réactions électrochimiques se déroulent comme suit :



- **Électrolytes à membrane échangeuse de protons (PEM) :**

L'électrolyte de l'électrolyseur PEM joue à la fois le rôle de conducteur protonique et de diaphragme. Il est constitué d'une membrane composée de fluoropolymère solide comprenant

des groupements acides sulfoniques (SO_3H). Ces groupes se transforment aisément en leur base conjuguée, selon la réaction suivante, sous l'action d'un champ électrique :



II.3. Matériaux d'électrolyse

Les électrodes : Le choix des matériaux pour les électrodes dépend principalement de leur conductivité électrique, de leur stabilité chimique dans l'électrolyte utilisé (acide ou alcalin), et de leur coût. Parmi les matériaux les plus utilisés, on distingue :

- **Les métaux nobles :** Le platine (Pt) et le rhodium (Rh) sont largement utilisés en raison de leur excellente conductivité électrique et de leur grande résistance à la corrosion, notamment en milieu acide. Toutefois, leur rareté et leur coût élevé limitent leur emploi à des applications spécifiques ou à petite échelle.
- **Les matériaux à base de carbone :** Le graphite et d'autres formes de carbone conducteur sont appréciés pour leur faible coût et leur bonne conductivité. Cependant, ils présentent une stabilité chimique et une activité électrocatalytique plus faibles, en particulier en milieu acide, ce qui limite leur efficacité à long terme.
- **Les oxydes métalliques :** Certains oxydes, comme ceux de nickel (NiO) et de cobalt (Co_3O_4), offrent un bon compromis entre performance électrochimique, stabilité et coût. Ils sont surtout utilisés en milieu alcalin, bien que des recherches récentes explorent leur application en milieu acide, avec des résultats prometteurs grâce à des traitements de surface ou des dopages spécifiques.
- **La mousse de nickel :** Par conséquent, la mousse de nickel est considérée comme un matériau poreux 3D prometteur pour une utilisation comme substrat catalytique et électronique en raison de sa structure à pores ouverts, de son faible coût, de sa résistance mécanique et de sa stabilité relative en solutions acides et alcalines. De plus, elle offre une résistance élevée aux flammes et une excellente résistance aux vibrations [Peng, 2020]. Elle offre également une conductivité électrique élevée avec une faible résistance d'environ 69 $\text{n}\Omega/\text{m}$. De plus, la structure lâche et large de ce substrat permet un contact optimal des matériaux actifs avec l'électrolyte, ce qui favorise le transport des espèces à la surface de l'électrode. De plus, les canaux transversaux et en zigzag de la mousse de nickel peuvent raccourcir les voies de transport de masse ionique et électronique, offrant ainsi une surface spécifique élevée. Cependant, la nanostructure poreuse de la mousse de nickel peut

améliorer la cinétique de réaction et tolérer les modifications de volume des matériaux d'électrode

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à ce matériau innovant qui a montré son efficacité dans le cadre de la catalyse de réaction électrochimique dans les applications de capteurs, piles et de piles à combustible.



Figure II.1. Mousse de nickel pour générateur d'hydrogène par électrolyse

II.4. L'électrolyseur de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un procédé qui utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en deux gaz : le dioxygène (O_2) et le dihydrogène (H_2). Cette opération nécessite une cellule électrolytique, composée de deux électrodes — une anode et une cathode — immergées dans une solution conductrice appelée électrolyte, généralement de l'eau additionnée de sel ou d'acide sulfurique ou de sels alcalin pour améliorer la conductivité.

Quelque soit le type d'électrolyseur (Figure II.2), le produit final est le même. À l'anode, une réaction d'oxydation a lieu : les molécules d'eau perdent des électrons, libérant ainsi de l'oxygène gazeux. À la cathode, c'est une réaction de réduction qui se produit : les ions hydrogène gagnent des électrons et se transforment en hydrogène gazeux (H_2).

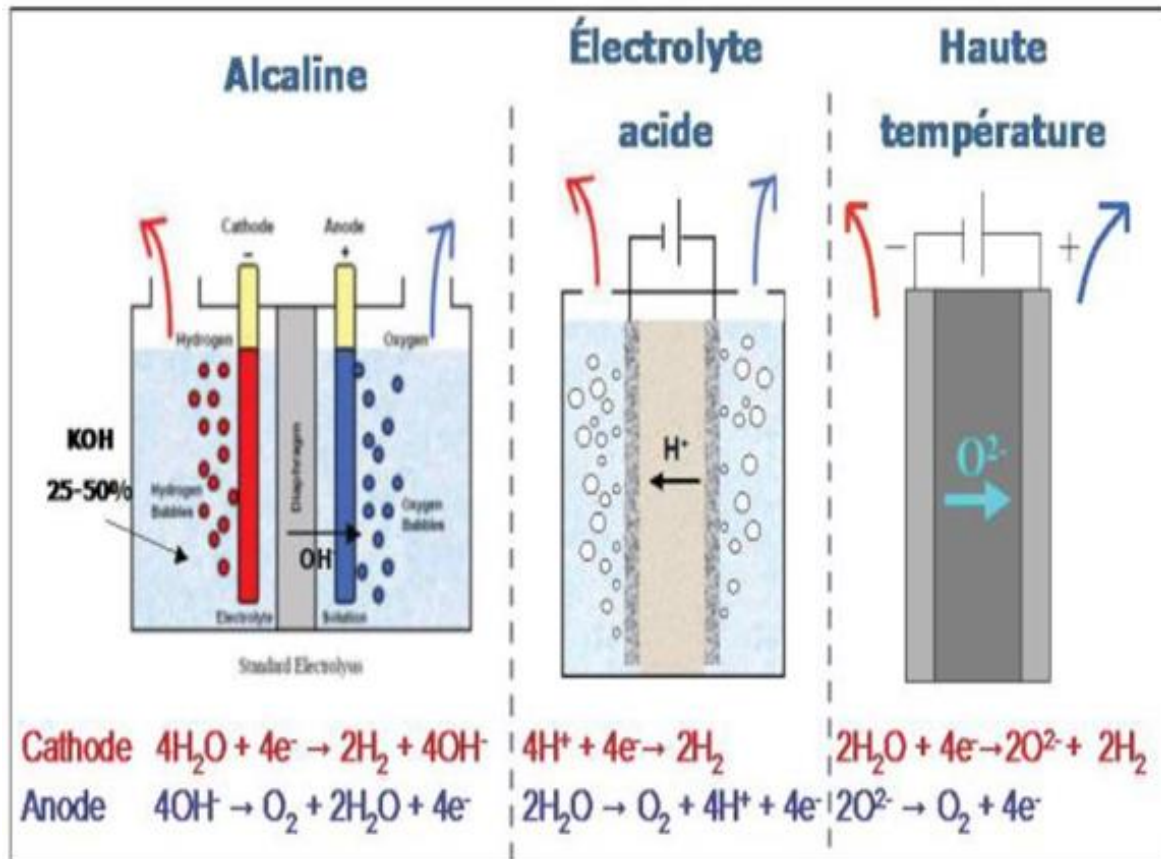


Figure II.2 : Schéma des différents systèmes électrochimiques pour la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

II.5. Les différentes technologies d'électrolyseur

Les technologies d'électrolyse de l'eau en développement varient selon la configuration cellulaire (mono- ou bipolaire) et le type d'électrolyte utilisé : alcalin, PEM, PCFC ou SOFC. Le processus se déroule dans une cellule électrochimique composée d'une anode, d'une cathode et d'un électrolyte ionique, alimentée par un courant électrique (voir Figure II.2).

Selon la nature de l'électrolyte (acide, alcalin ou à haute température), les réactions aux électrodes diffèrent, mais produisent toujours hydrogène et oxygène. Le choix des matériaux est déterminant pour la performance du système.

Cette étude se focalise sur l'électrolyse en milieu alcalin concentré, en raison de ses caractéristiques spécifiques (Tableau II.1).

Tableau II.1 : Les avantages et les inconvénients des différentes technologies d'électrolyse de l'eau

Électrolyse en milieu basique.	Électrolyse à haute température.	Électrolyse en milieu acide PEM.
Avantages		
- Catalyseurs non nobles.	- Coût d'énergie bas.	
- Technique opérationnelle aisée.	- Catalyseurs moins chers.	- Densité de courant élevée.
- Stabilité à long terme.	- Mise en marche à haute pression.	- Grande efficacité
- Procédé relativement moins coûteux.	- Grande efficacité	- Des gaz très purs.
		- Système compacte.
Inconvénients		
- Des densités de courant faibles.	- Moins durable.	- Des catalyseurs nobles.
- Utilisation d'un diaphragme.	- Ses matériaux sont fragiles.	- Coût élevé de l'électrolyse solide.
- Liquide d'électrolyse corrosif.	- Source de chaleur.	- Milieu corrosif.
	- Phase d'essai.	

II.5.1. Electrolyseur alcalin

L'électrolyse alcaline de l'eau est privilégiée par rapport à la voie acide en raison de la faible corrosion des composants. Les électrodes en nickel, stables en milieu alcalin, renforcent la durabilité du système, ce qui explique sa large adoption industrielle (Figure II.3). Les électrolyseurs alcalins sont disponibles sous forme de modules de 0,5 à 800 Nm³/h

Le KOH est couramment utilisé comme électrolyte en raison de sa bonne conductivité ionique. Les densités de courant appliquées varient généralement entre 100 et 300 mA/cm².

Cependant, la consommation énergétique reste élevée, entre 4,5 et 5 kWh/Nm³ de H₂, limitant la compétitivité économique du procédé. L'amélioration de l'efficacité énergétique constitue donc un enjeu majeur pour le développement à grande échelle de cette technologie. [Pierre ,2005]

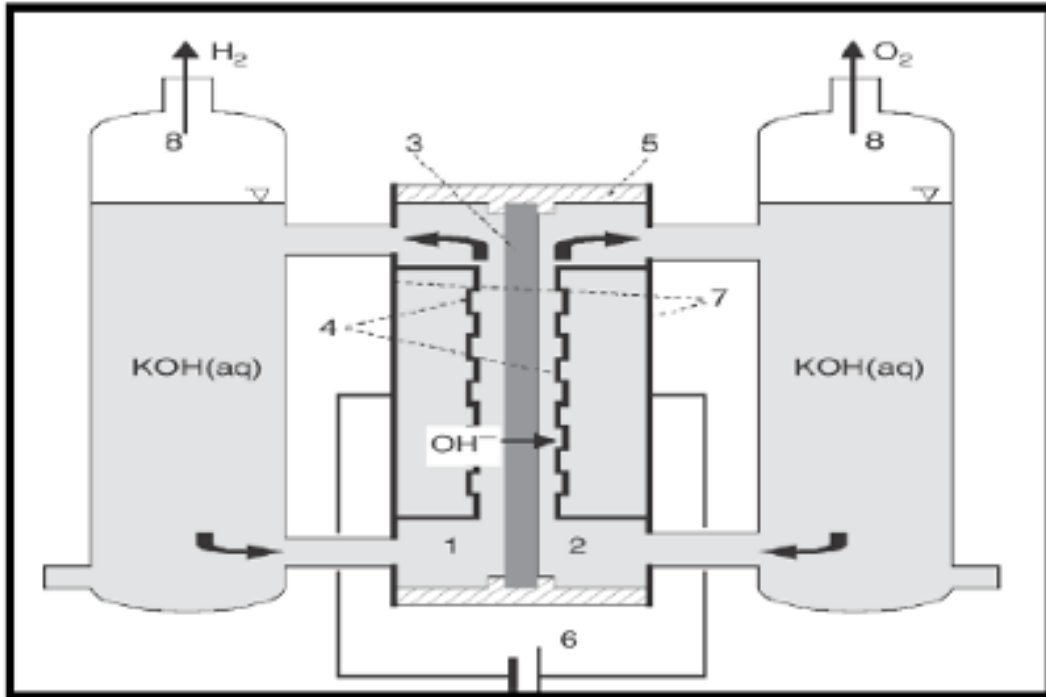
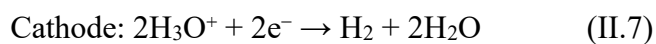
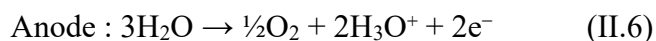


Figure II.3 : Schéma d'un électrolyseur alcalin : Compartiment anodique (1), compartiment cathodique (2), diaphragme (3), électrodes (4), cadre de la cellule (5), alimentation en courant continue (6), end plates (7), séparateurs du gaz (8)

II.5.2. Electrolyseur PEM

L'électrolyseur PEM (à membrane échangeuse de protons) se distingue par l'utilisation d'un électrolyte solide – une membrane polymère – assurant la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et la séparation efficace des gaz générés (H_2 et O_2), selon les réactions suivantes :



La membrane est composée d'un fluoropolymère fonctionnalisé par des groupes acides sulfoniques (HSO_3), qui se convertissent facilement en ions SO_3^- (Figure II.4).

Parmi les avantages de cette technologie figurent une mise en service rapide, une faible corrosion et de bonnes performances, avec une compatibilité élevée avec les énergies renouvelables. Cependant, le recours à des catalyseurs à base de métaux nobles et à des membranes onéreuses en accroît considérablement le coût par rapport aux électrolyseurs alcalins. [Pierre ,2005].

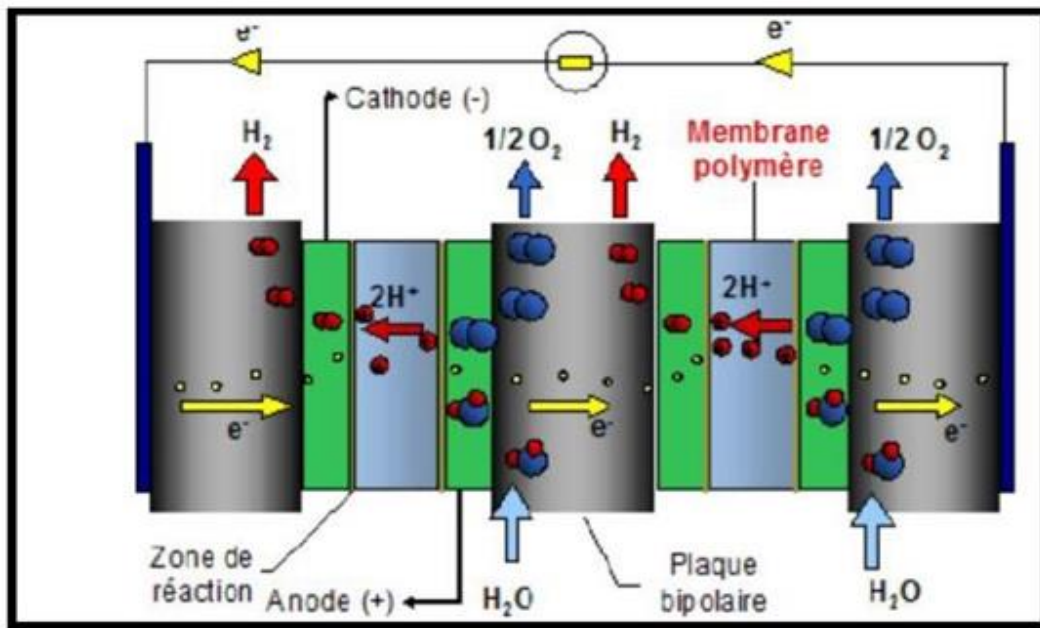


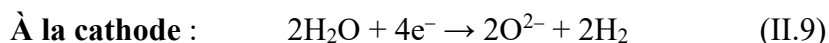
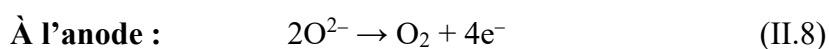
Figure II.4 : Schéma de principe de l'électrolyse PEM.

II.5.3. Electrolyseur à haute température (PCFC ou SOFC)

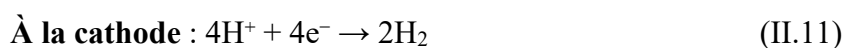
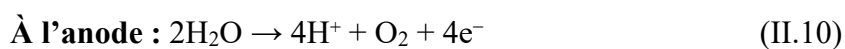
L'électrolyse à haute température se révèle plus efficace que celle à température ambiante, une partie de l'énergie requise étant fournie sous forme de chaleur, généralement moins coûteuse. Cette technologie est mise en œuvre dans les piles à combustible de type PCFC ou SOFC (Figure II.5), fonctionnant respectivement entre 400–600 °C et 650–1000 °C, avec un rendement pouvant dépasser 80 %. Alimentés simultanément en électricité et en chaleur, ces systèmes suscitent un fort intérêt dans le domaine de la recherche.

Le procédé repose sur la décomposition de la vapeur d'eau à la cathode, les réactions électrochimiques variant selon la nature de l'électrolyte :

- **Électrolyte conducteur d'ions superoxyde (O^{2-})**



- **Électrolyte conducteur de protons (H^+)**



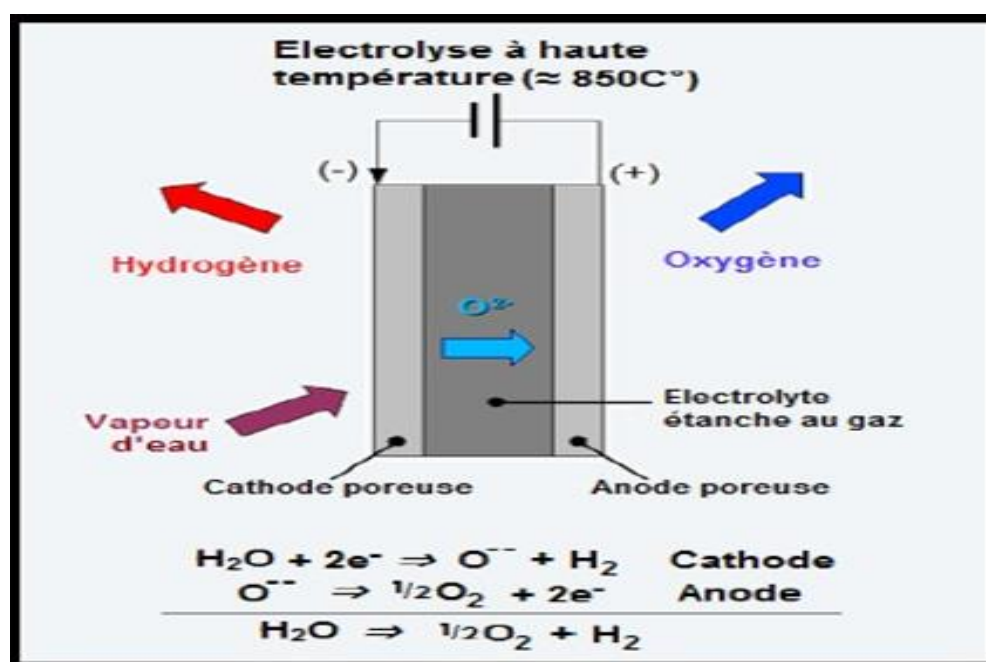


Figure II.5 : Principe d'électrolyse à haute température.

II.6. Comparaison des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Les principaux avantages et limites des différentes technologies d'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène sont synthétisés dans le Tableau II.1. L'analyse de ce tableau met en évidence que chaque technologie, en fonction de ses caractéristiques spécifiques, peut répondre à des besoins ciblés. Par exemple, l'électrolyse PEM est particulièrement adaptée au stockage des énergies renouvelables, grâce à sa capacité à gérer efficacement les variations rapides de la production électrique solaire ou éolienne, en convertissant l'électricité excédentaire en hydrogène [ROZAIN, 2013].

II.7. Conclusion

Ce chapitre a permis d'examiner le principe de l'électrolyse de l'eau, les facteurs influençant son rendement, ainsi que les principales technologies disponibles et leur comparaison. Cette analyse a conduit à l'identification de la technologie d'électrolyse la plus appropriée pour notre projet, ainsi que du type d'électrode à utiliser, en l'occurrence ; l'électrode de mousse de nickel utilisée dans un électrolyte alcalin.

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les différents composants du dispositif utilisé pour l'électrodéposition et l'étude de l'électrolyse de l'eau, ainsi que les produits chimiques employés.

III.2. Montage électrochimique

III.2.1. Produits chimiques

Le principal produit chimique utilisé dans cette étude est l'hydroxyde de potassium. Il représente l'électrolyte permettant la conduction électrique de la solution. Ses propriétés sont rassemblées dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Caractéristiques des produits utilisés dans la partie expérimentale.

Produit chimie	Nom de produit	Formule brute	Masse molaire (g/mol)	Producteur
Electrolyte Support	Hydroxyde de Potassium	KOH	56,11	Riedel-de-Haën

III.2.2. Electrodes pour la dissociation électrolytique de l'eau :

Les réactions d'oxydation et de réduction de l'eau ont été étudiées sur l'électrode à mousse de nickel. A partir d'une feuille de mousse de nickel d'une épaisseur de 2 mm un rectangle d'une longueur de 8 mm et de largeur de 5 mm. Cette électrode a été maintenue par une pince métallique reliée au potentiostat. Un fin ruban de Teflon a été enroulé au milieu de l'électrode afin de limiter la partie à immerger dans la solution électrolytique.

III.2.3. Cellule électrochimique

Toutes les étapes de cette expérience ont été réalisées dans une cellule électrochimique en verre PYREX d'une capacité de 150 ml, munie d'un couvercle comportant cinq ouvertures. Trois d'entre elles permettent l'introduction des électrodes nécessaires à l'électrodéposition, comme illustré dans la figure ci-dessous.

Un volume de 20 ml de solution de KOH a été utilisé pour le dépôt. La solution contient les trois électrodes classiques d'un système électrochimique : l'électrode de référence, l'électrode auxiliaire et l'électrode de travail (Figure III.1).

Un thermomètre a également été introduit dans la solution électrolytique afin de mesurer la température, en particulier lors de l'étude de l'effet de la température sur le processus.

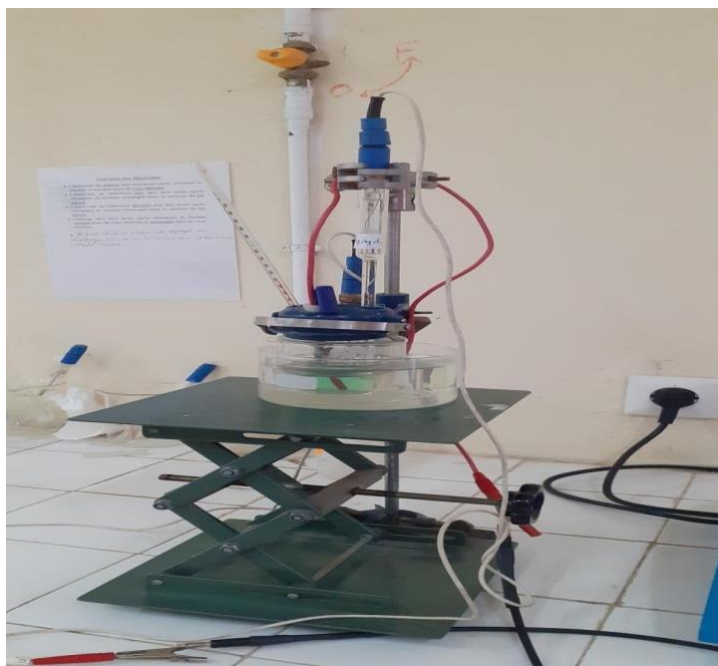


Figure III.1: Montage expérimental utilisé pour l'étude des réactions d'oxydation de l'eau et la réaction de réduction de l'eau.

III.2.4. Les électrodes

III.2.4.1 Electrode de référence

L'électrode de référence utilisée dans ce travail est une électrode d'argent/chlorure d'argent (Ag/AgCl) saturée en KCl. Elle possède un potentiel de +0,197 V par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH).

Afin d'éviter toute contamination de l'électrode, celle-ci n'a pas été immergée directement dans la solution électrolytique. Une allonge remplie de KCl a été interposée pour assurer le contact électrochimique tout en protégeant l'électrode de référence d'un éventuel encrassement.



Figure III.2: Electrode de référence Ag/AgCl utilisée dans la partie expérimentale.

III.2.4.2 Electrode auxiliaire

Un fil de platine de 10 mm de long et de 1 mm de diamètre a été utilisé comme contre-électrode tout au long de notre travail. L'électrode de platine est souvent utilisée en raison de la noblesse du métal qui lui confère une grande résistance au phénomène de corrosion.



Figure III.3: Electrode auxiliaire en platine.

III.2.4.3 Electrode de travail (ET)

Dans cette étude, la mousse de nickel avec les dimensions 8 mm 5 mm × 2 mm a été utilisée. La barre de nickel de forme cylindrique ayant les dimensions 4 mm de diamètre et 6 mm de long a été utilisée à titre comparatif. Pour garantir l'uniformité des mesures, la partie de la mousse de nickel immergée dans la solution électrolytique a été limitée à 5mm.

La surface totale immergée de la barre de nickel a été calculée comme suit :

La surface de la barre de nickel:

$$S = \pi r^2 + 2\pi r l = 201.06 \text{ mm}^2$$

La surface de la mousse de nickel :

$$S = 1,759 \text{ cm}^2$$

Il est à noter que cette surface est géométrique et elle très différente de la surface réelle que fournit ce matériau.

III.2.5. Mesures électrochimiques

Les tests d'oxydation et de réduction de l'eau ont été réalisés à l'aide d'un potentiostat VoltaLab modèle PGP201, piloté par un microordinateur via le logiciel Voltamaster 4. Ce logiciel permet de configurer et de contrôler les paramètres expérimentaux en fonction de la technique électrochimique sélectionnée (voir figure III.5). Les méthodes électrochimiques employées dans cette étude sont principalement la voltamétrie cyclique et la voltamétrie linéaire.

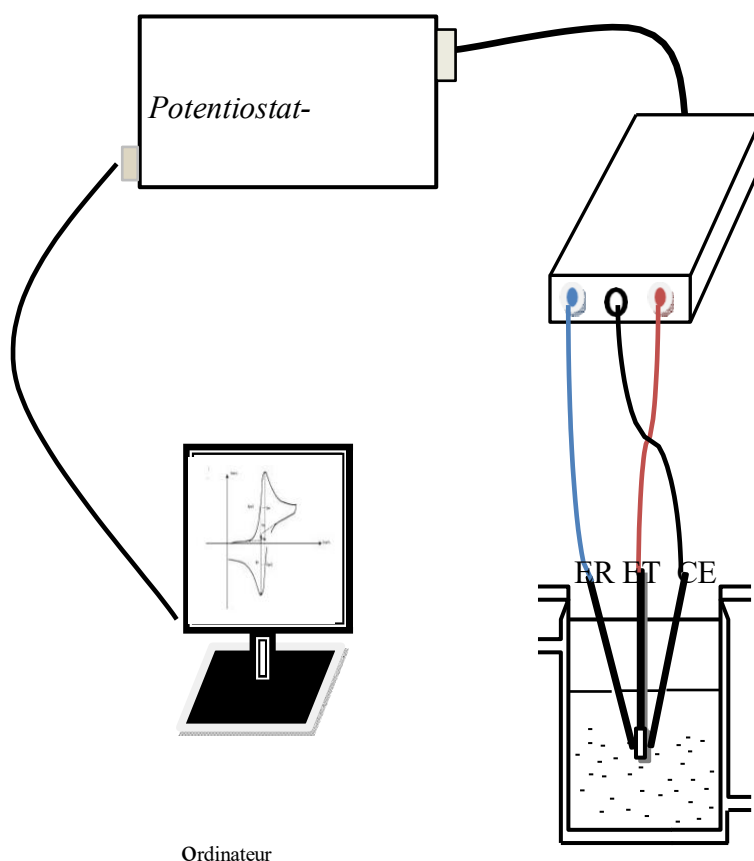


Figure III.4: Schéma du dispositif expérimental pour les mesures électrochimiques.

III.2.6. Logiciels utilisés

Les courbes et figures ont été tracées à l'aide du logiciel Microcal Origin 6.0.

Le logiciel Voltamaster 4 a permis de visualiser les courbes obtenus directement sur l'ordinateur relié au potentiostat.

III.3. Principe de la voltampérométrie cyclique

Cette approche repose sur un balayage en potentiel dans une plage définie, à une vitesse contrôlée, permettant de mesurer le courant circulant dans le système en fonction du potentiel appliqué. Cette méthode, appelée voltamétrie cyclique, permet d'identifier les réactions électrochimiques se produisant à l'interface entre les électrodes et la solution électrolytique. Par convention, le courant est dit cathodique lorsqu'il est négatif (réduction) et anodique lorsqu'il est positif (oxydation).

Le potentiel de l'électrode de travail est modifié de façon linéaire avec le temps dans les deux directions, formant ainsi un cycle. La mesure du potentiel s'effectue entre l'électrode de travail

et l'électrode de référence, tandis que le courant est mesuré entre l'électrode de travail et la contre-électrode.

Dans tout le chapitre IV, les données expérimentales sont représentées sous forme de courbes : $i = f(E)$, illustrant l'intensité du courant en fonction du potentiel. Lors du balayage, l'apparition d'un pic de courant signale la survenue d'une réaction électrochimique. À mesure que le potentiel atteint une valeur suffisante pour initier la réduction de l'électrolyte, le courant augmente, puis diminue en raison de l'épuisement local de l'espèce électroactive à la surface de l'électrode. La forme des pics d'oxydation et de réduction est généralement symétrique et dépend de divers paramètres, tels que la cinétique des réactions, la solubilité des espèces, les réactions chimiques associées (précédant ou suivant l'acte électrochimique), ainsi que la nature du substrat utilisé [Harzalah, 2006].

Les principales grandeurs caractéristiques d'un voltampérogramme sont illustrées dans la figure III.5.

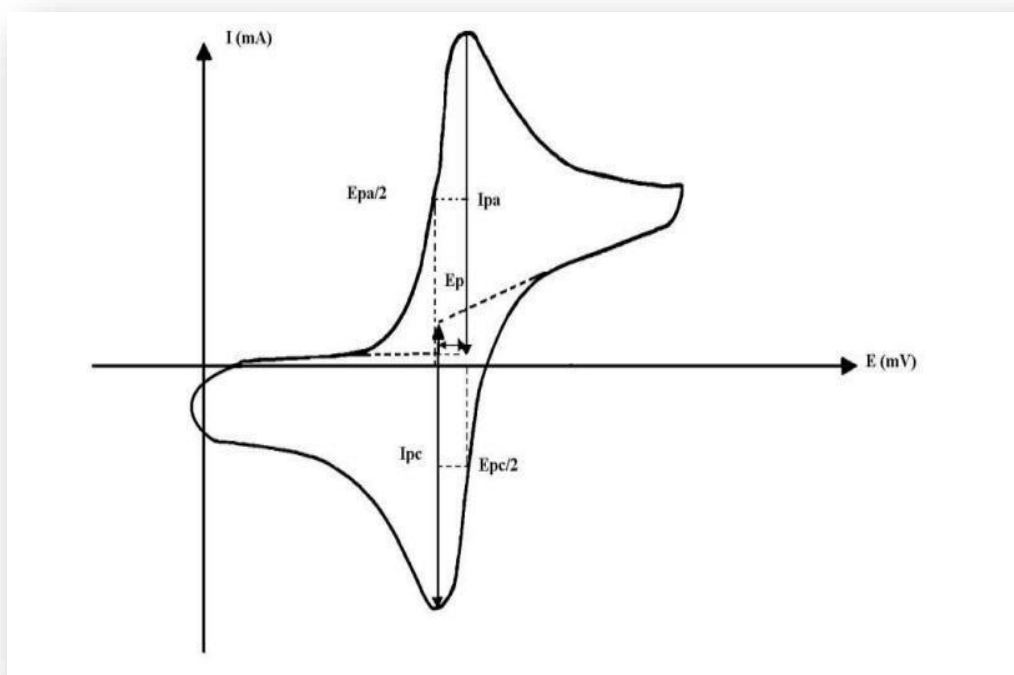


Figure III.5: Voltampérogramme cyclique d'un couple redox.

Avec :

- I_{pa} , I_{pc} : Courant de pic anodique et cathodique
- E_{pa} , E_{pc} : Potentiels de pic anodique et cathodique

III.4. Principe de la voltamétrie linéaire

La voltamétrie linéaire (LSV) est considérée comme l'une des techniques électrochimiques les plus simples. Bien que la LSV soit similaire à la voltammétrie cyclique (CV), elle ne comporte qu'un seul balayage linéaire du potentiel, allant de la limite inférieure à la limite supérieure. La LSV utilise un système à trois électrodes, tout comme la CV.

Dans cette technique voltammétrique, le potentiel est balayé linéairement en fonction du temps entre l'électrode de référence et l'électrode de travail, et le courant est mesuré à l'électrode de travail. Le potentiel auquel les espèces commencent à subir une oxydation ou une réduction se manifeste sous la forme d'un creux ou d'un pic dans le signal de courant (Figure III.6).

La concentration de l'espèce peut être déterminée à partir de la hauteur du courant limite, et l'identification de l'espèce inconnue est obtenue à partir du potentiel à mi-hauteur ($E_{1/2}$). Lorsque la vitesse de balayage augmente, la sensibilité du courant en fonction de la tension augmente également. La réaction rédox à l'électrode de travail s'intensifie avec une variation plus rapide du potentiel (plus de volts par seconde).

Le système LSV comprend trois électrodes : l'électrode de référence (ER), l'électrode de travail (ET) et l'électrode auxiliaire (EA), ainsi qu'un potentiostat. Le potentiostat applique le potentiel au système à trois électrodes. Une cellule électrochimique contenant ces trois électrodes et la solution électrolytique d'intérêt est connectée au potentiostat [Jamballi G Manjunatha].

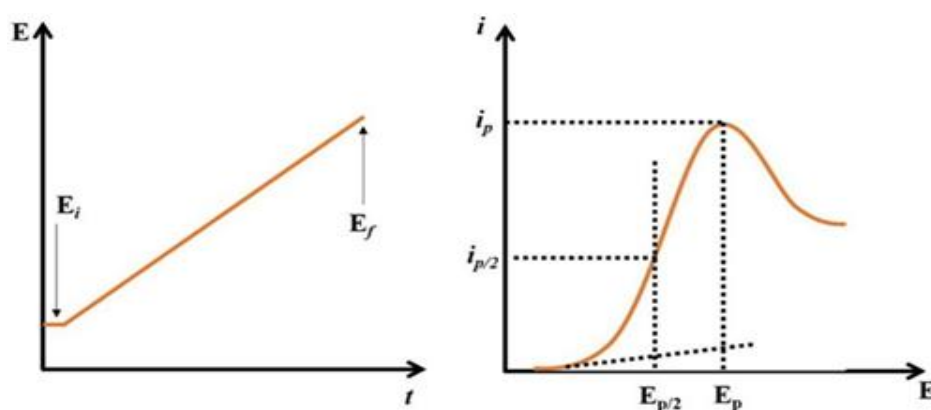


Figure III.6: Balayage linéaire du potentiel à partir du potentiel initial E_i

III.5. Conclusion

Les méthodes mises en œuvre dans la partie expérimentale de ce mémoire ont été rigoureusement suivies. Les protocoles relatifs à l'électrodéposition ainsi qu'à l'étude de la variation des conditions opératoires seront présentés en détail dans le chapitre IV.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude électrochimique de la mousse de nickel en tant que catalyseur pour l'électrolyse de l'eau. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de différentes conditions opératoires ; notamment la concentration de la solution électrolytique, la température opératoire, ainsi que le nombre de cycles appliqués lors du traitement électrochimique de la mousse de nickel sur ses performances vis-à-vis de la réaction d'évolution de l'hydrogène et la réaction d'évolution de l'oxygène.

Pour ce faire, des techniques électrochimiques telles que la voltammétrie cyclique (CV) et la voltammétrie linéaire (LSV) ont été mises en œuvre afin de caractériser le comportement électrocatalytique de la mousse de nickel. Ces analyses permettent de mieux comprendre les mécanismes de réaction en jeu et d'identifier les conditions optimales pour maximiser l'activité catalytique de ce nouveau matériau.

IV.2. Effet du traitement électrochimique de la mousse de nickel

Le nickel métallique présente une activité catalytique relativement faible pour les réactions d'oxydation de l'eau. Il est donc essentiel de le convertir en hydroxyde de nickel ; Ni(OH)_2 , en milieu alcalin afin d'améliorer ses performances électrocatalytiques. Dans cette optique, nous avons étudié l'influence du nombre de cycles électrochimiques appliqués sur les performances de la mousse de nickel vis-à-vis de la réaction d'évolution de l'oxygène (REO) et de l'oxydation de l'eau.

Pour ce faire, les électrodes ont été immergées dans une solution de KOH 1 M, puis soumises à un traitement électrochimique visant à oxyder le nickel en Ni(OH)_2 . Ce traitement a consisté à balayer le potentiel entre 0 mV et 1100 mV, à une vitesse de balayage de 10 mV/s, en appliquant un, deux ou cinq cycles successifs. À l'issue de cette étape, les électrodes ainsi traitées étaient prêtes pour les mesures électrochimiques.

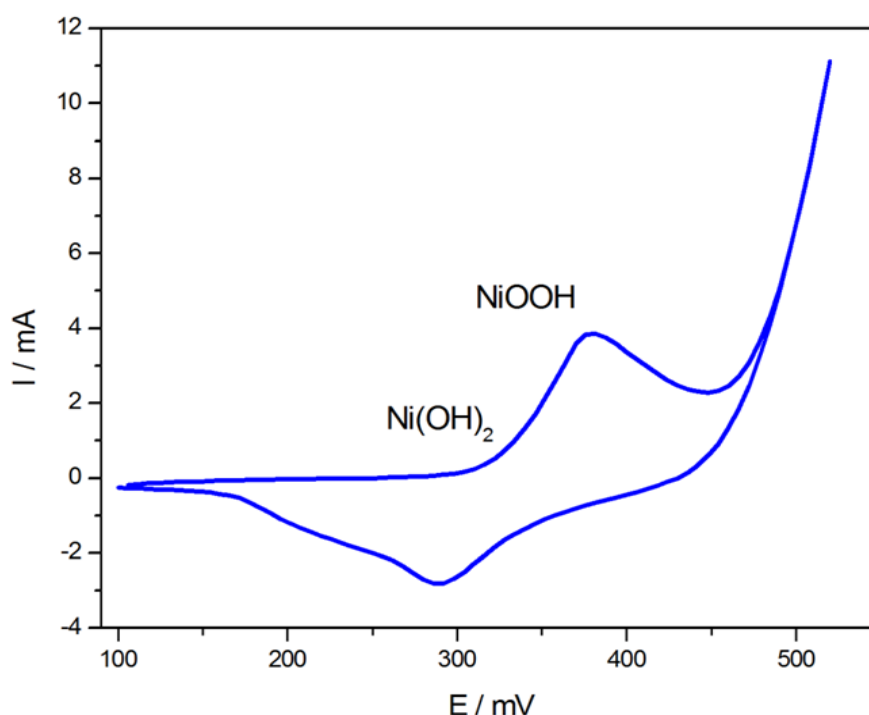
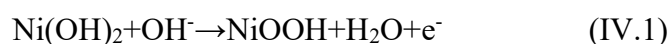


Figure IV.1 : Voltammétrie cyclique de l'électrode de nickel en milieu alcalin.

La figure IV.1 montre la courbe de voltammétrie cyclique obtenue. On observe deux pics distincts : un pic d'oxydation lors du balayage direct, et un pic de réduction lors du retour.

Le pic d'oxydation, situé aux alentours de 379 mV, correspond à l'oxydation du nickel sous forme Ni(II) en oxyhydroxyde de nickel Ni(III) selon la réaction suivante :



Lors du balayage inverse, le pic de réduction observé autour de 287 mV correspond à la réduction du NiOOH en Ni(OH)₂, formant un couple redox réversible Ni(II)/Ni(III).

Le traitement électrochimique appliqué ici a pour objectif de former une couche active de Ni(OH)₂ à la surface du nickel métallique. À mesure que le potentiel augmente, la quantité de Ni(OH)₂ formée augmente également, ce qui améliore l'activité catalytique de l'électrode. À des potentiels plus élevés (au-delà de 478 mV), on note une augmentation du courant anodique, indiquant le début de la réaction d'évolution de l'oxygène (ROE), ce qui confirme l'activation progressive de l'électrode.

IV.2.1. Effet du traitement électrochimique sur la REO

La figure IV.2 illustre les courbes de voltammétrie linéaire qu'on a obtenues pour des électrodes de mousse de nickel traitées par 1, 2 et 5 cycles électrochimiques dans une solution

de KOH 1 M, avec une vitesse de balayage fixée à 10 mV/s. Le potentiel a été balayé dans le sens anodique à partir d'un potentiel de 0,0V à +1,1V, dans le but de suivre l'activité électrocatalytique vis-à-vis de la réaction d'oxydation de l'eau (ROE).

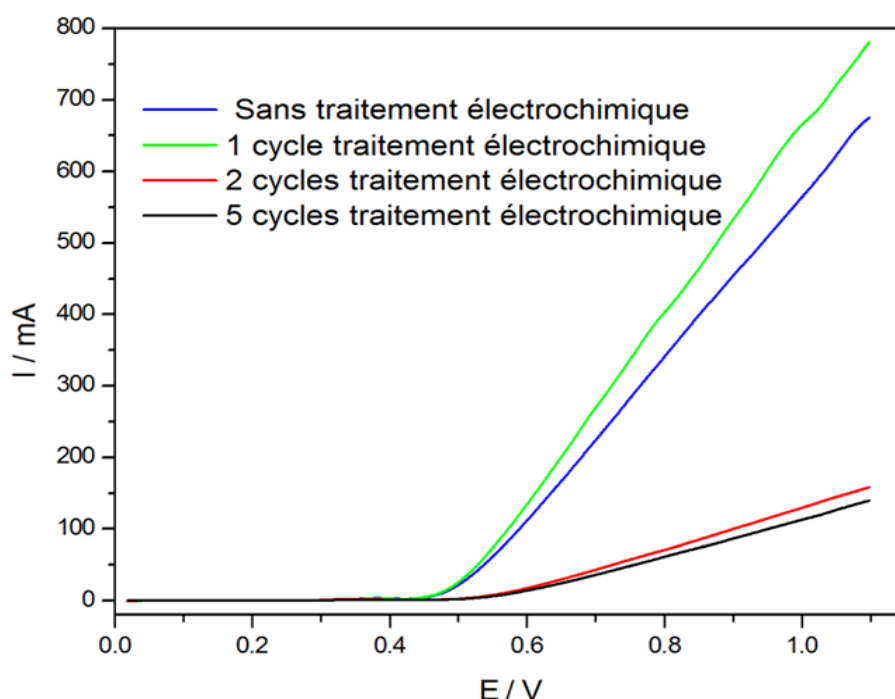


Figure IV.2. Effet du nombre de cycles utilisés dans le traitement électrochimique de la mousse de nickel sur la REO.

Les voltammogrammes obtenus présentent tous une allure similaire : à faibles potentiels, le courant reste quasi nul, indiquant une faible activité électrochimique. À partir d'un certain seuil de potentiel, une augmentation du courant est observée, dont l'intensité varie selon le traitement appliqué.

Il est intéressant de noter que l'électrode ayant subi un seul cycle de traitement électrochimique (courbe verte) présente la plus forte augmentation du courant, ce qui traduit une amélioration notable de l'activité catalytique vis-à-vis de la réaction d'oxydation de l'eau (ROE). En comparaison, l'électrode non traitée (0 cycle, courbe bleue) affiche également une activité modérée, qui reste néanmoins supérieure à celle observée pour les électrodes ayant subi deux cycles (rouge) et cinq cycles (noir). Contrairement à ce que l'on pourrait attendre, ces dernières montrent une augmentation du courant beaucoup plus faible, ce qui pourrait s'expliquer par une passivation progressive de la surface ou encore par la formation excessive de composés électrochimiquement inactifs. Dans ce contexte, il apparaît clairement qu'un traitement modéré,

limité à un seul cycle, constitue une condition optimale pour activer la surface de la mousse de nickel tout en évitant une saturation par des espèces peu réactives.

IV.2.2. Effet du traitement électrochimique sur la REH

La réaction d'évolution de l'hydrogène (REH) a été étudiée en variant le nombre de cycles pour le traitement électrochimique de la mousse de nickel. Les courbes ci-dessous présentent les voltammogrammes linéaires dont le potentiel a été varié de 0 mV à -2000 mV avec une vitesse de balayage de 10 mV/s.

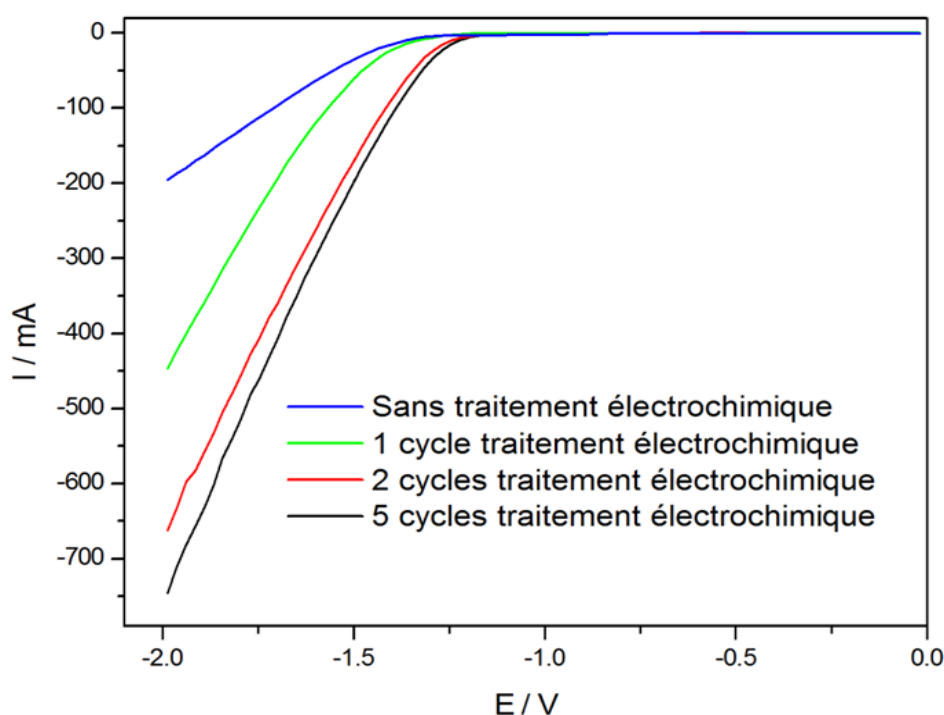


Figure IV.3 : Influence du nombre de cycles utilisés dans le traitement électrochimique de la mousse de nickel sur la REH.

Les courbes obtenues présentent une forme similaire au début, caractérisée par une faible intensité de courant aux faibles potentiels, traduisant une activité électrochimique quasi inexistante dans cette zone. À mesure que le potentiel devient plus négatif, une augmentation nette du courant est observée à partir de -1200 mV, correspondant à l'activation progressive de la réaction de réduction de l'eau. L'intensité de cette augmentation varie en fonction du nombre de cycles appliqués lors du traitement électrochimique : les électrodes non traitées (0 cycle) et traitées par 1 cycle présentent les réponses les plus marquées, tandis que les électrodes ayant été traitées avec 2 cycles électrochimiques montrent une activité réduite, suggérant que l'augmentation du nombre de cycles peut altérer les propriétés catalytiques de la surface.

IV.3. Effet de la concentration de l'électrolyte

Investir l'effet de la concentration de l'électrolyte dans l'électrolyse de l'eau est important pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la concentration de l'électrolyte influence directement la conductivité ionique de la solution ; des concentrations plus élevées peuvent améliorer la conductivité, ce qui conduit à une meilleure efficacité du processus d'électrolyse. De plus, différentes concentrations affectent le taux des réactions électrochimiques aux électrodes, ce qui permet d'optimiser les conditions de réaction. La variation de la concentration de l'électrolyte peut également impacter les taux de production d'hydrogène et d'oxygène, crucial pour maximiser la production dans des applications industrielles. Par ailleurs, des concentrations élevées peuvent entraîner une corrosion accrue des électrodes et d'autres composants, rendant essentielle l'étude de cet aspect pour identifier les conditions optimales alliant efficacité et longévité des matériaux. Enfin, en déterminant la concentration idéale, les chercheurs peuvent minimiser la quantité d'électrolyte nécessaire, réduisant ainsi les coûts et l'impact environnemental.

IV.3.1 Sur la réaction d'oxydation de l'eau

Dans cette étude, l'influence de la concentration de la solution électrolytique de KOH a été examinée en utilisant trois valeurs : 0,1 M, 2 M et 5 M, dans le cadre du traitement électrochimique. Les voltammogrammes linéaires correspondants ont été enregistrés dans une plage de potentiel allant de 0 mV à +1300 mV, avec une vitesse de balayage de 10 mV/s.

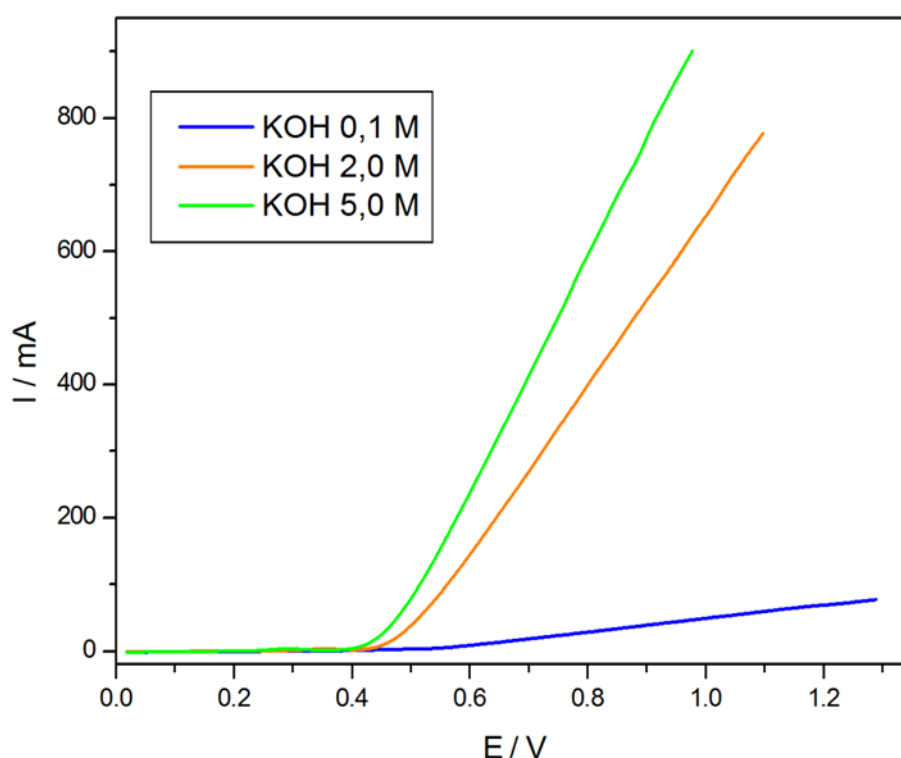


Figure IV.4: Influence de la concentration sur l'activité électrocatalytique pour la ROE.

Les courbes voltammétriques obtenues mettent en évidence l'influence marquée de la concentration en KOH sur l'activité électrocatalytique de l'électrode. À faible concentration (0,1 M, courbe bleue), l'intensité de courant reste relativement faible sur toute la plage de potentiel, traduisant une cinétique lente de la réaction d'oxydation de l'eau. En revanche, l'augmentation de la concentration à 2,0 M (courbe orange) se traduit par une nette amélioration du courant, indiquant une meilleure conductivité ionique et une accélération des processus électrochimiques. Cette tendance se confirme avec la solution à 5,0 M (courbe verte), qui génère le courant le plus élevé, soulignant l'effet bénéfique d'une concentration élevée de KOH sur l'efficacité de la réaction. Ce comportement s'explique principalement par la disponibilité accrue en ions OH^- , essentiels pour la cinétique de la ROE.

IV.3.2 Sur la réaction de réduction de l'eau

Dans le prolongement de l'étude précédente portant sur la réaction d'oxydation de l'eau, l'influence de la concentration de la solution électrolytique sur la réaction de réduction a été examinée. Les voltammogrammes linéaires correspondant aux solutions de KOH de concentrations 0,1 M, 2 M et 5 M ont été enregistrés dans une plage de potentiel allant de 0 à -2000 mV, avec une vitesse de balayage fixée à 10 mV/s.

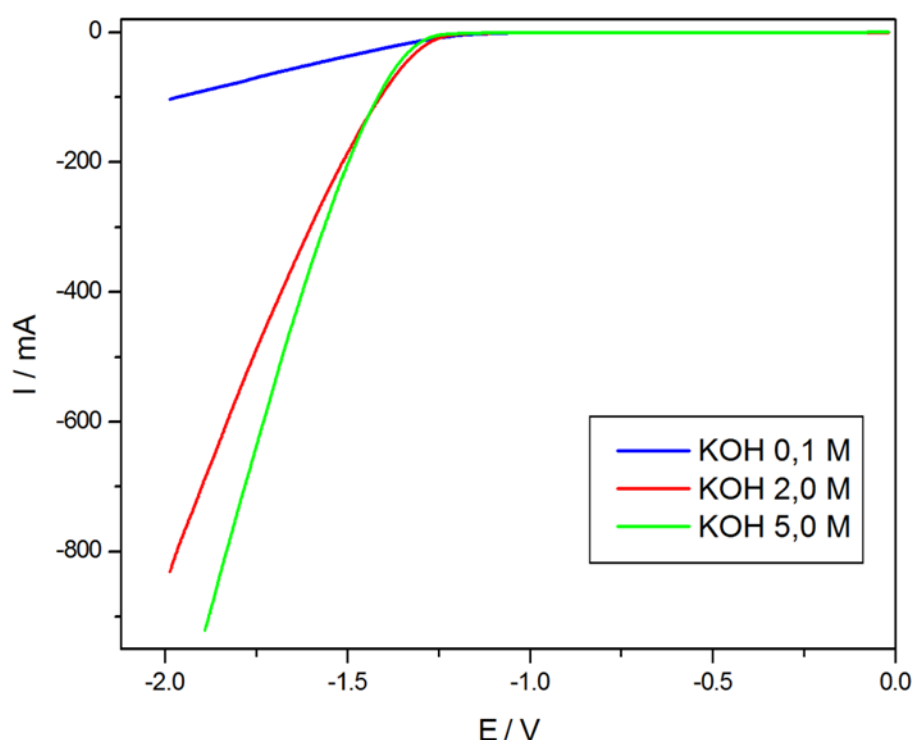


Figure IV.5: Influence de la concentration de l'électrolyte sur la réaction de réduction de l'eau.

Ces courbes illustrent l'effet de la concentration de l'électrolyte basique sur la réaction d'évolution de l'hydrogène. Il est clairement observé que l'intensité du courant cathodique augmente significativement

avec la concentration de KOH. En particulier :

- **La solution à 0,1 M de KOH (courbe bleue)** présente une faible intensité de courant sur l'ensemble de la plage de potentiel, ce qui suggère une cinétique de réduction lente. Cela est probablement dû à la faible concentration en ions OH^- , qui limite la disponibilité des espèces nécessaires à la réaction de réduction.
- **La solution à 2,0 M de KOH (courbe rouge)** montre une augmentation marquée de l'intensité du courant à des potentiels moins négatifs, indiquant une amélioration de la réactivité électrochimique. Le processus de réduction devient plus efficace grâce à la plus grande conductivité ionique et à la meilleure accessibilité des réactifs.
- **La solution à 5,0 M de KOH (courbe verte)** l'intensité cathodique est encore plus élevée, avec un début de l'eau observable à un potentiel légèrement moins négatif. Cela traduit une diminution de la surtension nécessaire pour initier la réduction, probablement en raison d'une densité plus importante d'ions OH^- et d'une meilleure conductivité.

Par ailleurs, les courbes pour 2 M et 5 M montrent un début de l'augmentation du courant à des potentiels légèrement plus faibles que pour 0,1 M, ce qui peut indiquer un déplacement du potentiel d'activation vers des valeurs plus faibles avec l'augmentation de la concentration en KOH.

IV.4. Effet de la température

Afin d'étudier l'effet de la température sur le comportement électrochimique du système, des courbes de voltamétrie cyclique ont été enregistrées au préalable, avant de procéder à la voltamétrie linéaire. Ces mesures ont été réalisées dans une plage de potentiel allant de 100 mV à 0,5 V pour la réaction d'oxydation, et de 500 mV à 100 mV pour la réduction. Les expériences ont été menées à différentes températures : 25 °C, 30 °C, 35 °C et 40 °C, avec une vitesse de balayage fixé à 10 mV/s. Comme illustré dans la figure ci-dessous.

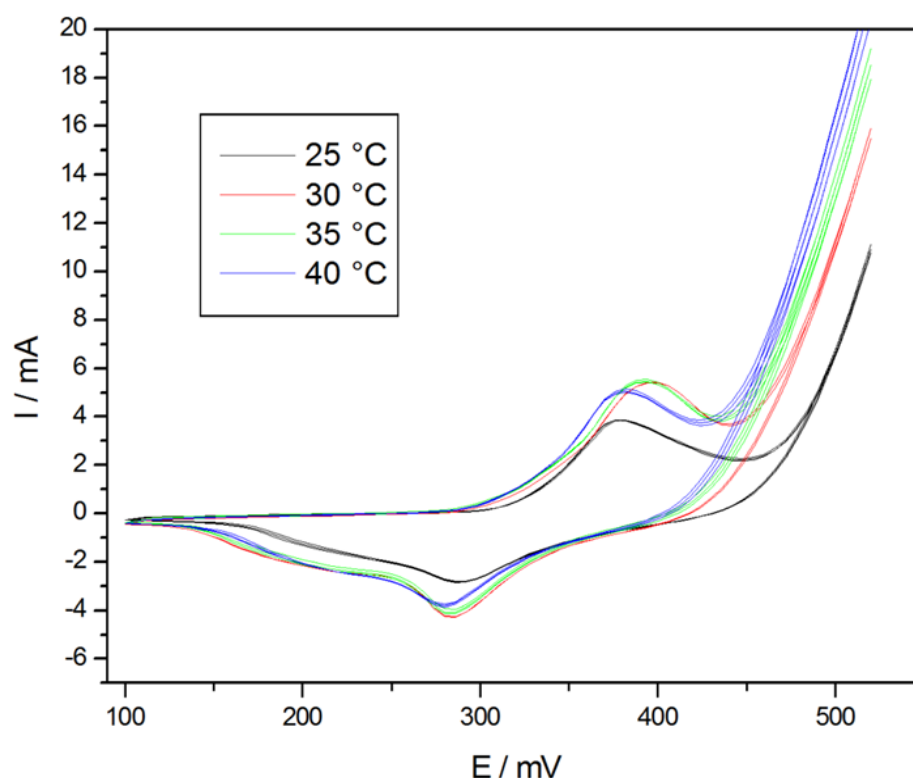


Figure IV.6: Comparaison des voltampérogrammes cycliques de l'électrode de mousse de nickel à différentes températures dans l'électrolyte KOH (1 M).

L'analyse des courbes de la figure IV.6 montre que la température n'a pas d'effet sur l'allure générale des voltampérogrammes. Cependant, une légère variation de la hauteur des pics aller et retour avec un déplacement de ces mêmes pics en fonction de la température (Figure IV.7).

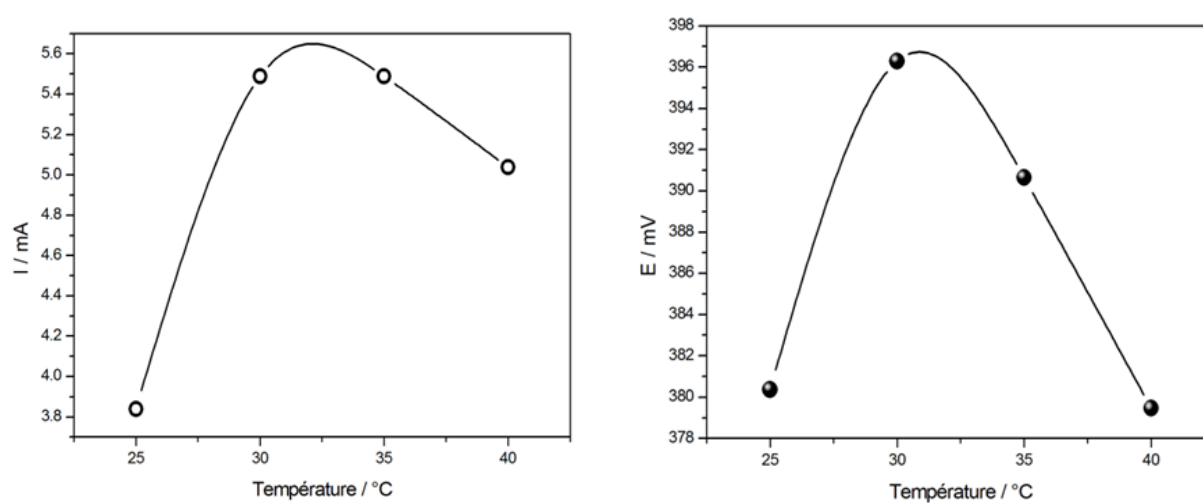


Figure IV.7 : Variation de l'amplitude du pic et du potentiel anodique.

D'après la figure ci-dessus, on voit bien que l'amplitude du courant du pic anodique (qui est relatif à la formation des espèces électroactives) augmente avec la température pour les températures de 30 °C et 35 °C puis diminue légèrement à 40 °C. Par contre, le potentiel du pic à 25 °C moins positif à que pour les températures de 30 et 35°C. L'analyse globale des figures IV.6 et IV.7 révèle que l'augmentation de la température n'a pas d'effet notable sur la formation des espèces électroactives alors que l'augmentation de la température nécessite un apport considérable en énergie.

Ces informations sont utiles pour optimiser les conditions opératoires lors d'applications électrochimiques telles que l'électrolyse.

IV.4.1 L'effet de la température sur l'évolution de la réaction d'oxydation de l'eau

La figure ci-dessus présente les voltammogrammes linéaires obtenus à différentes températures (25 °C, 30 °C, 35 °C et 40 °C) dans une plage de potentiel allant de 0 à +1100 mV.

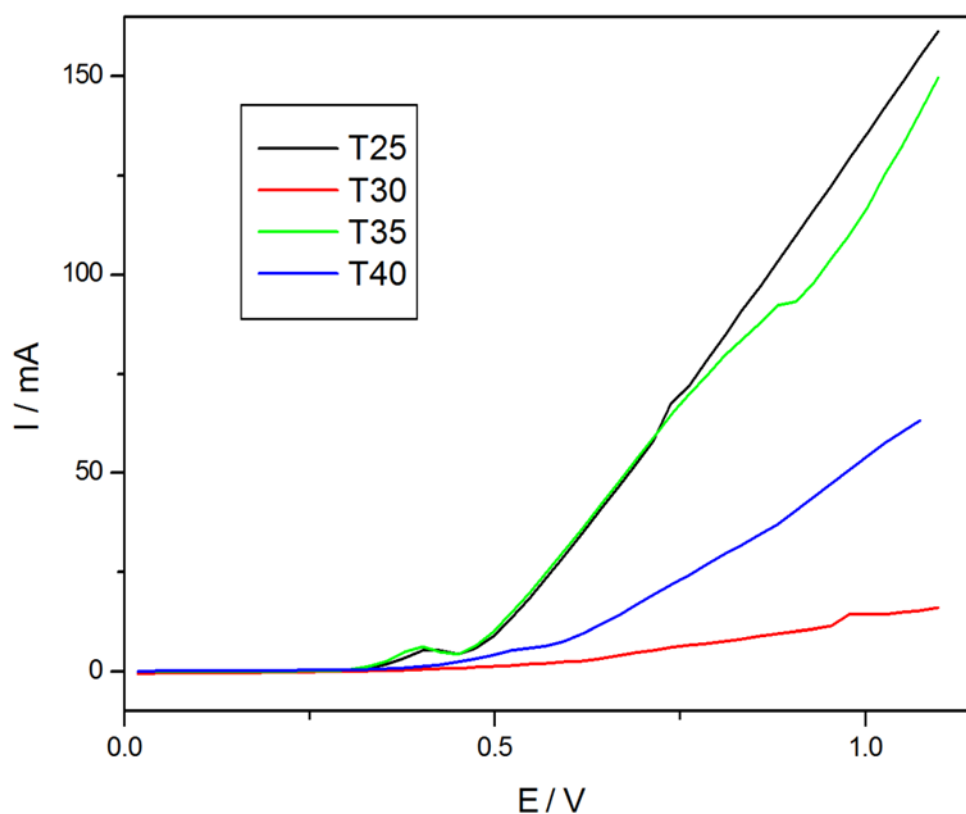


Figure IV.8 : L'effet de la température sur la réaction d'oxydation de l'eau.

Les résultats montrent que l'intensité du courant varie de manière significative avec la température. À faible potentiel (< 700 mV), les courbes correspondant aux températures de 25 °C et 35 °C sont pratiquement superposées, suggérant un comportement électrochimique similaire dans cette zone. Cependant, à partir d'environ 700 mV, la courbe à 25 °C (noire) présente une intensité plus élevée que celle à 35 °C (verte), ce qui indique une meilleure

activité électrochimique à température ambiante dans cette région de potentiel. En revanche, la courbe à 30 °C (rouge) et à 40 °C (bleue) montrent des courants nettement plus faibles.

Cette évolution non linéaire de l'intensité avec la température peut s'expliquer par des effets concurrents. D'un côté, l'augmentation de la température favorise la cinétique de transfert d'électrons et la diffusion des espèces ioniques, ce qui tend à augmenter l'intensité. D'un autre côté, des températures plus élevées peuvent aussi induire une désorganisation de la couche interfaciale ou une désactivation partielle des sites catalytiques, ce qui réduit l'efficacité globale de la réaction. Le fait que la courbe à 25 °C dépasse celle à 35 °C à fort potentiel pourrait indiquer que certains paramètres (comme la stabilité du catalyseur ou la formation de bulles d'oxygène) limitent la performance à plus haute température.

IV.4.2 L'effet de la température sur la réaction de réduction de l'eau

Dans le cadre de cette étude, l'influence de la température de la solution électrolytique de KOH sur le comportement électrochimique a été examinée aussi en considérant quatre températures : 25 °C, 30 °C, 35 °C et 40 °C pour étudier l'influence de la température sur la réaction d'évolution de l'hydrogène. Les voltammogrammes linéaires correspondants ont été enregistrés dans une plage de potentiel comprise entre 0 V et -2000 mV, avec une vitesse de balayage fixée à 10 mV/s.

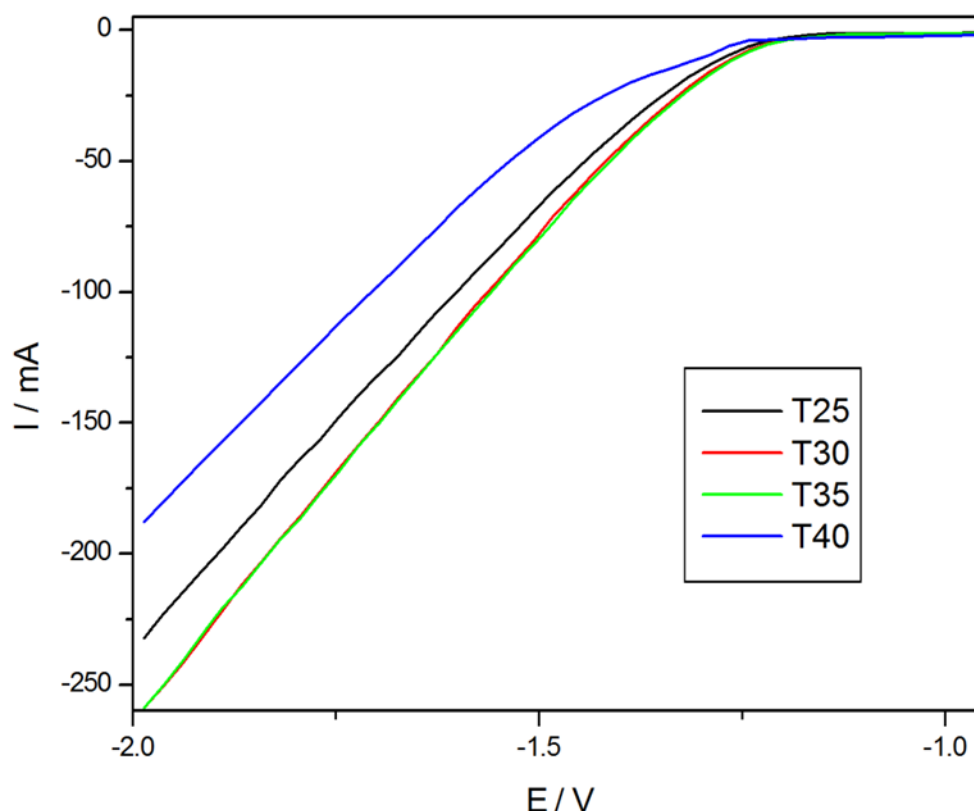


Figure IV.9: L'effet de la température sur la réaction d'évolution de l'hydrogène.

L'analyse des voltammogrammes linéaires dans la figure IV.9 obtenus entre 0 mV et -2000 mV à différentes températures (25 °C, 30 °C, 35 °C et 40 °C) révèle une influence notable de la température sur la réaction de réduction de l'eau. Les courbes enregistrées à 30 °C et 35 °C présentent un comportement presque identique, suggérant que dans cette plage, la température n'a qu'un effet limité sur l'intensité du courant. En revanche, la courbe correspondant à 25 °C se situe entre celles de 30–35 °C et celle de 40 °C. La courbe à 40 °C montre un retard notable dans la réaction d'évolution de l'hydrogène. Ce résultat est en accord avec les observations effectuées sur les courbes de voltapérométrie cyclique. Il s'avère que l'augmentation de la température qui permet généralement d'avoir un effet catalytique sur n'importe quelle réaction, a plutôt un effet inhibiteur sur les REO et la REH. Il paraît que la structure poreuse de la mousse de nickel réduit de manière notable la dissociation de l'eau à plus haute température. Ceci peut être attribué à première vue aux propriétés de surface de la mousse de nickel qui apparemment peuvent changer à température élevée, affectant l'adsorption des molécules d'eau et la vitesse de réaction. En d'autres termes, les bulles de gaz formées peuvent réduire la surface catalytique et de ce fait, montrer de moins de performance.

IV.5. Conclusion

L'ensemble des résultats expérimentaux a permis d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux sur les performances électrochimiques des réactions d'oxydation et de réduction de l'eau en milieu alcalin. En effet, il paraît qu'un traitement électrochimique n'est pas nécessaire ni l'augmentation de température afin d'avoir une cinétique des deux réactions performantes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La recherche de solutions durables pour la production d'énergie propre constitue aujourd'hui un enjeu mondial majeur. L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique propre, se positionne comme une alternative prometteuse aux combustibles fossiles.

Ce travail s'est inscrit dans le cadre de l'étude de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en milieu alcalin. L'objectif principal a été d'évaluer les performances électrocatalytiques de la mousse de nickel, un matériau poreux 3D présentant de nombreux avantages : faible coût, bonne conductivité, stabilité chimique et grande surface active.

L'électrode de mousse de nickel a été utilisée telle quelle ou après traitement électrochimique, puis soumise à différentes conditions opératoires (température et concentration de l'électrolyte). L'activité électrochimique a été caractérisée par voltampérométrie cyclique et la voltampérométrie linéaire afin d'étudier les réactions d'évolution de l'hydrogène (REH) et de l'oxygène (REO).

Les résultats obtenus ont permis d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux sur les performances électrochimiques des réactions d'évolution de l'hydrogène (REH) et de l'oxygène (REO) en milieu alcalin.

Il a été montré que l'augmentation de la concentration en KOH améliore notablement la cinétique des deux réactions, tant la réduction que l'oxydation de l'eau. En effet, une concentration élevée en ions OH^- renforce la conductivité de la solution, diminue la surtension nécessaire et facilite les transferts de charges, ce qui se traduit par des intensités de courant plus élevées et un démarrage plus précoce des réactions.

En revanche, l'augmentation de la température a montré un effet inhibiteur sur les deux processus. Contrairement à ce qui est généralement attendu, l'élévation de la température semble dégrader les propriétés de surface de la mousse de nickel, limiter l'adsorption efficace des molécules d'eau et entraîner la formation excessive de bulles de gaz qui obstruent les sites actifs. Ces effets combinés réduisent l'efficacité globale des réactions.

Enfin, l'étude de l'impact du traitement électrochimique a révélé qu'un seul cycle de polarisation suffit à activer efficacement la surface de la mousse de nickel, augmentant son activité catalytique vis-à-vis des deux réactions. En revanche, un nombre plus élevé de cycles (deux ou cinq) semble induire une passivation partielle de la surface ou la formation de couches inactives, réduisant ainsi la performance de l'électrode.

Ainsi, ce travail met en évidence le potentiel de la mousse de nickel comme matériau

catalytique prometteur pour l'électrolyse de l'eau en milieu alcalin. Ces résultats ouvrent la voie à des recherches complémentaires sur la stabilité à long terme des électrodes et sur la mise au point de matériaux encore plus performants pour l'optimisation de la réaction de dissociation de l'eau.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

ADEME (2021) – *L'hydrogène dans la transition énergétique*

Bougada , Bougada Islam ;S.Letrache ;Y. Dib, A .Derradji, ;Y.Bouffelgha B.Bakiri, Mémoire de MASTER Etude de la production d'hydrogène par le procédé d'électrolyse de l'eau alcaline, Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila ;2023.

Bouziane, Kh « étude d'une installation photovoltaïque production d'hydrogène par électrolyse de l'eau » Thèse de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, mai 2011.

Brown, E. F., & Green, G. H. Hydrogen production by sulfur-iodine thermochemical cycle: Current status and future prospects. 2024.

Bulletin, ALPHEA HYDROGÈNE – Veille thématique n°2 – Bulletin mensuel sur un sujet thématique lié à l'hydrogène et ses applications : Production d'hydrogène – avril 2006.

Chengzhi Xiao, Unlocking the potential of hydrogen evolution: Advancements in 3D nanostructured electrocatalysts supported on nickel foam. 2024.

Dagdougi, thèse de Doctorat: Decision support systems for sustainable renewable energy systems and hydrogen logistics: modelling, control and risk analysis, MINES ParisTech-France, 15 Décembre 2011.

Debais, L. P. Malbrunot « memento de l'hydrogène fiche 1 », 2020.

Doe, A. B., & Lee, C. D. Hydrogen production from coal gasification: A comprehensive review. 2022.

Freund, et P. Lucchese, L'hydrogène, carburant de l'après pétrole ? 2012.

Gong, M. Gong, Y. Li, H. Wang, Y. Liang, J.Z. Wu, J. Zhou, T. Liang, J. Xu, J. Yang, J. Am. Chem. Soc., 135(23), 2013.

Germain gondor. Thèse ; Pour le stockage de l'hydrogène : analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métallique set optimisation durem plissage d'un réservoir ; 2008.

Harzalah W, Préparation et caractérisation de depots composites electrodeposes en presence d'inhibiteurs organiques, these deMagister en physique appliquee, universite de Mohamed Khider de Biskra, 2006.

Hellal N, Préparation de nouveaux matériaux d'électrode à base de pâte de carbone modifiée par des complexes de métaux de transition ; application à l'électrocatalyse thèse de doctorat, Option de Génie Electrochimique, Université Ferhat Abbas-Setif-1, 2017.

Hydrogen Council (2020) – *Path to hydrogen competitiveness: A cost perspective*.

IEA (2023) – *Global Hydrogen Review 2023*. International Energy Agency

- Kojima, Y.**, & Ishikawa, H. Hydrogen transport and storage technologies for global hydrogen supply chains. (2021).
- Li, H.**, & Yang, F. High-pressure hydrogen storage technologies: Status and outlook.
- Melaina, M. W.**, & Penev, M. Hydrogen infrastructure market readiness: Opportunities and potential for near-term cost reductions. 2013.
- Nguyen, M. T.**, & Patel, A. R. Advances in water electrolysis technologies for green hydrogen production. 2023.
- Ogden, J. M.** Hydrogen for heating: Decarbonizing domestic energy use. 2020
- Oleg D**, Porous Powders and Metallic Foams, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science (IPMS), 2019.
- Oularbi L**, Etude de nanocomposites polypyrrole/nanoparticule de carbone par impédance électrochimique et Ac-électrogravimétrie : application aux capteurs électrochimiques, Thèse de doctorat de Physico-chimie des matériaux et électrochimie, 2018.
- Pally D**, Fonctionnalisation électrochimique de matériaux carbonés : application à la détection de micropolluants métalliques : nickel et plomb thèse de doctorat, Spécialité de Chimie des matériaux, Université d'Orléans, 2016.
- Pathak P**, Flexible copper-biopolymer nanocomposite sensors for trace level lead detection in water, Sensors and Actuators: B. Chemical, 2021.
- Peng X**, Recent advance and perspectives of electrocatalysts based on transition metal selenides for efficient water splitting, Nano Energy, 2020.
- Pierre H.** Bernard, B. Franco, R. Willi, W. Jean-Marc, Z. (2005). L'HYDROGÈNE, FUTUR VECTEUR ENERGÉTIQUE ? Rapport de recherche. Université, Genève.
- ROZAIN C.** THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS-SUD XI École Doctorale Chimie de Paris Sud, 27/09/2013.
- Schlapbach, L.**, & Züttel, A. (2001). Hydrogen-storage materials for mobile applications.
- Schmidt, O.**, et al. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study, 2017.
- Science et génie des matériaux, Université de Toulouse, 2012.
- Singh, R.**, & Kumar, A. Hydrogen production from biomass gasification: A review of current technologies. 2019.
- Smith, J. D.**, & Johnson, L. M. Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. (2023).
- Staffell I.**, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, 2019.

White, I. J., & Black, K. L. Photoelectrocatalytic water splitting for efficient hydrogen production: A strategic review. 2023.

Wulf, C. Linßen, J., & Zapp, P. Review of power-to-gas projects in Europe. (2018).

Zhao, L., et al. Hydrogen fuel cell vehicles: Current status and future prospects, 2022.

Züttel, A. (2003). Hydrogen storage methods. (2022).

Site web 1 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mousse>

Site web 2 : <https://www.foam-material.com>

Site web 2 : <https://www.cea.fr/comprendre/>

Résumé

Le développement d'électrodes performantes pour l'électrolyse de l'eau en milieu alcalin, à base de matériaux non nobles et stables, constitue un enjeu essentiel pour la production d'hydrogène propre. Dans ce travail, la mousse de nickel a été étudiée comme électrocatalyseur double fonction, capable de catalyser à la fois la réaction d'évolution de l'hydrogène (REH) et celle de l'oxygène (REO). L'objectif a été d'évaluer l'effet de plusieurs conditions opératoires, à savoir : la concentration en KOH, la température, ainsi que le nombre de cycles appliqués pour le traitement électrochimique de la mousse.

Les résultats ont montré que la mousse de nickel présente une bonne activité catalytique dans les deux réactions. En particulier, une concentration élevée de KOH (5 M) permet d'augmenter l'intensité du courant et de réduire la surtension nécessaire à l'activation des réactions. À l'inverse, l'élévation de la température a provoqué une baisse de performance, probablement en raison de la passivation de la surface active et de l'obstruction des pores par les bulles formées. Par ailleurs, un seul cycle de traitement électrochimique s'est avéré optimal, avec une amélioration nette du courant enregistré par rapport aux électrodes non traitées ou surtraitées.

Ce travail met en évidence le rôle crucial de l'optimisation des paramètres opératoires dans l'amélioration des performances de la mousse de nickel comme électrocatalyseur. La structure poreuse et conductrice de la mousse s'est révélée adaptée à l'électrolyse alcaline, ouvrant des perspectives pour la conception d'électrodes économiques, efficaces et durables à base de métaux de transition.

Abstract

The development of efficient electrodes for alkaline water electrolysis based on non-noble, stable, and low-cost materials is a key challenge in the production of clean hydrogen. In this study, nickel foam was investigated as a bifunctional electrocatalyst capable of catalyzing both the hydrogen evolution reaction (HER) and the oxygen evolution reaction (OER). The aim was to evaluate the influence of several operating conditions, namely: KOH concentration, temperature, and the number of cycles applied during electrochemical treatment of the foam.

The results showed that nickel foam exhibited good catalytic activity for both reactions. In particular, a high KOH concentration (5 M) significantly increased current intensity and reduced the overpotential required to trigger the reactions. Conversely, elevated temperature led to a decline in performance, likely due to surface passivation and pore blockage caused by gas bubbles. Moreover, a single cycle of electrochemical treatment was found to be optimal, resulting in higher current densities compared to untreated or over-treated electrodes.

This work highlights the crucial role of optimizing operational parameters to enhance the catalytic efficiency of nickel foam. Its porous and conductive structure proved suitable for alkaline electrolysis, offering promising prospects for designing cost-effective, high-performance, and durable electrodes based on transition metals.

ملخص

يُعد تطوير أقطاب كهربائية فعالة لتحليل الماء كهربائيًا في وسط قلوي، باستخدام مواد غير نبيلة ومستقرة ومنخفضة التكلفة، من التحديات الرئيسية في إنتاج الهيدروجين النظيف. في هذا العمل، تمت دراسة رغوة النيكل كمحفز كهربائي ثنائي الوظيفة قادر على تحفيز كل من تفاعل تطور الهيدروجين (HER) وتفاعل تطور الأوكسجين (OER) تمثل الهدف في تقييم تأثير عدة شروط تشغيلية، مثل تركيز محلول KOH ، ودرجة الحرارة، وعدد دورات المعالجة الكهربائية المطبقة على الرغوة. أظهرت النتائج أن رغوة النيكل تتمتع بنشاط تحفيزي جيد في كلا التفاعلين. على وجه الخصوص، أدى ارتفاع تركيز KOH (5 M) إلى زيادة ملحوظة في شدة التيار وتقليل الجهد الزائد اللازم لبدء التفاعلات. في المقابل، أدى ارتفاع درجة الحرارة إلى انخفاض في الأداء، يُعزى على الأرجح إلى تخميل السطح وانسداد المسام الناتج عن فقاعات الغاز. كما تبين أن تطبيق دورة واحدة فقط من المعالجة الكهربائية هو الأنسب، حيث ساهم في تحسين الكثافة الحالية مقارنةً بالأقطاب غير المعالجة أو المعالجة بالزيادة.

يسلط هذا العمل الضوء على الدور الأساسي لتحسين الظروف التشغيلية من أجل تعزيز كفاءة رغوة النيكل كمحفز كهربائي. وقد أثبتت بنيتها المسامية والناقلة أنها مناسبة للتحليل الكهربائي في الوسط القلوي، مما يفتح آفاقًا واعدة لتصميم أقطاب منخفضة التكلفة وعالية الأداء وطويلة العمر مبنية على معادن انتقالية.