



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DEL 'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Mémoire présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Master LMD

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Présenté par :

ANNOU SARA _NAHOUI HANA

THEME

Effets de la qualité de l'eau sur la génération de l'hydrogène par électrolyse

Soutenu publiquement Le :6 /6 /2026

Devant le jury composé de :

Chennouf Nasreddine
Raache Med Nacereddine
Sellami Med Hassen

professeur
MCB
professeur

UKMO
UKMO
UKMO

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2025 / 2026

Dévouement



Louange à Dieu qui nous a permis d'accomplir cette œuvre. Nous consacrons le fruit de nos efforts et de notre fatigue aux personnes les plus chères à nos cœurs...

À ma mère bien-aimée, source de tendresse, de prière et de force, merci pour chaque moment de soutien, de patience et d'amour, car ta présence a toujours été la lumière qui accompagne mes pas.

À mon cher père, mon soutien et ma fierté, merci pour votre travail acharné et vos grands efforts pour nous, ainsi que pour tous les conseils et sacrifices qui m'ont conduit à atteindre cette étape.

A mes chers frères, compagnons de mes jours et soutien dans la vie, merci pour vos encouragements constants et votre présence à mes côtés en toutes circonstances.

J'adresse également mes sincères remerciements et ma gratitude à mes collègues et amis, qui ont partagé mes moments de fatigue et d'assiduité, et qui ont été les meilleurs compagnons tout au long de mon parcours d'étude.

À tous ceux qui m'ont soutenu par un mot gentil, un sourire sincère ou une prière sincère... Je vous dédie cette humble œuvre, en espérant qu'elle sera un fruit de bonté et de fierté pour nous tous.



Annou Sara

Dévouement



Celle qui dit : « J'y arriverai », et « J'y arriverai. » Si elle refuse contre son gré, je l'amènerai.

Le voyage n'a pas été court et il n'aurait pas dû l'être. Le rêve n'était pas près de se réaliser et la route ne comportait pas beaucoup d'installations, mais je l'ai fait et je l'ai eu.

À celui qui a décoré mon nom avec les plus beaux titres, qui m'a soutenu sans limites et m'a donné gratuitement...

Qui m'a appris que le monde est une lutte et que la science et le savoir sont mes premiers soutiens dans ma carrière, mon soutien, ma force et mon refuge après Dieu.... À ma fierté et mon honneur

Baba.

À celui sous les pieds duquel Dieu a placé le Paradis, m'a embrassé d'un cœur devant sa main, et a facilité mes épreuves en l'invitant au cœur tendre et à la bougie qui était pour moi dans les nuits sombres, le secret de ma force et de mon succès

..mama

À ma côte ferme et à la sécurité de mes jours, à ceux avec qui j'ai fortifié mon soutien, et ils ont été pour moi des sources dont je bois le meilleur de mes jours et leur laine jusqu'à la prunelle de mes yeux...

Mes frères diaa.wala.Bara
Et mes sœurs chaima.Haouaa....

À tous ceux qui ont été une aide et un soutien sur ce chemin pour ceux qui traversent l'adversité et les crises...

À celui qui m'a donné ses sentiments sincères et ses conseils... Voici ma deuxième famille... Tata et Nisreen.Lotfi.Marwa.Osama.Kenza.

À tous mes amis et proches qui m'ont soutenu, merci, et à cette personne qui m'a accompagné dans les bons et les mauvais moments en secret, merci

Je vous présente cette réussite et le fruit de mon succès que j'ai toujours souhaité. Aujourd'hui, j'ai accompli et perfectionné ses premiers fruits par la grâce de Dieu Tout-Puissant. Louange à Dieu pour ce qu'Il m'a donné.

Nahoui hana



- **remerciement et de gratitude**

Avant toute chose, je remercie Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur sellami Med Hassen, pour ses précieux conseils, son soutien indéfectible et ses orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous lui sommes profondément reconnaissants.

Nous exprimons également notre sincère gratitude au personnel du laboratoire où ce travail a été effectué, pour leur accueil chaleureux, leur aide et pour avoir mis à notre disposition les conditions propices à la réalisation des aspects pratiques de cette recherche.

J'adresse mes sincères remerciements et ma reconnaissance aux membres du comité de discussion, dirigé par M. Chennouf Nasreddine. Je remercie également M. Raache Med Nacerddine pour sa gentillesse en acceptant la discussion de ce travail, et pour le temps et les efforts qu'il a consacrés à son évaluation. Vous avez ma sincère gratitude et mon respect

Nous tenons également à remercier tous les professeurs du département de génie chimique/génie des procédés, qui ont contribué à notre développement scientifique durant nos années d'études.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce modeste travail.



Hana & Sara

Résumé

Cette étude examine la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et l'influence de la qualité de l'eau sur le rendement. L'hydrogène est un gaz propre produit sans émission de polluants. Les résultats montrent que l'eau distillée permet d'obtenir le rendement en hydrogène le plus élevé, comparée à d'autres sources d'eau, grâce à sa pureté et sa faible teneur en ions. L'étude révèle également que la conductivité électrique, la concentration ionique, la température, la pression et la concentration en électrolyte sont des facteurs qui affectent directement l'efficacité de la production. L'étude confirme l'efficacité de l'électrolyse pour la production d'hydrogène.

Mots-clés : Hydrogène, Électrolyse, Rendement, Pression, Température

Abstract

This study examines hydrogen production by water electrolysis and the effect of water quality on yield. Hydrogen is a clean gas produced without emitting pollutants. The results showed that distilled water achieved the highest hydrogen yield compared to other water sources due to its purity and low ion content. The study also revealed that electrical conductivity, ion concentration, temperature, pressure, and electrolyte concentration are factors that directly affect production efficiency. The study confirms the effectiveness of electrolysis in hydrogen production.

Keywords: Hydrogen, Electrolysis, Yield , Pressure, Temperature

الملخص

تتناول هذه الدراسة إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي للماء وتأثير نوعية المياه على المردودية. حيث يعتبر الهيدروجين غازاً نظيفاً ينتج دون انبعاث ملوثات. أظهرت النتائج أن الماء المقطر حقق أعلى مردود في إنتاج الهيدروجين مقارنة ببقية المياه، بسبب نقاوته وانخفاض الشوارد فيه. كما تبين أن الناقلية الكهربائية وتركيز الشوارد ودرجة الحرارة والضغط وتركيز الإلكتروليت عوامل تؤثر مباشرة على كفاءة الإنتاج. وتؤكد الدراسة فعالية التحليل الكهربائي في إنتاج الهيدروجين.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين، التحليل الكهربائي، المردود، الضغط، درجة الحرارة

Liste des Figure de Graphiques

Figure	Nom de Graphique	Page
Figure IV.1	Une courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau de mer en termes de temps	63
Figure IV.2	Une courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau filtrée En termes de temps	64
Figure IV.3	Une courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau trouble En termes de temps	65
Figure IV.4	Courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau du robinet En termes de temps	66
Figure IV.5	Une courbe graphique montrant la quantité d'hydrogène produite en volume à partir d'eau minérale en termes de temps	67
Figure IV.6	Une courbe graphique montrant la quantité d'hydrogène produite à partir de l'eau distillée en termes de temps	68
Figure IV.7	Une courbe graphique pour comparer le volume d'un gaz avec différents types d'eau.	69
Figure IV.8	barres comparant le volume de gaz avec différents types d'eau.	70

Liste des Symbole

Symbole	Définition
KOH	Hydroxyde de potassium
K^+	Ion de Potassium
OH^-	Ion hydroxyde
e^-	Electron
H_2O	l'eau
H_2	hydrogène
DC	Courant direct (continue)
CH_4	Méthane
CO	monoxide de Carbone
O_2	Oxygène
Na^+	ion de Sodium
Cl^-	ions chlorure
PEM	Membrane échangeuse de protons (dans les piles à combustible et l'électrolyse)
SOEC	Cellule électrolytique à oxyde solide (pour la production d'hydrogène à haute température)
AEM	Membrane échangeuse d'anions (pour le transport des ions négatifs en électrolyse)
PH	Une mesure de l'acidité ou de la basicité d'une solution (de 0 à 14)
R	Constante des gaz idéale (8,314 joules/mol. Kelvin)
Mg^{+2}	Ion de magnésium.
HCO_3^-	ion du bicarbonate
$CaCO_3$	Composé de carbonate de calcium
$Ca(OH)_2$	Composé d'hydroxyde de calcium (chaux éteinte)
Q	La quantité de chaleur (en physique) et le produit de la réaction (en chimie)
P	pression
N	rendement
I	Intensité du courant électrique (Ampère)
A	Ampèremètre
CB	Conduction band
DC	Direct current
E	Electrolyser
NHE	Normal hydrogen electrode
V	Voltmètre
VB	Valence band
Gs	Solar irradiance in the summer season, W/m ²
Gw	Solar irradiance in the winter season, W/m ²
Tas	Ambient temperature in the summer season, °C
Taw	Ambient temperature in the winter season, °C

Liste des figures

figures	Nom de figures	Page
Figure I .1	Sources origines de l'hydrogène produit dans le monde	5
Figure I .2	Réservoirs d'hydrogène sous pression	12
Figure I .3	Réservoirs d'hydrogène liquide	13
Figure II .1	La première cellule d'électrolyse de l'eau	17
Figure II .2	Cellule d'électrolyse de l'eau alcaline conventionnelle	18
Figure II .3.	Cellule d'électrolyse à haute température	19
Figure II .4	Cellule d'électrolyse (PEM)	19
Figure II .5	.Réalisation d'une cellule d'électrolyse de l'eau	21
Figure II . 6	Cellules alcalines conventionnelles	22
Figure II .7	Cellules à membrane échangeuse de protons (PEM)	22
Figure II .8	Cellules d'électrolyse à très haute température (SOEC)	23
Figure II .9	Cellules d'analyse électro-optique	24
Figure II .10	Cellules d'électrolyse à membrane ionique (AEM) :	24
Figure II .11	. Influence de la température sur la tension de cellule d'un électrolyseur Alcalin	25
Figure II .12	Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zéro gap	26
Figure II .13	Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produits par Électrolyse alcaline	27
Figure. III.1	L'échelle de pH	35
Figure. III.2	Appareil de mesure de la conductivité électrique	36
Figure. III 3	appareil de mesure du sel dissous	37
Figure. III.4	Turbidimètre d'eau	45
Figure IV.1	Générateur de courant continue (DC)	46
Figure IV.2	Cellule d'électrolyse de l'eau	46
Figure IV.3	Eprouvette graduée	47
Figure IV.4	Hi 9829 multiparameter	48
Figure IV.5	KOH - Hydroxyde de potassium	48
Figure IV.6	balance de précision	49

Liste des Tableau

Tableau	Titre du tableau	Page
Tableau I .1	Principales propriétés chimiques et physiques d'hydrogène	4
Tableau.Ⅲ.1	Norme de la qualité du l'eau naturelle	41
Le tableauⅣ.1	volume H2 cumulé en fonction de temps sur l'eau de mer	52
Le tableauⅣ.2	volume H2 cumulé en fonction de temps sur l'eau filtrée (filtrée)	54
Le tableauⅣ.3	Volume H2 cumulé en fonction de temps d'eau trouble (dure)	55
TableauⅣ4	volume H2 cumulé en fonction de temps sur l'eau du robinet	57
TableauⅣ.5	volume H2 cumulé en fonction de temps sur l'eau minérale	59
TableauⅣ.6	volume H2 cumulé en fonction de temps sur l'eau distillé	60
Le tableau Ⅳ. 7	Suivant indique le volume d'hydrogène produit (en millilitres) pour chaque type d'eau pendant 4 heures	62
TableauⅣ.8	des symboles de la courbe graphique	69
TableauⅣ.10	des symboles pour les graphiques à barres	70
Le tableau V . 1.	.Analyser et comparer le rendement en termes de taille théorique et de taille appliquée	83

Sommaire

Table des matières

Remerciements

Nomenclature

Introduction générale..... 1

Chapitre I : L'hydrogène comme vecteur énergétique

I . L'hydrogène comme vecteur énergétique.....2

I . 1. Introduction.....3

I .2. Définition de l'hydrogène.....3

I .3. Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène.....3

I . 4 .Méthodes de production d'hydrogène.....5

I . 4 .1. Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles.....6

I . 4 .1.A. Production à partir du gaz naturel.....6

I . 4 .1. B. Production à partir du charbon.....7

I . 4 .2. Production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire.....7

I . 4 .3. Production d'hydrogène à partir des sources d'énergies renouvelables.....8

I . 4 .3. A .La biomasse.....8

I . 4 .3. B .L'éolien.....8

I . 4 .3. C .par voie solaire 9

I . 4 .3. D. Production d'hydrogène par électrolyse 9

I . 4 .3. E. L'hydraulique 9

I . 4 .3. F. D'autres sources renouvelables 10

I .5. Utilisation set applications de l'hydrogène 10

I .6. Avantages et inconvénients de l'hydrogène 11

Sommaire

I .7. Méthodes de stockage de l'hydrogène	12
I .7.1. Stockage gazeux (haute pression)	12
I .7.2. Stockage liquide (cryogénique)	12
I .7.3. Stockage à l'état solide (réaction avec la matière)	13
I .8. Méthodes de transport de l'hydrogène	13
I .9. Le rôle de l'hydrogène renouvelable.....	14
I .10. Conclusion.....	14

Chapitre II : Technologie d'électrolyse de l'eau

II : Technologie d'électrolyse de l'eau	15
II .1. Introduction	16
II .2. Histoire de l'électrolyse	16
II .3. Principe de fonctionnement de l'électrolyse	17
II .3.1. Définition de l'électrolyse	17
II .3.2. Définition de la cellule d'électrolyse	17
II .3.3. Le Principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau	17
II .4. Types d'électrolyse	18
II .4.1. Électrolyse alcaline	18
II .4.2. Électrolyse à haute température	18
II .4.3. Électrolyse acide (PEM)	19
II .5. Principe de fonctionnement de la cellule	20
II .6. Composants de la cellule d'électrolyse	20
II .6 .1 Électr	20
II .6 .2. Electrolyte.....	20
II .6 .3. Courant continu (DC)	20
II .6 .4. Membrane échangeuse de protons	20

Sommaire

II .6 .5. La couche de diffusion	21
II .6 .6. Catalyseurs	21
II .7. Facteurs affectant la performance cellulaire	21
II .7 .1. L'effet de la température	21
II .7 .2. L'effet de la distance entre les électrodes.....	22
II .7 .3. Effet de la concentration d'électrolyte.....	22
II .8. Types de cellules électrolytiques	22
II .8 1.Cellules alcalines conventionnelles.....	22
II .8.2.Cellules à membrane échangeuse de protons (PEM)	22
II .8.3. Cellules d'électrolyse à très haute température (SOEC)	23
II .8.4. Cellules d'analyse électro-optique	24
II .9. Facteurs affectant la performance de l'électrolyse	25
II .9 1. Effet de la température sur la tension d'électrolyse	25
II .9 2. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse.....	25
II .9 .3. L'effet de la pression sur la pureté des gaz produits	26
II .9.4. Effet du type de catalyseur et de la conception des cellules sur les performances du processus d'électrolyse_.....	27
II .10. Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau	27
II .10. 1.Thermodynamique	27
II .10.2. Cinétique	29
II .11. Conclusion	29
 Chapitre III : Qualité de l'eau	
III:Qualité de l'eau	30
III.1.Introduction	31
III.2.Définition de l'eau	31

Sommaire

III.3. propriétés physico-chimiques	31
III.3.1. Propriétés physiques de l'eau	31
III.3.2. Propriétés chimiques	32
III.4. Classification des types d'eau	33
III.5. Ressources en eau (Sources)	34
III.6. Critères clés pour la qualité de l'eau et son effet physicochimique..	34
III.6.1. La chaleur	34
III.6.2. PH (PH)	34
III.6.3. Conductivité électrique	35
III.6.4. Total des sels dissous	35
III.6.5. Salinité	36
III.6.6. Turbidité	36
III.6.7. Alcalinité totale	37
III.6.8. Cruauté	37
III.6.9. Concentration critique d'ions	38
III.6.9.1. Nitrates et nitrites	38
III.6.10. Chlorure	38
III.6.11. Calcium	38
III.6.12. Magnésium	38
III.7. Les différents types des eaux naturelles	39
III.8. Composition des eaux naturelle	39
III.8.1. Les matières minérales	39
III.8.2. Les matières organiques	39
III.8.3. Les matières dissoutes	39
III.8.4. Les matières colloïdales	39
III.8.5. Les matières en suspensions	39

Sommaire

III.9. Les différents types des eaux industrielles	39
III.9. 1. Eau adoucie	39
III.9. 2. Eau distillée	39.
III.9.3. Eau déminéraliser	40
III.10. Norme de la qualité du l'eau naturelle	40
III.11. Conclusion	42.

IV Chapitre : Partie expérimentale

IV Chapitre : Partie expérimentale.....	43
IV.1. Introduction	44
IV.2. Outils et matériaux nécessaires à la mesure du modèle expérimental	44
IV.2.A. Générateur électrique (DC)	45
IV.2.B. Cellule d'électrolyse de l'eau	46
IV.2.C. Epruvette graduée	46
IV.2.D. Appareil Hi 9829 multiparameter	47
IV.2.E. KOH - Hydroxyde de potassium	47
IV.2.F. Balance électronique	48
IV.2.G. Thermomètre	49
IV.3. Grandeurs mesurées lors des expériences	49
IV.4. Conditions de réalisation des expériences	49
IV.5. Protocole expérimental	50
IV.5.1. Contenu et but de l'expérience	50
IV.5.2. Principe de l'expérience	50
IV.5.3. Date	50
IV.5.4. Chercheur	50
IV.5.5. Matériaux et dispositifs	50
IV.5.6. Procédures de sécurité	51
IV.6. Étapes pratiques du travail	51

Sommaire

IV.6 .1. Préparez chaque échantillon	51
IV.6 .2. Effectuer l'électrolyse de chaque échantillon	51
IV.7. Explication détaillée des expériences	52
IV.8.Comparaison des résultats expérimentaux	61
IV.9. Représentations graphiques des résultats expérimentaux	63
IV. 10.Conclusion	71

Chapitre V : Partie calcul

Chapitre V : Partie calcul.....	72
V . 1Introduction	73
V .2 Définition des symboles et éléments utilisés dans les calculs	73
V .3 Mécanisme des réactions aux électrodes (anode et cathode) lors de la production d'hydrogène gazeux	74
V .4 Calcul des résultats des expériences	75
V . 5.Conclusion	84
Conclusion générale	85
Références bibliographiques.....	88

Introduction générale

Introduction générale

La production mondiale d'énergie est principalement basée sur les combustibles fossiles, ce qui a conduit à des déchets négatifs pour la nature, tels que les émissions de gaz et le réchauffement climatique, qui ont provoqué une augmentation de la pollution. La consommation excessive de ressources naturelles a également épuisé les réserves de ces énergies d'une manière qui représente une menace pour l'avenir humain. Pour faire face aux crises économique et pétrolière, les scientifiques se sont tournés vers d'autres solutions alternatives, à savoir les ressources renouvelables

L'une des sources les plus importantes d'énergie renouvelable est l'énergie hydroélectrique. L'énergie solaire. L'énergie éolienne. L'énergie géothermique et la biomasse. Ce qui circule actuellement est l'énergie produite à partir de l'hydrogène. Grâce aux progrès de la recherche scientifique sur l'hydrogène, nous le considérons désormais comme un vecteur énergétique majeur pour l'avenir, une alternative aux ressources naturelles (combustibles fossiles).

L'hydrogène industriel peut être produit de deux façons : la première est respectueuse de l'environnement et de l'homme (une ressource renouvelable) et la seconde est hostile à l'environnement et à l'homme (ressources naturelles et combustibles fossiles). La production industrielle d'hydrogène à partir de combustibles fossiles produit de grandes quantités de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, les composés soufrés et autres. Ces gaz nécessitent de la technologie, ce qui pose un problème dans l'environnement. Par conséquent, la recherche scientifique moderne se concentre sur la production d'hydrogène propre. Il est respectueux de l'environnement pour les humains utilisant l'électrolyse de l'eau. En l'utilisant, nous pouvons produire de l'hydrogène pur, mais son coût est très élevé, ce qui cause la production de seulement 4% de la production mondiale. Pour réduire ce coût, les scientifiques ont actuellement recours à l'utilisation de photo catalyseurs à base d'oxyde métallique dans le processus d'électrolyse de l'eau. Cette méthode est considérée comme économiquement et écologiquement faisable.

Bien que l'efficacité et la productivité de ce procédé soient grandement affectées par la qualité de l'eau utilisée en termes de propriétés de l'eau (pureté, salinité, présence d'impuretés, métaux dissous et rapport de conductivité électrique) Ces facteurs affectent les performances des électrodes et augmentent ainsi la consommation d'énergie et affectent la pureté de l'hydrogène produit.

Par conséquent, cette étude vise à analyser et à évaluer dans quelle mesure la qualité de l'eau affecte les performances du processus d'électrolyse ainsi que l'efficacité et la qualité de la production d'hydrogène.

Chapitre I :

L'hydrogène comme

vecteur énergétique

I . L'hydrogène comme vecteur énergétique

I . 1. Introduction :

L'hydrogène émerge comme une alternative stratégique aux combustibles fossiles conventionnels étant un carburant propre, facile à stocker et à transporter, sans épuisement des ressources ni émissions polluantes, ce qui en fait un pilier fondamental des efforts de préservation de l'environnement. Malgré son abondance dans les molécules d'eau qui recouvrent la majeure partie de notre planète, dans les gisements de pétrole et de gaz, ou stocké dans des minéraux tels que le lithium et le titane, il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Par conséquent, l'hydrogène n'est pas classé comme une source d'énergie primaire, mais plutôt comme un « vecteur énergétique », tout comme l'électricité, car son extraction nécessite un processus technique avant sa consommation."[1][2]

I .2. Définition de l'hydrogène :

L'hydrogène est un élément de symbole H et de numéro atomique 1. C'est un gaz incolore et inodore à température et pression normales. Extrêmement inflammable, il est le gaz le plus léger et le plus abondant dans la nature, présent en grande quantité dans l'eau. On le trouve également à l'état libre dans l'atmosphère solaire et dans les gaz volcaniques. L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers : il représente 75 % de sa masse et 90 % de ses molécules constitutives. L'hydrogène est rarement présent à l'état pur dans la nature. En effet, le chimiste anglais Henry Cavendish a démontré en 1766 que l'hydrogène est produit par la réaction de l'acide sulfurique avec des métaux. [1][2]

I .3. Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène :

L'hydrogène (H) est le premier élément du tableau périodique et le plus léger de tous les éléments chimiques ; son atome est constitué d'un seul proton et d'un seul électron. Grâce à ses propriétés alcalines et à sa forte réactivité avec divers éléments tels que l'oxygène, les halogènes, l'azote, le soufre et le phosphore, il a acquis une importance stratégique dans l'industrie chimique.

L'hydrogène existe naturellement sous trois isotopes : le protium, l'isotope le plus abondant (99,98 %) ; le deutérium, présent en quantité négligeable (environ 0,02 %) ; et le tritium, présent en très faibles quantités.

L'eau (H₂O) est le composé hydrogéné le plus important et le plus abondant. Tous les constituants de la matière vivante, ainsi que de nombreux minéraux, contiennent de l'hydrogène. C'est un constituant fondamental des hydrocarbures et d'une large gamme d'autres composés organiques. Tous les acides contiennent de l'hydrogène et se caractérisent par leur capacité à libérer facilement des ions hydrogène en solution.

Malgré sa forte inflammabilité, le risque de combustion spontanée reste limité. Cela s'explique par sa capacité supérieure à se diffuser rapidement dans l'air et à s'élever, ce qui réduit rapidement sa concentration. Cependant, la petite taille de ses molécules lui confère une forte capacité de pénétration

à travers les membranes et les matériaux poreux, ce qui représente un défi technique et augmente les coûts de transport et de stockage, notamment lorsqu'il est utilisé comme carburant pour moteurs.[1]
[2]

Tableau I .1 : Principales propriétés chimiques et physiques d'hydrogène :

Caractéristiques	Valeurs
Formule moléculaire	H ₂
Masse molaire	2,016 g/ mol
Masse volumique 1 atm et 0 °C	0,0899 kg/ m ³
Densité par rapport à l'air	0,0695
Point d'ébullition	-252,77°C
Point de fusion	-259,2°C
Solubilité dans l'eau	1,6 mg/l a20°C
Vitesse d'inflammation dans l'air	260 cm /s
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg (50020 kJ/kg)
PCS (Pouvoir calorifique supérieur) Densité gazeuse à 20.3 K	141860 kJ/kg 1.34 kg/m ³
Densité liquide à 20.3 K	70.79 kg/m ³
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/m. K
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079 g/mol
Constante de gaz	4124.5 J/kg.K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (813 K)
Température de flamme dans l'air à 300K	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	20 (290) (J)
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 détonation dans l'air	2.0 km/s (1.8 km/s) 29.53 %
Mélange stœchiométrique dans l'air	(9.48 %)

I . 4 .Méthodes de production d'hydrogène :

Les technologies de production d'hydrogène sont variées ; certaines sont commercialisées à maturité, tandis que d'autres restent au stade de la recherche en laboratoire. Parmi les procédés les plus importants, industrialisés ou en phase finale de développement, figurent la décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau.

La conception d'un système de production d'hydrogène repose sur trois facteurs fondamentaux :

Matière combustible : l'hydrogène est généralement extrait de l'eau, d'hydrocarbures (comme le méthane et le méthanol) ou d'un mélange des deux.

Source d'énergie : les options vont des sources d'énergie conventionnelles et nucléaires aux énergies renouvelables (comme le solaire, l'éolien et la géothermie).

Méthode de production : elle est classée selon le type d'énergie utilisé ; certaines méthodes utilisent l'énergie quantique (photolyse), d'autres l'énergie électrique (électrolyse) et d'autres encore l'énergie thermique (procédés thermochimiques).[1]

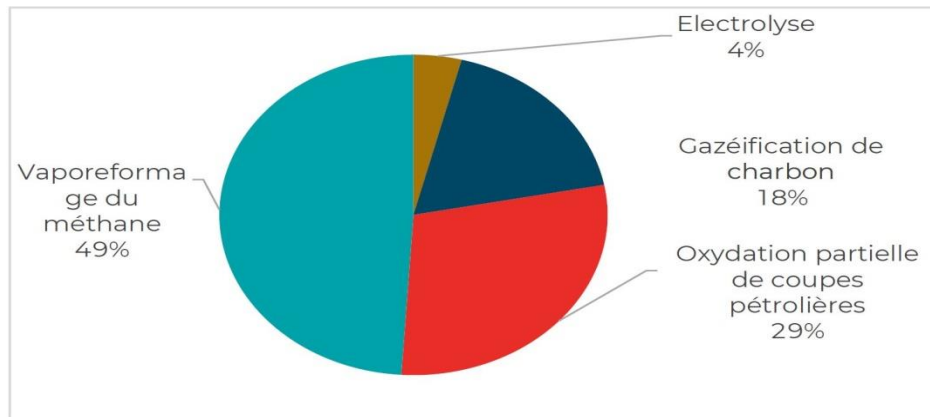


Figure I .1 : Sources origines de l'hydrogène produit dans le monde [4]

Actuellement, environ 96 % de l'hydrogène est issu de combustibles fossiles, le gaz naturel étant la matière première la plus consommée. Le reformage du gaz naturel à la vapeur est considéré comme la méthode la plus rentable. En conclusion, le choix de la technologie de production idéale dépend de la disponibilité des ressources, de la quantité requise et du niveau de pureté souhaité. Les innovateurs s'efforcent actuellement d'améliorer ces procédés afin de les rendre à la fois écologiquement et économiquement durables, et les classent en quatre grands groupes technologiques :[1]

Technologies thermochimiques.

Technologies nucléaires.

Technologies électrolytiques.

Technologies photo-lytiques

I . 4 .1. Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles:

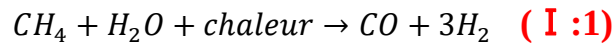
La production d'hydrogène repose majoritairement sur la transformation des combustibles fossiles, notamment le charbon et le gaz naturel. Afin de garantir un processus durable à zéro émission, il est impératif de capturer le CO₂ généré comme sous-produit lors de la réaction. Par ailleurs, la viabilité technique et économique de ces procédés dépend fortement de la configuration de l'installation, qu'elle soit centralisée ou distribuée. [1]

I . 4 .1.A. Production à partir du gaz naturel:

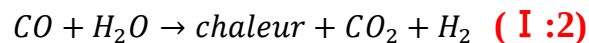
La synthèse de l'hydrogène à partir du gaz naturel s'appuie principalement sur trois voies technologiques : le reformage à la vapeur (SMR), l'oxydation partielle (POX) et le reformage auto thermique (ATR).

1. Le Reformage à la Vapeur du Méthane (Stream Méthane Reforming - SMR)

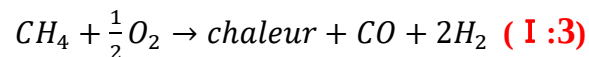
Le procédé SMR constitue actuellement la technologie de référence, représentant environ 95 % de la production d'hydrogène (notamment aux États-Unis). Ce processus repose sur une réaction endothermique entre le méthane et la vapeur d'eau, produisant un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone :



Cette réaction nécessite un apport thermique externe, généralement assuré par la combustion d'une fraction du gaz naturel d'alimentation. Les conditions opératoires optimales requièrent une température comprise entre 700 et 850 °C sous une pression de 3 à 25 bars. Le monoxyde de carbone obtenu est ensuite valorisé par la réaction de conversion à la vapeur (Water-Gas Shift) pour accroître le rendement en hydrogène :



L'Oxydation Partielle (Partial Oxydation - POX) Contrairement au reformage à la vapeur, l'oxydation partielle consiste en une combustion incomplète du méthane (ou alternativement du propane ou du méthanol) en présence d'oxygène :

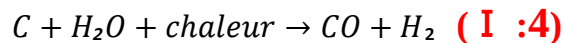


Étant fortement exothermique, cette réaction s'auto-entretient sans apport de chaleur externe, permettant ainsi une conception de réacteur plus compacte. À l'instar du procédé SMR, le monoxyde de carbone produit est systématiquement converti en hydrogène par la réaction de conversion eau-gaz décrite précédemment.[1] [3]

I . 4 .1. B. Production à partir du charbon :

L'extraction d'hydrogène à partir du charbon repose sur diverses technologies de gazéification, telles que les réacteurs à lit fixe, les réacteurs à lit fluidisé et les réacteurs à flux entraîné. Le flux entraîné à haute température est la méthode privilégiée par l'industrie en raison de sa capacité élevée à gazéifier complètement la charge et à éviter la formation de sous-produits indésirables comme le goudron et les phénols.

La réaction chimique fondamentale de ce procédé consiste à convertir le carbone solide en un mélange gazeux en présence de vapeur d'eau.



Du fait du caractère endothermique de cette réaction, un apport de chaleur continu est nécessaire. Afin de maximiser la production d'hydrogène, le monoxyde de carbone formé subit une réaction de conversion du gaz à l'eau pour produire davantage de dioxyde de carbone et de monoxyde de carbone.

Bien que la production d'hydrogène à partir du charbon soit une technologie commercialement mature, elle demeure plus complexe et plus coûteuse que la production à partir de gaz naturel. Cependant, l'abondance des réserves mondiales de charbon fait du développement de technologies propres et durables de combustion du charbon un impératif stratégique pour le secteur de l'énergie.[1][3]

I . 4 .2. Production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire:

Intégration de l'énergie nucléaire dans la production d'hydrogène : Perspectives de la 4ème génération L'option nucléaire émerge comme l'une des solutions stratégiques pour la production massive d'hydrogène, particulièrement avec le développement des réacteurs de 4ème génération. Ces systèmes surpassent les générations actuelles en termes de sûreté et d'efficacité énergétique, se distinguant par leur capacité de cogénération d'électricité et d'hydrogène avec un rendement thermique atteignant les 50 %. Sur le plan thermochimique, cette technologie repose sur la thermolyse de l'eau via le cycle Iode-Soufre (IS), où les réacteurs à haute température refroidis par gaz (HTGR) fournissent l'apport thermique nécessaire (environ 850°C). L'avantage compétitif de ces réacteurs réside dans l'exploitation de matières fissiles plus abondantes que l'Uranium-235 utilisé dans les réacteurs à eau pressurisée (REP/PWR).

Malgré une faisabilité technique prometteuse, le déploiement de cette technologie demeure tributaire d'un équilibre rigoureux entre la viabilité économique et les considérations sociopolitiques, notamment en ce qui concerne l'acceptabilité sociale des programmes nucléaires[1].

I . 4 .3. Production d'hydrogène à partir des sources d'énergies renouvelables:

La transition vers la production d'hydrogène à partir de sources renouvelables est un pilier des stratégies mondiales de développement durable. Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus abondant de l'univers, sa rareté à l'état pur dans la nature impose le recours à des technologies de pointe pour son extraction. En exploitant des ressources naturelles telles que l'eau, le vent et l'énergie solaire, l'hydrogène apparaît comme une alternative stratégique aux combustibles fossiles, contribuant à un avenir où efficacité économique et protection de l'environnement se conjuguent.[2]

I . 4 .3. A .La biomasse:

La biomasse est une source stratégique pour la production d'hydrogène grâce à son bilan carbone neutre ; la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émise lors de sa transformation est équivalente à celle absorbée par les plantes durant leur cycle de croissance, ce qui se traduit par un impact environnemental final négligeable.

Les procédés technologiques de conversion de ces sources en hydrogène sont variés, notamment **Gazéification thermique** : Pour produire du gaz de synthèse, composé de (H₂ + CO), qui subit ensuite des procédés de purification avancés. Il convient de noter que plus de 50 installations industrielles dans le monde utilisent actuellement cette méthode.

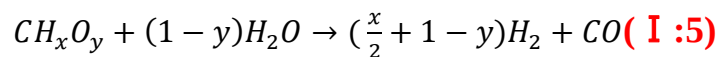
Bio photolyse : utilisation de systèmes biologiques tels que les micro algues ou les cyanobactéries pour décomposer les molécules d'eau.

Photolyse de composés organiques : par l'activité métabolique de certains types de bactéries dans des milieux riches en matière organique.

Mécanismes et indicateurs de performance de la gazéification industrielle :

Actuellement, les opérations de gazéification produisent plus de 430 millions de mètres cubes standard d'hydrogène par jour (soit l'équivalent de 20 GW) à l'échelle mondiale, le charbon représentant environ 42 % de la matière première utilisée.

La technologie de gazéification repose sur la réaction thermochimique de la matière première (solide ou en suspension) avec un agent oxydant (air, oxygène pur ou vapeur d'eau) dans des réacteurs à haute température (de 1 000 à 1 500 °C).



D'un point de vue énergétique, la technologie de gazéification à cycle combiné intégré (GCCCI) se distingue comme une solution d'ingénierie avancée. Dans ce système, l'unité de gazéification est couplée à des turbines à gaz et à vapeur, ce qui porte le rendement électrique net de l'installation à 40-50 %, avec un potentiel de rendement global (rendement total) pouvant atteindre 90 %.[1]

I . 4 .3. B .L'éolien:

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie dont la croissance est la plus rapide au monde, avec des générateurs atteignant jusqu'à 2,5 mégawatts et des travaux en cours sur le développement de prototypes d'une capacité comprise entre 4 et 6 mégawatts. Malgré la baisse continue du coût du kilowattheure, celui-ci n'a pas encore atteint le seuil cible (entre 3 et 4 centimes d'euro).

Techniquement, l'électricité produite peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.[1]

I . 4 .3. C .par voie solaire:

Les stratégies d'extraction d'hydrogène solaire reposent sur trois axes technologiques principaux :

Voie thermochimique : Elle utilise des concentrateurs solaires pour générer de l'énergie thermique à haute température (200-2000 °C) avec un rendement de conversion supérieur à 70 %. Cette chaleur est ensuite utilisée comme catalyseur pour la production d'hydrogène. Cette technologie est idéale pour les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement.

Voie photo électrochimique : Elle emploie des cellules de photolyse pour convertir directement les photons en énergie chimique, ce qui permet de décomposer les molécules d'eau. Cette méthode surpasse les systèmes conventionnels grâce à sa capacité à produire directement, sans réseau de transport d'électricité, ce qui accroît l'efficacité globale.

Voie électrolytique : Il s'agit de la méthode classique qui consiste à faire passer un courant électrique continu à travers un électrolyte pour séparer les composants de l'eau (H_2 et O_2) à l'aide d'électrodes spécifiques.[1]

I . 4 .3. D. Production d'hydrogène par électrolyse :

La production d'hydrogène est attribuée au chimiste britannique William Nicholson (1753-1815), qui, au début du siècle, réussit pour la première fois à convertir l'énergie électrique en énergie chimique.

Ce procédé repose sur l'immersion de deux électrodes (anode et cathode) dans un liquide conducteur (électrolyte), généralement de l'eau enrichie en sels pour en augmenter la conductivité. Lorsqu'un courant continu traverse ces électrodes, les réactions suivantes se produisent :

À la cathode (électrode négative) : les ions hydrogène positifs sont attirés et captent des électrons (réduction), (H_2) ce qui entraîne la libération d'hydrogène gazeux.

À l'anode (électrode positive) : les molécules d'eau sont oxydées, libérant de l'oxygène gazeux (O_2) et des électrons qui retournent dans le circuit électrique.

Grâce à l'expérience primitive de Nicholson utilisant une pile voltaïque, la science a prouvé la possibilité de rompre les fortes liaisons chimiques entre les atomes d'oxygène et d'hydrogène dans la molécule d'eau (H_2O), un principe sur lequel reposent aujourd'hui les plus grandes usines de production d'hydrogène au monde.[2]

I . 4 .3. E. L'hydraulique :

Les technologies de production d'hydrogène hydroélectrique sont considérées comme l'une des solutions d'énergie renouvelable les plus rentables, comme le démontrent clairement des modèles internationaux avancés tels que celui du Canada.

Bien que l'hydroélectricité représente actuellement 20 % de la production mondiale d'électricité, l'utilisation effective des ressources en eau disponibles n'excède pas 10 %, ce qui ouvre un vaste potentiel pour la contribution de ce secteur aux futurs bilans énergétiques. Des défis logistiques se

posent car les sites propices au développement se situent dans des zones reculées, loin des centres de consommation, ce qui impose le recours à l'hydrogène comme vecteur énergétique stratégique. Des études ont montré que le transport d'énergie par hydrogène est plus avantageux économiquement que le transport d'électricité conventionnel sur des distances supérieures à 1 000 km.[1]

I . 4 .3. F. D'autres sources renouvelables :

Malgré leur capacité de production limitée par rapport à d'autres sources, certaines énergies alternatives se distinguent comme des options prometteuses, actuellement exploitées ou en projet dans des régions aux caractéristiques géophysiques favorables. Parmi les plus importantes, selon [source manquante], figurent :

L'énergie cinétique marine : elle consiste à exploiter l'énergie des marées et des vagues.

L'énergie géothermique : plus précisément, les systèmes « chauds », comme dans les modèles italien et islandais, où des températures supérieures à 250 °C sont utilisées pour activer un cycle thermodynamique. Cette approche technologique vise à produire de l'électricité pour alimenter un électrolyseur, avec des niveaux d'efficacité garantissant une viabilité économique suffisante pour amortir les coûts d'investissement du système de production.[1]

I .5. Utilisation et applications de l'hydrogène :

L'hydrogène est un pilier stratégique de la transition énergétique dans les secteurs de l'industrie, du chauffage et des transports. Malgré les défis liés aux coûts élevés des infrastructures de production et de distribution, la recherche se concentre sur l'identification des zones géographiques où l'hydrogène offre une viabilité économique compétitive.

Premièrement : Applications industrielles de l'hydrogène

La production annuelle d'hydrogène en Europe atteint environ 45 millions de tonnes, et s'intègre à des processus de production complexes :

Secteur électronique : Utilisé comme composant clé dans la fabrication de cristaux de silicium et de semi-conducteurs.

Carburant pour avions et fusées : Utilisé à l'état liquide en raison de sa température de flamme exceptionnelle, atteignant 2 700 °C lors de sa réaction avec l'oxygène.

Industries chimiques et de raffinage :

Production d'ammoniac : Par réaction avec l'azote, pour la fabrication d'engrais, d'explosifs et de colorants.

Raffinement du pétrole : Utilisé dans l'hydrodésulfuration pour améliorer la qualité du carburant, et dans les procédés d'hydrogénation pour produire du méthanol, du caoutchouc et de l'acide acétique.

Industries organiques et minérales : Il est utilisé dans la synthèse des vitamines, des colorants et la production de peroxyde d'hydrogène.

Deuxièmement : Transition vers l'hydrogène dans le secteur des transports

L'hydrogène représente une alternative plus propre aux carburants fossiles (diesel et essence), les systèmes de piles à combustible agissant comme un complément et une alternative progressive aux moteurs à combustion interne. Son importance environnementale est manifeste :

L'élimination radicale des polluants locaux (oxydes d'azote et particules fines) dans les villes.

Une contribution directe à la réduction de l'empreinte carbone mondiale (CO₂).

Troisièmement : L'hydrogène dans les systèmes de chauffage

L'hydrogène peut remplacer le gaz naturel et les combustibles de chauffage conventionnels, soit totalement, soit par la technologie d'« injection mixte ». Cependant, certains défis techniques et économiques se posent :

Efficacité du mélange : Des études ont montré que l'ajout de 25 % d'hydrogène en volume aux réseaux de gaz ne réduit les émissions de carbone que de 4 %, en raison de la densité énergétique volumique plus faible de l'hydrogène par rapport au gaz naturel.

Obstacle du prix : Le faible coût de l'énergie thermique issue des combustibles fossiles demeure le principal frein au développement de l'utilisation de l'hydrogène pour le chauffage. [2]

I .6. Avantageset inconvénients de l'hydrogène :

1. Avantages :

Haute densité énergétique : Le principal atout de l'hydrogène réside dans sa haute densité énergétique, offrant environ trois fois l'énergie spécifique de l'essence par unité de masse.

Zéro émission de carbone : Sa combustion est totalement propre ; son seul rejet dans l'atmosphère est de la vapeur d'eau, ce qui en fait une solution idéale pour atténuer le réchauffement climatique.

Abondance moléculaire mondiale : Élément le plus abondant de l'univers et composant principal de l'eau, l'hydrogène garantit sa disponibilité durable.

Sécurité énergétique renforcée : Il contribue efficacement à la diversification du mix énergétique et à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles traditionnels.

Sécurité passive (légèreté) : Grâce à son extrême faible densité, l'hydrogène se disperse rapidement dans l'air en cas de fuite, réduisant ainsi le risque d'explosion en milieu ouvert.

Flexibilité de production et de transport : Il se caractérise par de multiples procédés de production et une intégration aisée aux réseaux de transport existants (pipelines). Efficacité

électrochimique : L'hydrogène est considéré comme le combustible de référence pour les piles à combustible, offrant le meilleur rendement de conversion de l'énergie chimique en électricité.

2. Inconvénients et défis :

Faible densité volumique : Sa faible densité pose un défi logistique ; à l'état gazeux, il requiert une très faible énergie volumique, ce qui complique son stockage et son transport et nécessite une pression élevée ou un refroidissement extrême.

Forte inflammabilité : L'hydrogène possède une plage d'inflammation très large et une vitesse de flamme élevée par rapport au gaz naturel, ce qui renforce les normes de sécurité.

Problème visuel (flamme) : La flamme de l'hydrogène est presque invisible à la lumière du jour, ce qui exige des technologies de détection d'incendie spécialisées.

Obstacles économiques et techniques : Les coûts de production de l'hydrogène restent élevés, et son intégration aux technologies de transport actuelles ainsi que son stockage à long terme constituent des défis.[2]

I .7. Méthodes de stockage de l'hydrogène :

Le développement de systèmes de stockage sûrs et efficaces est une pierre angulaire de la transition vers une économie mondiale de l'hydrogène. L'objectif est de fournir des solutions garantissant une densité énergétique élevée, une réponse rapide à la demande et une rentabilité optimale, tout en éliminant totalement le risque de fuite.

Les technologies de stockage actuelles se répartissent en trois grandes catégories physiques :[2]

I .7.1. Stockage gazeux (haute pression) :

Cette méthode repose sur la réduction du volume du gaz par compression dans des conteneurs cylindriques rigides.

Technologie traditionnelle : On utilise des cylindres pouvant résister à des pressions allant jusqu'à 200 bars.

Développements modernes : Des cylindres fabriqués à partir de matériaux composites légers et très résistants ont été mis au point, permettant d'atteindre des pressions de 800 bars.

Résultat : Une densité volumique allant jusqu'à 36 kg/m³ est atteinte, ce qui en fait le choix le plus courant dans les secteurs des transports et de l'automobile aujourd'hui.[2]



Figure I .2 : Réservoirs d'hydrogène sous pression [5]

I .7.2. Stockage liquide (cryogénique) :

Cette méthode utilise le principe de la surfusion pour augmenter considérablement la densité énergétique par rapport au stockage gazeux. Mécanisme : L'hydrogène est refroidi à l'état liquide à une température très basse (-252 °C/21 K) sous pression atmosphérique.

Conception : Il est stocké dans des réservoirs cryogéniques à double paroi séparés par une couche super isolante afin d'empêcher l'évaporation.

Avantages et inconvénients : Cette méthode offre une densité très élevée (70,8 kg/m³), mais elle souffre d'une consommation d'énergie importante lors du processus de liquéfaction (l'hydrogène perd 30 à 40 % de son énergie potentielle durant ce processus).[2]



Figure I .3: Réservoirs d'hydrogène liquide[3]

I .7.3. Stockage à l'état solide (réaction avec la matière) :

Cette méthode est considérée comme la plus sûre et la plus durable, car l'hydrogène est « piégé » dans des matériaux solides grâce à deux mécanismes :

Adsorption physique : Les molécules d'hydrogène adhèrent aux surfaces des matériaux à porosité élevée et à grande surface spécifique.

Adsorption chimique : La molécule d'hydrogène se dissocie en atomes qui diffusent dans le réseau cristallin du solide, formant des hydrures métalliques (tels que l'hydruire de magnésium).

Avantage technologique : Les solides offrent la plus haute densité de stockage de tous les matériaux. Par exemple, un centimètre cube d'hydruire de magnésium contient 6,5 atomes d'hydrogène, une densité supérieure à celle à l'état liquide (4,2) ou gazeux (0,99).

un résumé : Si la haute pression demeure la solution commercialement viable et que le refroidissement liquide est le plus adapté aux grandes quantités et au transport international, les hydrures métalliques (à l'état solide) offrent la perspective d'une sécurité et d'une densité énergétique optimales pour l'avenir.[2]

I .8. Méthodes de transport de l'hydrogène :

Les stratégies de transport de l'hydrogène dépendent principalement de son état physique, du volume de la demande et de la distance géographique, selon les critères suivants :

Camions-citernes : Il s'agit de l'option optimale et la plus économique pour les quantités limitées et moyennes et les courtes distances, lorsqu'il est à l'état gazeux.

Camions-citernes liquides : Cette option (camions-citernes liquides) devient plus efficace lorsque de grandes quantités doivent être transportées sur de longues distances, en raison de la densité énergétique élevée de l'hydrogène liquide.

Pipelines : Ils restent la solution la plus stratégique et la plus efficace pour le transport de grandes quantités à long terme, à condition que l'infrastructure nécessaire soit en place.[2]

I .9.Le rôle de l'hydrogène renouvelable:

Le recours à l'électricité renouvelable est la pierre angulaire de la production d'hydrogène décarboné. Ce procédé revêt une importance environnementale capitale, car la production conventionnelle d'hydrogène représente actuellement environ 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Par conséquent, le développement de procédés de production sobres en carbone et économiquement viables constitue un enjeu crucial pour l'intégration de l'hydrogène comme carburant propre dans les secteurs des transports, de l'industrie et du chauffage.

L'hydrogène offre des perspectives prometteuses pour une décarbonation durable et le respect des objectifs climatiques internationaux. Alors que la méthode actuelle (le reformage du méthane à la vapeur) entraîne des émissions massives, jusqu'à 9 tonnes de dioxyde de carbone par tonne d'hydrogène produite, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative idéale, permettant une production totalement exempte d'émissions. En conséquence, la transition des énergies fossiles vers les énergies renouvelables contribue de manière essentielle à la protection du climat et à la durabilité énergétique.[2]

I .10. Conclusion :

Ce chapitre explore les propriétés physico-chimiques uniques de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique stratégique, en soulignant ses nombreux avantages tels que sa haute densité énergétique et sa combustion propre, tout en abordant les défis opérationnels et logistiques liés à sa manipulation dans le secteur industriel. L'analyse technique de différentes voies de production aboutit à une conclusion essentielle : l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à partir de sources d'énergie renouvelables (solaire et éolienne) représente la voie la plus durable, car elle garantit un cycle zéro carbone, ce qui en fait l'alternative idéale pour compenser l'épuisement des ressources fossiles et réduire l'empreinte environnementale des principales industries.

Chapitre II: Technologie d'électrolyse de l'eau

II : Technologie d'électrolyse de l'eau :

II.1. Introduction :

Il semble que l'hydrogène le plus propre qui puisse être produit soit l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau, qui est le carburant le plus propre à l'avenir. Bien que son coût soit très élevé. Cependant, les risques d'épuisement des ressources fossiles et de réchauffement climatique ont conduit à la nécessité d'une transition énergétique vers un modèle énergétique durable, reposant sur des ressources renouvelables, même si elles sont coûteuses, comme l'énergie solaire et éolienne, à travers lequel l'hydrogène peut être produit grâce au processus d'électrolyse. Ce chapitre vise à en apprendre davantage sur le processus d'électrolyse et quels sont ses types ? Quels sont les facteurs qui affectent sa performance entre-temps ?

II.2. Histoire de l'électrolyse :

Dans le livre d'Ostold, il a écrit : Le phénomène très évident de l'oxydation dans les plaques a été complètement ignoré par Volta alors que n'importe qui peut remarquer qu'il a pris des fils de sa batterie et les a immergés dans l'eau, et ici il est certainement nécessaire que le processus d'électrolyse et la libération de gaz se produisent. Mais bien qu'il soit intelligent et vif d'esprit et décrive chaque phénomène avec la plus grande précision et le plus grand soin, il n'a pas indiqué une seule fois qu'il avait observé une réaction chimique.

Les recherches scientifiques et le livre d'Ostwald ont montré que Ritter était en effet le premier à observer la décomposition de l'eau par le courant électrique.

La préséance de cette découverte a été attribuée par les Anglais Nicholson et Carlisle pendant une période considérable et longue.

Il était écrit en Cobb : « En 1800, les Anglais Nicholson et Carlisle ont remarqué lors de leurs recherches conjointes que lorsqu'une cellule de tension est fabriquée dans l'eau, un gaz est libéré et l'eau se décompose en ses composants sous l'électricité, les libérant sous forme de gaz ». L'une des conditions les plus importantes pour le succès de cette expérience est que les fils connectés à l'eau soient en métal non corrosif.

Immédiatement après la publication des observations de Nicholson-Landriani, de nombreux scientifiques et chercheurs ont répété l'expérience, et de cette manière Volta a appris le phénomène qu'il avait précédemment découvert en utilisant sa batterie.

De nombreux chercheurs ont suivi cette méthode de recherche scientifique, mais le phénomène de la présence d'acides et de bases au niveau des électrodes et de petites quantités d'impuretés dans l'eau a suscité des inquiétudes parmi les scientifiques, ce qui a conduit à leur prise en compte et étude.[8]

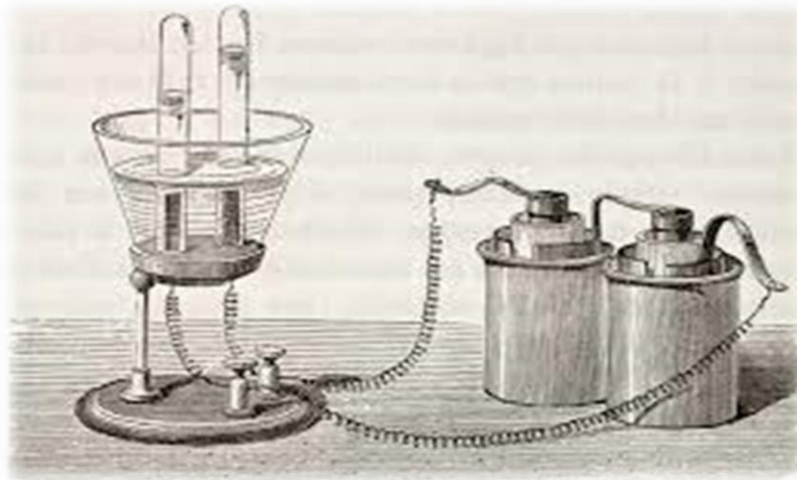


Figure II 1. La première cellule d'électrolyse de l'eau [14]

Ritter : Contributions à la Connaissance du Galvanisme (1800.1.252) Journal de Voigt sur l'état de nature (1800.2.356).

Hope : Electrotechnical Journal 1888.9.36

Cobb : Histoire de la chimie 11.1800.330

Ostold : Electrochimie, son histoire et enseignement 1896.132[8]

II .3. Principe de fonctionnement de l'électrolyse :

II .3.1. Définition de l'électrolyse :

C'est un processus dans lequel un courant électrique est injecté dans une cellule afin de provoquer une réaction chimique non spontanée à l'intérieur. Dans ce cas, la cellule est appelée une cellule électrolytique. [9] [10]

II .3.2. Définition de la cellule d'électrolyse :

C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique par une réaction chimique générée en dirigeant un courant électrique à l'intérieur de la cellule, comme une tension et une cellule galvanique. [9] [10]

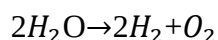
II .3.3. Le Principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau :

Le principe de l'électrolyse de l'eau repose sur l'utilisation de deux électrodes électriquement conductrices immergées dans un milieu aqueux, où une tension électrique continue leur est appliquée entre elles afin que le processus fonctionne efficacement. De plus, l'eau avec un électrolyte tel que l'acide sulfurique H_2SO_4 et l'hydroxyde de sodium doit être disponible, et l'eau distillée doit être évitée car elle est un mauvais porteur de charges électriques dans la solution.

Au niveau de l'anode : le processus d'oxydation (perte d'électrons) se produit

Au niveau de la cathode, le processus de réduction (acquisition des électrons) se déroule [9] [10]

La réaction totale de décomposition de l'eau est donnée par l'équation totale suivante :



Vous remarquez que le volume de gaz hydrogène à l'électrode négative augmente deux fois plus que le volume de gaz oxygène à l'électrode positive. [9] [10]

II.4.Types d'électrolyse :

II.4.1. Électrolyse alcaline :

L'une des techniques les plus répandues dans l'électrolyse pour produire de l'hydrogène est l'électrolyse alcaline. Elle est principalement basée sur l'hydroxyde de potassium concentré (KOH). OH⁻ est utilisé pour transférer des camions entre les électrodes vers l'équation suivante :

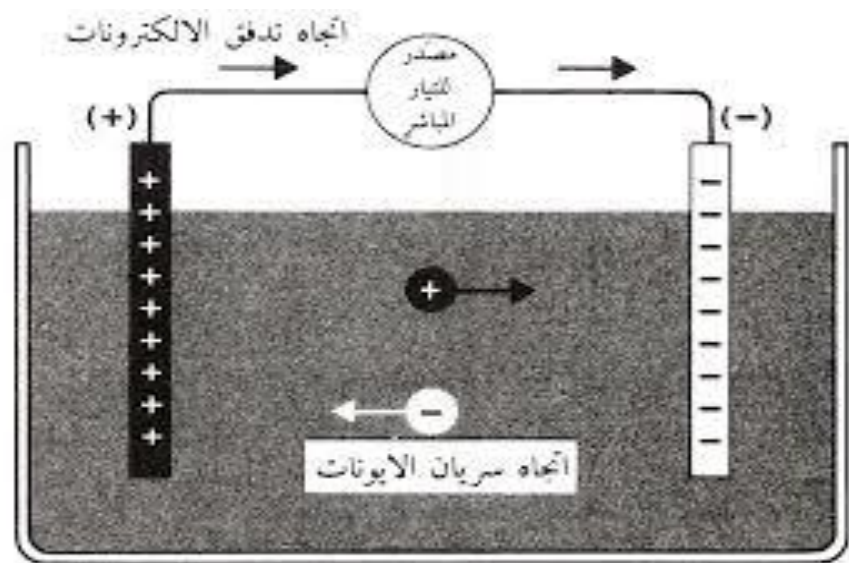
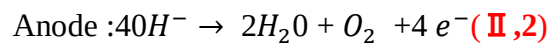
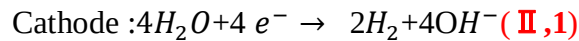


Figure II .2. Cellule d'électrolyse de l'eau alcaline conventionnelle[15]

Afin de séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'atome d'eau, les pôles positifs et négatifs dans la cellule sont séparés par une membrane qui permet le passage de l'eau et des ions sauf les gaz. D'autre part, l'hydroxyde de potassium (KOH) fournit une base solide, car il provoque la corrosion de nombreux matériaux, et les électrodes sont généralement faites de nickel (nickel) ou même de cobalt (cobalt). Après avoir traité les gaz résultants à la sortie du réacteur, une pureté supérieure à 99 % est obtenue.[12]

II.4.2. Électrolyse à haute température :

Dans l'électrolyse à haute température, les scientifiques se sont appuyés sur la technologie des piles à combustible à très haute température, car l'énergie électrique nécessaire pour diviser l'eau à 100 degrés Celsius est bien inférieure à celle de l'électrolyse à 1000 degrés Celsius. De là, nous

concluons que le haut-électrolyseur de température fonctionne avec un rendement élevé comparé à l'électrolyseur à basse température régulier, et cette technologie est spécifique aux oxydes solides.[12]

L'équation du principe de fonctionnement de la cellule est formulée par électrolyse :

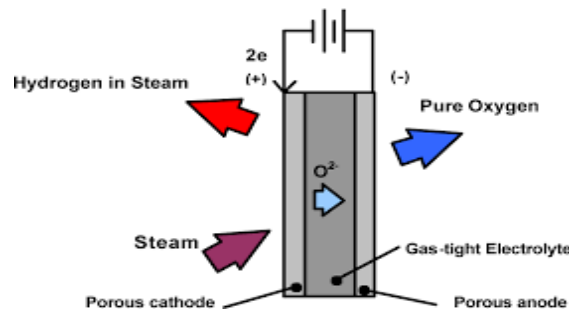
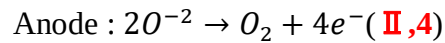
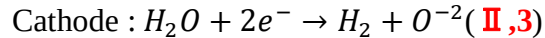


Figure II .3. Cellule d'électrolyse à haute température [16]

II .4.3. Électrolyse acide (PEM) :

Le principe de l'électrolyse acide dans une cellule est basé sur la séparation des électrodes cathodique et anodique avec une membrane polymérique qui permet l'échange de protons ;[12]

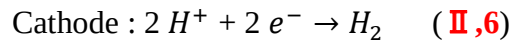
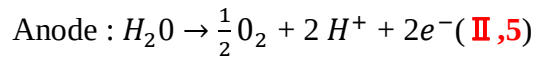
Comme indiqué sur l'image :



Figure II .4. Cellule d'électrolyse (PEM) [17]

L'électrolyse de l'eau se produit lorsqu'une différence de potentiel électrique suffisante est projetée entre les deux électrodes dans l'eau dans la cellule. [12]

Voici le rôle des protons, qui migrent sous l'influence du champ électrique selon l'équation suivante :



Dans cette technique, les électrodes sont généralement recouvertes de catalyseurs à base de métaux traces tels que le platine (platine) ou l'iridium (iridium). Cela est dû au fait que la fonction de l'électrolyseur (PEM) dépend entièrement des propriétés de la membrane et des inducteurs utilisés.[12]

II.5. Principe de fonctionnement de la cellule :

Le principe de la cellule est basé sur l'application d'une tension externe alimentée à l'intérieur de la cellule. Au niveau de l'électrode positive, une réaction d'oxydation se produit avec la libération des électrons. D'autre part, au niveau de l'électrode négative, une réaction de réduction se produit qui permet l'absorption des électrons. Les pôles positif (anode) et négatif (cathode) sont appelés électrodes, où un circuit interne est fourni par l'électrolyte entre eux. [6][7]

II.6. Composants de la cellule d'électrolyse :

II.6.1.Électrodes : Les électrodes porteuses sont généralement utilisées. Leur avantage est qu'ils conduisent le courant sans entrer dans une réaction chimique avec les composants de la solution, comme une électrode (Platinum. Gold. Silver. Carbon).

- **anode (électrode positive) :** C'est l'électrode positive de la cellule où a lieu la réaction d'oxydation, ce qui fait que les molécules d'eau perdent des électrons pour former du gaz oxygène O_2 et des ions hydrogène H_2 .
- **Cathode :** Le pôle négatif de la cellule où a lieu la réaction de réduction, et les ions hydrogène gagnent des électrons pour former du gaz hydrogène. [6][7]

II.6.2. Electrolyte : C'est une substance, ou autrement dit un composé ionique, dont la fonction est de transporter un courant électrique dans l'électrolyte. Lorsque cette substance est dissoute dans l'eau, elle se décompose en ions positifs et négatifs. L'une des conditions pour cette substance est que les ions qu'elle contient soient mobiles afin que le processus d'électrolyse puisse avoir lieu. Les électrolytes les plus célèbres trouvés dans la solution sont Na^+ et Cl^- [6][7]

II.6.3. Courant continu (DC) : C'est la colonne vertébrale des électrons modernes. Il fournit de l'énergie électrique pour générer ou décharger des ions dans l'électrolyte dans une seule direction fixe. [6][7]

II.6.4. Membrane échangeuse de protons : C'est une membrane très fine, généralement faite d'un polymère spécial appelé Nafion, qui a des propriétés physiques et chimiques qui en font un bon conducteur de protons entre l'anode et la cathode et une barrière efficace entre les deux gaz,

l'hydrogène et l'oxygène. Il ne permet qu'aux protons de passer pour faire de l'hydrogène pur en utilisant l'électricité.[6][7]

II.6 .5. La couche de diffusion : C'est l'un des éléments de base dans la cellule d'électrolyse. C'est la couche extérieure de l'électrode. Son emplacement se trouve entre le canal d'écoulement par lequel passent l'eau et le gaz et une membrane généralement constituée de carbone mélangé avec du platine. Son épaisseur est estimée à (0.2_0.4). Sa fonction : Permettre au gaz de se diffuser et d'atteindre la couche active. Grâce à cela, l'électrode peut résister aux dommages qui peuvent survenir en raison de la haute température résultant des réactions électrochimiques et contribue à la décharge de l'eau formée à la cathode. [6][7]

II.6 .6. Catalyseurs : C'est le facteur décisif qui fait que la réaction chimique se produit rapidement et efficacement sans avoir besoin de conditions difficiles. C'est une substance considérée comme rare et noble, comme le platine et le nickel, qui aide à accélérer la réaction de l'eau se décomposant en gaz hydrogène et oxygène. [6][7]

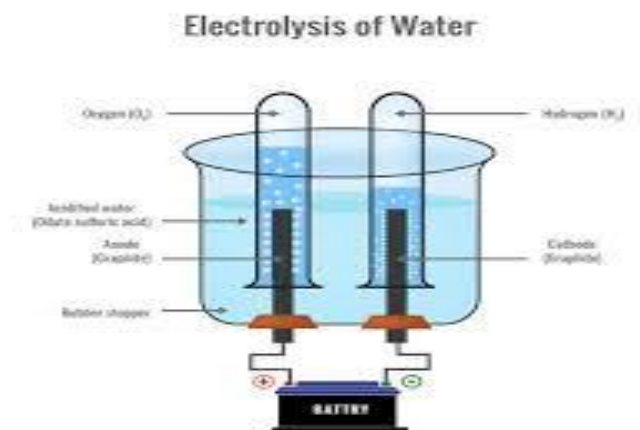


Figure II .5. Réalisation d'une cellule d'électrolyse de l'eau [18]

II.7. Facteurs affectant la performance cellulaire :

II .7 .1. L'effet de la température :

Pour améliorer l'efficacité de l'électrolyse, les scientifiques ont développé une méthode très courante pour augmenter la température. Cela aide à réduire l'effort requis pour analyser l'eau, améliorer la cinétique de réaction, ainsi que la conductivité de la membrane d'échange (PEM), et accélérer le transfert de masse (eau et gaz), à condition que la température soit augmentée de la température ambiante à environ 60-80 degrés Celsius.[6][7]

II.7.2. L'effet de la distance entre les électrodes :

Pour obtenir les meilleures performances de cellule, il est recommandé d'amener les électrodes le plus près possible afin d'augmenter le courant électrique. Cela est dû aux diminutions résultantes de la résistance électrique entre les électrodes. [6][7]

II.7.3. Effet de la concentration d'électrolyte :

La concentration de l'électrolyte affecte clairement la performance de la cellule, car plus la concentration est élevée, plus le nombre d'ions dans la solution est élevé, ce qui entraîne une augmentation de la capacité de la solution à conduire le courant électrique, ce qui conduit à une meilleure performance cellulaire et à une perte d'énergie réduite. Aussi, la concentration de la solution d'électrolyte affecte la performance ohmique de l'électrolyse, ce qui aide à augmenter les réactions disponibles dans la surface de l'électrode, qui conduit à une augmentation de l'efficacité de la production d'hydrogène. Mais à condition que cette augmentation soit optimale et très supérieure afin de ne pas encombrer les ions et qu'ils puissent se déplacer librement. [6][7]

II.8. Types de cellules électrolytiques :

II.8.1. Cellules alcalines conventionnelles: Dans un électrolyseur alcalin, la solution d'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium (KOH), et les ions sont connectés par des ions hydroxyde (OH) et potassium. [11]

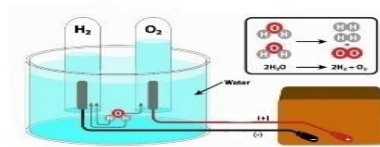


Figure II.6 : Cellules alcalines conventionnelles [19]

II.8.2. Cellules à membrane échangeuse de protons (PEM) : Ce qui distingue ces cellules est leur électrolyte solide constitué d'une membrane polymérique qui aide à délivrer les ions hydronium (H_3O^+) depuis l'anode et permet la séparation des gaz résultants, oxygène et hydrogène, selon l'équation suivante : [11]

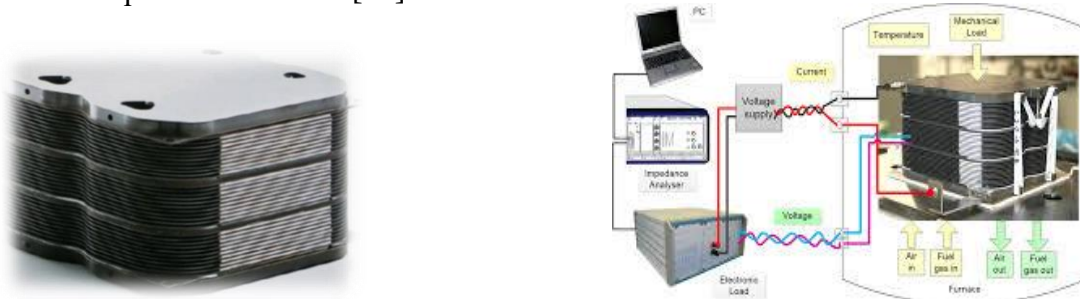
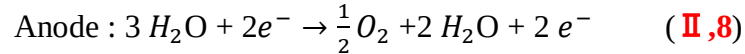
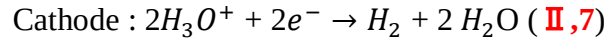


Figure II.7 Cellules à membrane échangeuse de protons (PEM) [20]



La performance de l'électrolyseur PEM dépend également principalement des propriétés de la membrane et des catalyseurs utilisés. [11]

II.8.3. Cellules d'électrolyse à très haute température (SOEC) :

Le principe de ces cellules repose sur la décomposition des molécules d'eau en vapeur au niveau de la cathode, et cette décomposition s'arrête en fonction de la nature de l'électrolyte. [11]

Voici une description des interactions aux électrodes

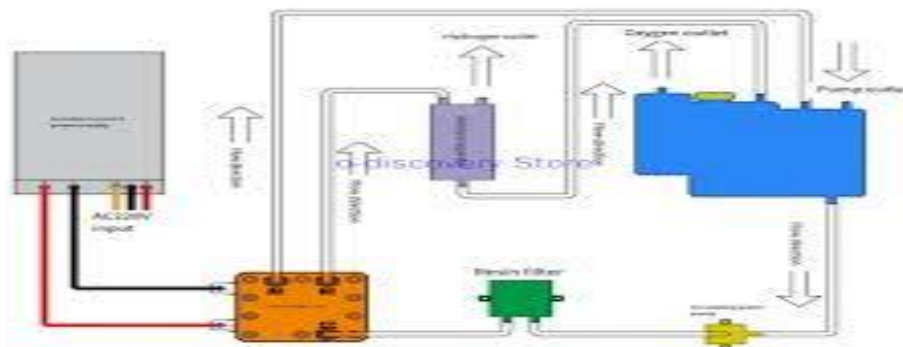
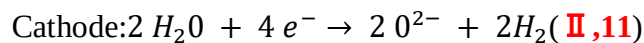
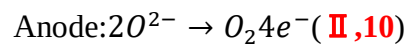
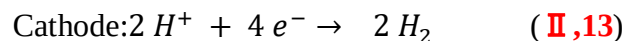
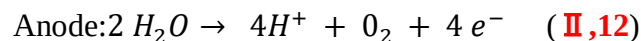


Figure II.8. Cellules d'électrolyse à très haute température (SOEC) [21]

➤ **Électrolyte conducteur pour les superoxydes :**



➤ **Electrolyte conducteur de protons_:**



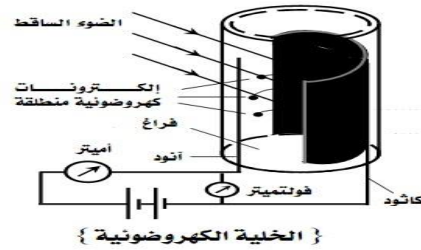


Figure II.9. Cellules d'analyse électro-optique [22]

II.8.4. Cellules d'analyse électro-optique :

Les cellules photovoltaïques sont définies comme des dispositifs analytiques photovoltaïques intégrés et homogènes qui sont des électrodes optiques immergées dans une solution électrolytique et éclairées par la lumière du soleil. À travers eux, nous réalisons le processus d'analyse électro-optique, qui à son tour est défini comme le processus de désintégration de l'eau en raison du courant électrique résultant de l'éclairage d'un photo catalyseur d'eau.[11]

Bien que la Terre regorge de ressources en eau, des mers et océans aux nappes phréatiques, ces ressources, à l'état brut, ne possèdent pas les propriétés physico-chimique [11]

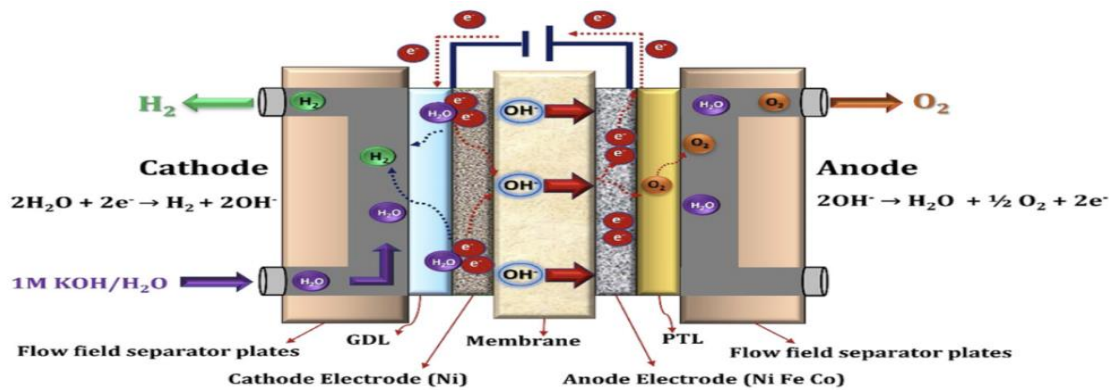


Figure II.10. Cellules d'électrolyse à membrane ionique (AEM) [23]

L'une des propriétés les plus importantes des cellules d'électrolyse utilisant des membranes ioniques est que l'ion passant à travers elles sont l'ion hydroxyde (OH^-) dans un milieu alcalin caractérisé par un catalyseur d'un métal non noble tel que le nickel et le cobalt, ce qui donne un bon gaz hydrogène, mais il peut contenir de la vapeur d'eau. Sa maturité technologique est en développement dans le futur. [11]

II.9. Facteurs affectant la performance de l'électrolyse :

II.9 1. Effet de la température sur la tension d'électrolyse :

À la lumière des développements dans la recherche scientifique menée sur la cellule d'électrolyse, les scientifiques ont constaté que l'augmentation de la température aide à améliorer considérablement les performances de la cellule. Lorsque la température augmente, la résistance des ions diminue à mesure qu'ils se déplacent dans l'électrolyte, et ainsi la tension requise pour faire fonctionner l'appareil diminue, ce qui entraîne une consommation d'énergie réduite. De plus, lorsque la température est élevée, les réactions qui ont lieu à l'intérieur de l'électrolyseur deviennent plus faciles et nécessitent moins d'effort supplémentaire, mais l'augmentation de la production de température est limitée car elle peut impliquer une évaporation rapide de l'eau, et nous pourrions devoir augmenter la pression à l'intérieur de l'appareil pour éviter la perte d'eau. Les matériaux à partir desquels l'électrolyseur est fabriqué sont également affectés par la température élevée. [1]

Pour rendre le processus plus efficace électriquement, la température doit être modérée, en tenant compte de la température extérieure et des faibles densités de courant [1]

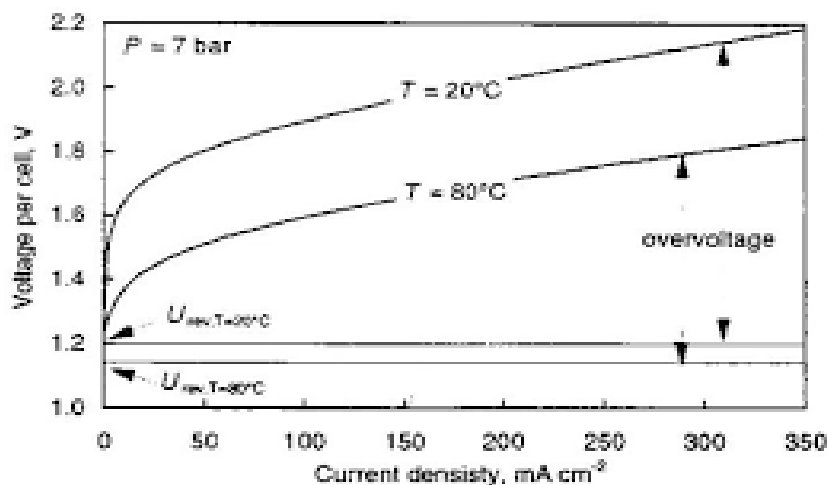


Figure II .11. Influence de la température sur la tension de cellule d'un électrolyseur Alcalin [1]

II.9 2. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse :

La question posée dans ce titre est : L'augmentation de la pression affecte-t-elle ou entrave-t-elle la tension d'électrolyse en pratique ? Dans l'interprétation scientifique, nous voyons qu'une pression croissante entraîne une augmentation de la quantité d'électricité nécessaire pour l'analyse, c'est-à-dire une diminution de l'efficacité de la consommation d'énergie. Mais dans la réalité technique actuelle des usines, les ingénieurs ont constaté que la pression affecte la tension des cellules en fonction du type de technologie utilisée. Il existe un type de dispositif d'électrolyse

appelé : « écart zéro », qui est connu sous le nom de plaques bipolaires. Lorsque la haute pression est augmentée, cela n'affecte pas ou n'entraîne pas du tout une consommation excessive d'énergie. D'autre part, il existe un autre type de dispositif qui repose sur des membranes. En électrolyse sous haute pression, dans ce type, l'augmentation de la pression affecte le comportement des bulles de gaz générées, les rendant plus petites. Ce dernier conduit à une réduction de la résistance de l'électrolyte et donc à une diminution de la tension requise, c'est-à-dire une efficacité optimale. Cette différence et la différence entre les deux types a attiré l'attention des scientifiques, ce qui encourage les fabricants à développer des dispositifs d'électrolyse sous haute pression dépassant 30 bar. Parce que lorsque l'hydrogène est produit à haute pression, nous avons fourni une étape très coûteuse, qui est une étape qui consomme énormément d'énergie pouvant être économisée, et la courbe ci-dessous montre que :[1]

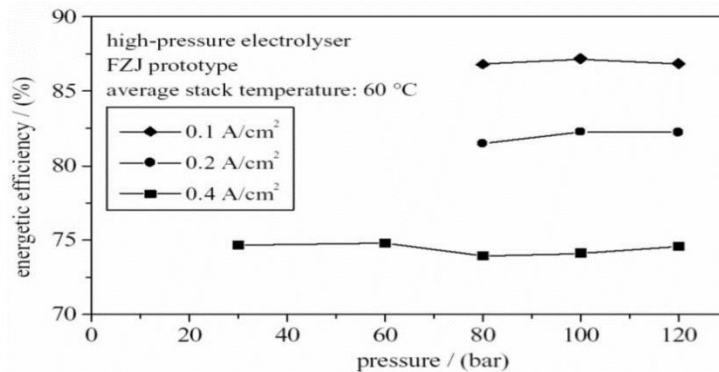


Figure II.12. Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zéro gap [1]

II.9.3. L'effet de la pression sur la pureté des gaz produits :

Le courant électrique et la pression sont deux principaux facteurs affectant la pureté des gaz produits par l'électrolyse, en particulier l'oxygène. Lorsque la pression est augmentée proportionnellement, le pourcentage d'impuretés d'hydrogène dans l'oxygène augmente. Puisque la taille des molécules d'hydrogène est très petite, le faible courant joue un rôle dans la réduction du pourcentage de production d'hydrogène. Par conséquent, leur taille leur permet de contourner la membrane de séparation jusqu'à ce qu'ils atteignent et se mélangent avec les molécules d'oxygène, ce qui entraîne l'impureté de l'oxygène. Ce dernier nous provoque un mélange explosif car le pourcentage d'hydrogène dans l'oxygène peut dépasser 4 %. Pour éviter ce danger, l'électrolyseur ne doit pas être utilisé sauf à un courant limité, sûr et non élevé. En bref, lorsque le rapport de pression de fonctionnement augmente, nous courons le risque d'une diminution de la qualité du gaz résultant.[1]

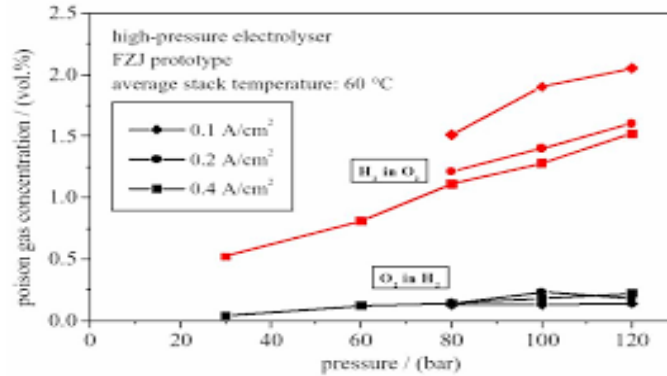


Figure II .13. Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produits par Electrolyse alcaline [1]

II .9.4. Effet du type de catalyseur et de la conception des cellules sur les performances du processus d'électrolyse :

Le type de catalyseur et la conception des cellules jouent un rôle efficace pour influencer les performances du travail d'électrolyse. Le catalyseur est considéré comme un élément essentiel dans l'accélération des réactions à la surface des électrodes. Cela réduit l'énergie nécessaire au développement de l'hydrogène et de l'oxygène. Cela réduit la surtension requise par le système, réduisant ainsi la consommation d'électricité. Il contribue également à la production de gaz purs en arrêtant et en inhibant les réactions secondaires.

La conception de la cellule est étroitement liée au type de catalyseur. Réduire la distance entre les électrodes d'anode et de cathode entraîne une diminution de la résistance électrique à l'intérieur de la cellule et donc une augmentation de l'efficacité énergétique. D'autre part, le type de membrane séparatrice joue un rôle efficace dans la prévention du mélange des molécules d'O₂ et de H₂. Ce qui aide à maintenir la pureté du produit final et à éviter le risque de formation de mélanges explosifs. [1]

II .10. Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau :

II .10. 1. Thermodynamique :

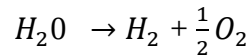
A. Équation des réactions chimiques se produisant à la cathode et à l'anode dans une solution acide : [1]

- Cathode : $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
- Anode : $2H_2O \rightarrow 2OH^- + 2H^+ + 2e^-$
- Puis : $2OH^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2$

B. Équation des réactions chimiques à la cathode et à l'anode dominées par les ions hydroxyle (OH) dans une expérience alcaline : [1]

- Cathode : $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
- Anode : $2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^- + H_2O$

- ❖ Réaction totale des deux équations :



Avec $\Delta H = 285 \text{ KJ/mol}$. H_2O enthalpie de dissociation de l'eau

- ❖ L'équation de Nernst exprime la tension de décomposition réversible sous la forme :

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}}$$

Avec :

R : constante molaire des gaz ($8.3144 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T(k) : Température thermodynamique

F : Constante de faraday (96487 mol^{-1}) .

E_0 (v) : Tension de décomposition réversible dans les conditions normales (0°C . Pression atmosphérique) .

$P_{H_2} = P_{O_2} = p(p_a)$: Pression de service de l'électrolyseur

a_{H_2O} = activité de la solution

Puis : $E_{rev} = E_0 + \frac{3RT}{4F} \ln P - \frac{RT}{2F} \ln a_{H_2O}$

- ❖ Cette tension de décomposition réversible s'établit à 1.229 V dans la condition normale
❖ A température ambiante (20°C) on a

$$E_{rev} = 1.233 + 0.0435 \log p$$

Si la pression augmente, la possibilité de décomposition inverse augmente également.

En fait, le fonctionnement inattendu des électrolyseurs industriels conduit à

Réduire la tension cellulaire efficace à une densité de courant et une température constantes

Au moment où la pression augmente.

La tension thermiquement neutre est un élément essentiel dans le fonctionnement isotherme d'un électrolyseur. [1]

Elle s'exprime à travers :

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{2F} = 1.48 \text{ V (à } 298 \text{ K)}$$

La température ne joue qu'un rôle secondaire dans l'effet du stress. Augmentation de

D'autre part, la température réduit la possibilité de décomposition inverse.

Cette diminution se reflète dans les bornes de l'électrolyseur, où elle peut généralement être observée

Le gain varie de 2 à 5 mV/°C. [1]

II .10.2. Cinétique :

Il y a quatre termes qui permettent d'exprimer le potentiel réel de la cellule d'un électrolyseur.

$$E = E_{REV} + \eta_a + \eta_c \cdot J$$

Avec :

η_a (v) : surtension anodique

η_c (v) : surtension cathodique,

$RC(\Omega \cdot cm^2)$:résistance globale (chute ohmique du diaphragme, épaisseur des compartiments, effet d'écran des bulles),

J (A / cm^2) :densité de courant,[1]

II .11. Conclusion :

L'électrolyse de l'eau est considérée comme l'une des solutions les plus importantes qui permettent le stockage d'énergie renouvelable et la production du carburant du futur (hydrogène). Grâce à nos recherches dans ce chapitre sur les différents types de cellules, nous avons conclu qu'elles ont un lien clair avec la nature des matériaux utilisés pour fabriquer des électrodes. Le travail des chercheurs consiste maintenant à améliorer les facteurs afin de réduire les coûts et d'augmenter l'efficacité. Grâce à cela, la molécule d'eau se décompose en deux éléments de base (oxygène et hydrogène), et ce dernier est considéré comme un carburant propre à l'avenir qui remplace les combustibles fossiles, donc grâce à notre compréhension des types d'électrolyse et des facteurs affectant la performance cellulaire, nous pouvons accomplir. Systèmes de production d'hydrogène plus efficaces. Malgré les défis existants, le développement scientifique et chimique annonce un âge d'or pour produire de l'hydrogène propre en utilisant la technologie d'électrolyse.

En fin de compte, nous avons éliminé l'épuisement des énergies fossiles et des ressources avec une énergie renouvelable propre et durable

Chapitre III : Qualité de l'eau

III : Qualité de l'eau :

III.1. Introduction :

L'eau est essentielle à la révolution des énergies vertes, l'hydrogène s'imposant comme un vecteur énergétique dont la production repose entièrement sur la molécule s nécessaires à l'électrolyse. C'est là que réside le problème fondamental : les électrolyseurs modernes, malgré leur capacité de production élevée, sont des systèmes extrêmement sensibles qui ne traitent pas l'eau comme une ressource naturelle, mais comme un intermédiaire industriel devant respecter des normes de pureté strictes.[27]

Dès lors, la question se pose : comment produire de l'hydrogène en exploitant les propriétés adéquates de l'eau ?

III.2. Définition de l'eau :

L'eau est chimiquement classée comme un composé biologique composé d'hydrogène et d'oxygène. Sa particularité réside dans sa capacité à exister sous trois états physiques (liquide, solide et gazeux) selon les conditions environnantes, bien que son état prédominant à température ambiante soit liquide. C'est l'un des composés les plus abondants dans la nature, incolore, inodore et sans saveur. Le secret chimique (la polarité) : À l'échelle moléculaire, l'eau possède une structure asymétrique ; un gros atome d'oxygène, chargé négativement, est lié à deux petits atomes d'hydrogène, chargés positivement. Ce contraste électrique crée ce que l'on appelle la « polarité », une caractéristique qui confère à l'eau son exceptionnelle capacité à dissoudre les substances et détermine ses réactions avec d'autres éléments.

Importance biologique et physique : En tant que « solvant universel », l'eau est essentielle à tous les processus biologiques. Elle est le principal composant des solutions biologiques telles que le sang et les fluides digestifs, qui assurent la perpétuation de la vie dans les organismes. Visuellement, bien qu'elle apparaisse transparente en petites quantités, elle présente une légère couleur bleue qui apparaît en grands amas, en raison de son absorption sélective des longueurs d'onde rouges du spectre lumineux. [27]

III.3. Propriétés physico-chimiques :

III.3.1. Propriétés physiques de l'eau :

L'eau possède un ensemble de propriétés physiques exceptionnelles qui lui confèrent une importance stratégique dans divers domaines vitaux, notamment l'agriculture et l'industrie. Voici un aperçu des plus importantes :

Solubilité exceptionnelle (solvant universel) : L'eau est classée parmi les solvants naturels les plus puissants. Elle possède une grande capacité à rompre les liaisons de nombreux sels et composés chimiques. De ce fait, on la trouve rarement à l'état pur (100 %) dans la nature. Elle contient plutôt des proportions variables de sels minéraux dissous et de gaz qu'elle acquiert de son environnement.

Capacité thermique massique élevée : L'eau se caractérise par une remarquable capacité à absorber d'énormes quantités d'énergie thermique avant que sa température n'augmente

significativement. Cette propriété est utilisée en climatisation, comme par exemple pour arroser les espaces commerciaux et les régions chaudes afin d'absorber la chaleur ambiante et de les rafraîchir.

Anomalie de l'eau : L'eau possède une propriété physique unique et importante : elle se dilate et augmente de volume lorsqu'elle passe de l'état liquide à l'état solide (glace). Cette expansion entraîne une diminution de la densité de la glace, qui flotte alors à la surface de l'eau liquide. Ce phénomène est vital pour la survie des organismes aquatiques dans les régions polaires, où la glace agit comme un isolant thermique, protégeant l'eau liquide sous-jacente du froid extrême de l'atmosphère.

Tension superficielle et capillarité : L'eau possède une tension superficielle très élevée en raison des fortes forces de cohésion entre ses molécules. Cette propriété permet la capillarité, mécanisme qui permet à l'eau de remonter spontanément à travers les minuscules vaisseaux des plantes, transportant ainsi les nutriments vers les hautes altitudes. Elle joue également un rôle crucial dans la circulation de l'eau à travers les pores et les fissures des roches et des sols, où l'eau remonte jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint entre la tension superficielle et la gravité, facilitant ainsi l'accès des plantes, notamment dans les régions arides, à la nappe phréatique.[27]

III.3.2. Propriétés chimiques:

Une propriété chimique est définie comme une caractéristique qui ne peut être mesurée ou observée qu'en provoquant une modification de la structure interne d'une substance suite à sa réaction avec d'autres substances, telles que l'air, l'eau, les acides et les bases. Voici les principales propriétés chimiques qui affectent la qualité de l'eau :

PH : Le pH mesure l'acidité et l'alcalinité d'un milieu aqueux. Lorsque le pH atteint 7, l'eau est considérée comme chimiquement « neutre ». Tout écart important par rapport à cette valeur a des effets néfastes. Une forte acidité (pH faible) provoque la corrosion des métaux et la dissolution des matières solides, nuisant à la biodiversité aquatique, tandis qu'une forte alcalinité (pH élevé) entraîne un goût amer, l'accumulation de calcaire dans les canalisations et une diminution de l'efficacité de la chloration.

Dureté de l'eau : Cette propriété exprime la concentration d'ions calcium et magnésium dissous dans l'eau. Une dureté élevée affecte négativement les propriétés physiques et chimiques de l'eau, réduisant la solubilité du savon et favorisant l'accumulation de tartre dans les équipements et les systèmes aquatiques.

Alcalinité : L'alcalinité dépend de la concentration de composés chimiques spécifiques, tels que les bicarbonates, les carbonates et les hydroxydes. Elle agit comme un tampon, protégeant l'eau des variations brusques de pH lors de l'ajout d'acides ou de bases. Cette propriété est essentielle à la stabilité des écosystèmes aquatiques, car des changements soudains de pH peuvent nuire à la santé des poissons et autres organismes aquatiques. Une eau à forte alcalinité assure une meilleure stabilité de l'équilibre acido-basique.[27]

III.4. Classification des types d'eau :

L'eau sur Terre varie selon sa composition chimique et la proportion de sels et de minéraux qu'elle contient. On peut la diviser en deux grands types :

1. Eau douce :

Ce type d'eau se caractérise par sa faible salinité, le pourcentage de sel de table (chlorure de sodium) n'excédant pas 1 %. Elle contient également d'autres minéraux essentiels comme le calcium et le magnésium. On la trouve à l'état naturel sous deux formes :

Eaux de surface : rivières et lacs.

Eaux souterraines : stockées sous terre.

2. Eau de mer et océans :

Cette eau recouvre environ 70 % de la surface de notre planète et se caractérise par une composition riche et complexe :

Salinité : Les sels représentent environ 3,5 % de sa composition totale (environ 2,5 % de sels majeurs et 1 % de matières organiques et inorganiques et de gaz dissous).

Importance économique : C'est une source importante d'éléments commerciaux essentiels comme le magnésium, le brome et le sel de table.

Usage humain : Malgré sa forte salinité, elle peut être transformée en eau potable grâce à des usines de dessalement modernes.

3. Eau distillée : Pureté physique

Il s'agit d'eau purifiée par un processus d'évaporation suivi d'une condensation, permettant de la séparer des impuretés.

Production : L'eau est portée à ébullition jusqu'à l'obtention de vapeur, puis cette vapeur est condensée pour former un liquide pur, exempt de minéraux et de sels.

Limites : Malgré la précision de la distillation, certaines substances, comme le mercure et les composés organiques volatils, peuvent rester en suspension dans l'eau car elles s'évaporent et se condensent avec les molécules d'eau.

4. Eau dure : Le point de rencontre entre eau douce et eau salée

Cette eau se trouve dans les zones où les rivières (eau douce) rencontrent les mers ou les océans.

Caractéristiques : Sa salinité est modérée ; elle est plus salée que l'eau de rivière, mais moins salée que l'eau de mer claire.

5. Eau potable : Eau traitée et stérilisée

Il s'agit d'eau ayant subi des traitements physico-chimiques précis afin d'être potable conformément aux normes internationales.

Stérilisation : Des substances puissantes telles que le chlore ou l'ozone sont utilisées pour éliminer les bactéries et les matières biologiques nocives.

Équilibre des métaux : La teneur en métaux est ajustée et l'eau est filtrée afin de garantir le respect des normes sanitaires internationales.[27]

III.5. Ressources en eau (Sources) :

Les ressources en eau naturelles varient entre des sources visibles, comme les cours d'eau et les lacs, et des sources moins fréquemment utilisées, comme les glaciers. L'étude de ces sources met en lumière le défi auquel l'humanité est confrontée : malgré l'abondance apparente d'eau sur la planète, la part réellement utilisable est infime. Ces sources peuvent être classées comme suit :

Eaux souterraines : Il s'agit de l'eau stockée dans les couches sous la surface du sol, que ce soit dans les interstices du sol ou dans les fissures rocheuses. Statistiquement, l'eau douce ne représente pas plus de 3 % du volume total d'eau sur Terre, et les eaux souterraines ne constituent qu'environ 30 % de ce faible pourcentage.

Eaux de surface : Il s'agit de toutes les étendues d'eau libre situées au-dessus de la surface de la Terre, comme les rivières, les lacs et les marais. Bien que moins abondantes que les océans, elles représentent la principale source d'eau pour environ 80 % des besoins humains actuels.

Eaux océaniques et marines : Elles représentent la plus grande masse d'eau sur notre planète, atteignant jusqu'à 97 %. Cependant, elle reste impropre à toute utilisation directe (ni pour la consommation, ni pour les procédés d'électrolyse sensibles) tant qu'elle n'a pas subi un dessalement intensif pour éliminer les sels et les impuretés en suspension.

Rivières glaciaires et glaciers : Ces masses de glace renferment les plus importantes réserves d'eau douce au monde, jusqu'à 70 %. Bien qu'il soit théoriquement possible de les exploiter par fonte, le coût énergétique élevé de cette opération et de leur transport rend cette option économiquement non viable à l'heure actuelle, sans parler de leur rôle crucial dans le maintien de l'équilibre climatique et la stabilisation des températures mondiales.[27]

III.6. Critères clés pour la qualité de l'eau et son effet physicochimique :

III.6.1. La chaleur :

La norme de température est l'une des normes physico-chimiques les plus importantes qui affectent la qualité de l'eau. Il joue un rôle fondamental dans le contrôle des concentrations relatives des réacteurs et des produits au sein d'équations chimiques équilibrées. Il a également une relation directe avec l'étalon de pH. Plus la température est élevée, plus la valeur du pH est basse.

L'effet de la température sur la concentration d'oxygène dans l'eau apparaît. Lorsque la valeur de température se situe entre 13,20 degrés Celsius, la concentration diminue de 02 à 13%.[13]

III.6.2. PH (PH) :

Le terme pH est une mesure numérique permettant de déterminer le pH ou la basicité d'une solution aqueuse. Il est également connu comme le logarithme négatif de la concentration en ions hydrogène. Sa valeur varie de 0 à 14 et est calculée en utilisant l'équation $\text{PH} = -\log [\text{H}^+]$ Scientifiquement, nous pouvons mesurer la valeur du pH à l'aide d'un appareil spécial appelé appareil de mesure de l'hydrogène ou rubans de lecture des couleurs d'acidité.[13]

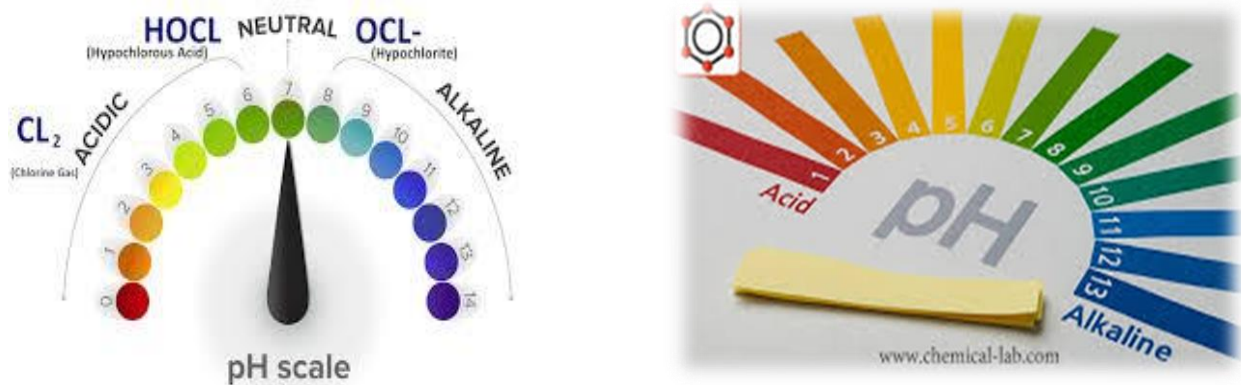


Figure. III.1 : L'échelle de pH [24] [25]

III.6.3. Conductivité électrique :

La conductivité est définie comme une mesure numérique qui décrit la capacité de l'eau ou d'un électrolyte aqueux à conduire le courant électrique. Cela dépend entièrement des sels dissous dedans. Plus le pourcentage de sels est élevé, plus la valeur de conductivité électrique est élevée. C'est l'une des méthodes les plus importantes qui nous permettent d'observer les changements qui se produisent dans l'eau naturelle et les éléments dissous. Nous pouvons le mesurer à l'aide d'un appareil de conductivité électrique ou d'un compteur. [13]



Figure. III.2 : Appareil de mesure de la conductivité électrique [26]

III.6.4. Total des sels dissous :

C'est un mélange de sels minéraux entrecoupés de quelques sels organiques. Les principaux ions présents dans les solides endogènes sont : Nitrates, sodium, potassium, calcium et magnésium. Les augmentations excessives de la quantité de sels ont un impact négatif sur l'eau, entraînant des dépôts minéraux, la formation de calcifications dans le bassin d'eau et la corrosion au niveau des pôles. [13]



Figure. 3 : appareil de mesure du sel dissous [27]

III.6 .5. Salinité :

C'est une mesure de la quantité de sels dissous dans l'eau et est généralement exprimée en mg/l, ce qui signifie 1 gramme de sel par kilogramme d'eau. La valeur de salinité est déterminée en pesant le solide après l'évaporation de l'eau ou par la somme des concentrations mesurées dans les éléments correspondants, et cette méthode est directe. Quant à la méthode indirecte, c'est lors de la mesure de la conductivité après son étalonnage. [13]

III.6 .6. Turbidité :

La turbidité exprime à quel point l'eau perd sa transparence en raison de la présence de plancton insoluble qui la fait paraître trouble, c'est-à-dire qu'elle nous décrit le degré de sa pureté, et ces planctons peuvent être des matériaux inorganiques, c'est-à-dire, comme l'argile limoneuse, carbonate de calcium, ou particules organiques sphériques, et d'autres organismes microscopiques. [13]



Figure. III.4. Turbidimètre d'eau [28]

La turbidité est mesurée en unité naphthométrique de turbidité (NTU) à l'aide d'un appareil dont le principe est le suivant : lorsque de la lumière est dirigée sur un échantillon d'eau, l'appareil

mesure la quantité de lumière diffusée par les particules en suspension à un angle de 90 degrés. Plus il y a de particules en suspension, plus la lumière est diffusée et donc le nombre de turbidité (NTU) augmente. [13]

III.6.7. Alcalinité totale :

Nous connaissons l'alcalinité de l'eau par la capacité de l'eau à absorber les ions hydrogène sans permettre à la valeur du pH de changer, que ce soit en augmentant ou en diminuant la valeur. En d'autres termes, la résistance de l'eau à modifier le pH (PH) vers l'acidité. C'est un matériau isolant qui empêche l'eau d'être acide, ce qui signifie que l'importance de cette expression réside dans les zones touchées par les pluies acides. [13]

La plupart de l'eau qui contient de l'alcalinité provient du carbonate de calcium CaCO_3 et est filtrée à partir des roches et du sol. [13]

III.6.8. Cruauté :

Apprenez que c'est une mesure de la quantité de savon dont l'eau a besoin pour former de la mousse, ou en d'autres termes, c'est une mesure de la capacité du savon à se déposer au milieu de l'eau. [13]

La dureté résulte des ions métalliques positifs divalents et de certains ions négatifs associés. Fondamentalement, le calcium et le magnésium proviennent généralement des dépôts de calcaire qui restent après l'évaporation de l'eau, ou des roches sédimentaires et s'écoulent du sol. [13]

III.6.9. Concentration critique d'ions :

III.6.9.1. Nitrates et nitrites :

- **Nitrates** : Leur présence dans la plupart des eaux est très élevée, en particulier dans les eaux souterraines, car ils représentent l'étape finale de l'oxydation. Les composés azotés organiques, tels que l'azote organique, sont présents dans l'eau en raison du flux d'eau à la surface du sol pendant la phase de formation de la rivière
- **Nitrite** : Sa présence dans l'eau est très inférieure à celle des nitrates. Il est formé à la suite de l'oxydation bactérienne incomplète de l'azote organique, qui s'accumule dans l'eau lorsqu'il manque d'oxygène, et il n'y a pas de source naturelle pour cela. [13]

III.6.10. Chlorure :

Le pourcentage de chlore dans la croûte terrestre a été estimé à 0,026 % [40]. Il est représenté sous la forme de sels de sodium, de potassium et de calcium [41]. C'est l'un des ions les plus abondants dans le corps humain. La raison de sa présence dans l'eau naturelle est due à la dissolution des dépôts de sel et des déchets provenant des industries chimiques et des opérations de puits de pétrole. [13]

III.6.11. Calcium :

Le pourcentage de calcium dans la croûte terrestre est de 4,9 %. Dans le sol, il varie entre 0,07 et 1,7 %, tandis qu'en termes de concentration dans l'eau, son pourcentage dans les eaux de surface est de 15 mg/l et dans les eaux souterraines est de 1 à 500 mg/l. La présence ou la disponibilité de calcium dans l'eau est due à l'interaction de l'eau avec les roches et le sol par lesquels elle passe, donc des roches telles que la malicite, la dolomie et le gypse se décomposent. [13]

III.6.12. Magnésium :

Le magnésium est considéré comme la principale cause de la dureté de l'eau, car sa présence dans la croûte terrestre a été estimée à 2,1 %, tandis que sa présence dans le sol variait entre 0,03 et 0,84 %.

Quant à sa concentration dans les eaux de surface, votre valeur est estimée à 4 mg/l, tandis que les eaux souterraines sont concentrées à 5 mg/l

Les types de composés de magnésium les plus importants ou les plus courants trouvés dans la nature sont le carbonate de magnésium, le carbonate de calcium, le magnésium (dolomie) et les silicates de magnésium tels que la creswalite et l'oléfine[13]

III.7. Les différents types des eaux naturelles :

- Eau douce de lacs
- Eau de rivières
- Eau souterraine (près de la surface)
- Eau souterraine (en profondeur)
- Eau dans les glaciers et les calottes glaciaires
- Eau salée de lacs ou des intérieures
- Eau dans l'atmosphère [30]

III.8. Composition des eaux naturelle :

III.8.1. Les matières minérales :

Ce sont en fait des composés ioniques. Des ions et des cations provenant de la fusion des roches dans l'eau.[30]

III.8.2. Les matières organiques :

Ce sont des composés de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote qui proviennent de la décomposition de matières animales ou végétales retardées par l'eau.[30]

III.8.3. Les matières dissoutes :

Ces matériaux sont caractérisés par une faible polarisation ionique et se répartissent dans l'eau de manière équilibrée selon la température et la pression. Ces molécules ne peuvent être éliminées de l'eau qu'en utilisant des méthodes chimiques et biologiques, pas par des méthodes physiques traditionnelles telles que la sédimentation et la filtration[30]

III.8 .4. Les matières colloïdales :

Les matières colloïdales sont constituées d'éléments de petite taille chargée négativement, ce qui explique qu'ils se repoussent et se répartissent de façon dispersée et désordonnée dans la masse liquide[30]

III.8 .5. Les matières en suspensions :

Ce sont de grosses particules solides (10 micromètres), et en raison de leur taille, elles stagnent et se déposent au fond de l'eau, ce qui facilite leur élimination par un processus physique simple[30]

III.9. Les différents types des eaux industrielles :**III.9. 1. Eau adoucie :**

En utilisant des résines, les ions calcium et magnésium sont remplacés par un poids équivalent d'ions sodium, tout en maintenant la teneur en minéraux.[30]

III.9. 2. Eau distillée :

Cette eau n'est pas utilisée dans la production industrielle de baignoires en raison de son coût élevé, elle est donc remplacée par de l'eau déminéralisée. Quant aux caractéristiques, elles varient en fonction de la méthode de fabrication.[30]

III.9.3. Eau déminéraliser :

Cette eau est fabriquée à partir de résines, où les cations sont éliminés de l'eau, tandis que des ions faibles restent, ce qui signifie que le processus d'élimination du métal est partiel.[30]

Tableau. III.1 : . Norme de la qualité du l'eau naturelle [30]

PARAMETRES	NORMES
Physico-chimiques	Unité et marge
Température	Moins de 25°C
Chlorures	6.5 à 8.5 mg /L
Sulfates	20 à 200 mg /L
Carbonates et bicarbonates	25 à 200 mg /L
Calcium	Moins de 30 ml /L
Magnésium	100 à 200 mg/L
Dureté totale	30 à 50 mg /L
Sodium	100 à 500 mg / L
Potassium	20 à 150 mg / L
Aluminium	10 à 12 mg / L
Substances indésirables	
Nitrates	25 à 50 mg / L
Nitrite	0.1 mg / L
Ammonium	0.5 mg /L
Azote	1mg / L
Matière organique	2 à 5 mg /L
Autres substances	
Fer	0.2 mg/L
Manganèse	0.05 mg/L
Cuivre	1 mg /L
Zinc	5 mg /L
Phosphore	5 mg /L
Argent	0.01 mg/L
Substances toxiques	
Arsenic	0.05 mg/L
Cadmium	0.05 mg/L
Cyanure	0.05 mg/L
Chrome	0.05 mg/L
Mercure	0.05 mg/L
Nickel	0.05 mg/L
Plomb	0.05 mg/L

III.11. Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous avons passé en revue les piliers fondamentaux sur lesquels repose la qualité de l'eau, en mettant l'accent sur les caractéristiques et les spécifications techniques nécessaires pour en faire un milieu idéal pour les processus d'électrolyse. La recherche a montré que la pureté de l'eau n'est pas simplement un facteur secondaire, mais un déterminant essentiel de l'efficacité et de la durabilité des électrolyseurs, car la présence d'impuretés et de sels affecte directement la consommation d'énergie et la qualité de l'hydrogène produit.

Chapitre IV : Partie expérimentale

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1. Introduction :

L'énergie et la pollution environnementale figurent parmi les défis les plus urgents de notre époque, notamment en raison de l'utilisation intensive des combustibles fossiles. La recherche d'alternatives propres est donc devenue essentielle, et l'hydrogène est l'une des plus importantes car il peut être produit par des méthodes respectueuses de l'environnement, telles que l'électrolyse de l'eau, permettant ainsi la production d'une énergie propre et durable.

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de la qualité de l'eau sur la production d'hydrogène par électrolyse. À cette fin, nous avons mené des expériences en laboratoire avec différents types d'eau afin de comparer la quantité d'hydrogène produite et de déterminer dans quelle mesure les propriétés de chaque type d'eau affectent l'efficacité du procédé.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Génie des Méthodes du Centre de Recherche Scientifique de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla.

IV.2. Outils et matériaux nécessaires à la mesure du modèle expérimental :

L'objectif de l'électrolyse de l'eau est de produire du dihydrogène (H_2) à l'électrode négative (cathode) et du dioxygène (O_2) à l'électrode positive (anode). La quantité et la vitesse de production du dihydrogène dépendent fortement de la nature de l'eau, car celle-ci doit contenir des ions pour qu'un courant électrique la traverse.

Procédure expérimentale :

On place de l'eau dans une cellule électrolytique.

On applique un courant électrique.

Une réaction se produit :

À la cathode : formation de dihydrogène.

À l'anode : formation de dioxygène.

Comparaison des types d'eau :

1. Eau distillée :

Caractéristiques : Très pure, presque exempte de sels et d'ions.

2. Eau de mer :

Caractéristiques : Très riche en sels, notamment en chlorure de sodium.

3. Eau du robinet :

Caractéristiques : Contient des sels minéraux (calcium, magnésium, etc.).

4. Eau minérale :

Caractéristiques : Riche en sels minéraux.

5. Eau trouble

Caractéristiques : Contient des impuretés et des particules en suspension.

6. Eau filtrée

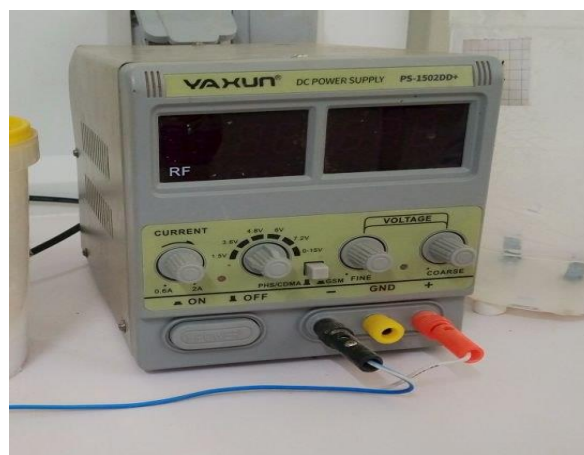
Caractéristiques : Contient moins d'ions que l'eau du robinet (selon le type de filtre).

IV.2.A. Générateur électrique (DC)

Cet appareil fournit du courant continu (CC) et est utilisé en laboratoire pour les expériences électriques. Il convertit instantanément et de manière stable le courant alternatif (CA) en courant continu (CC), avec la possibilité de contrôler la tension et le courant selon les besoins.

Ce générateur est la source d'alimentation principale du système, car il est directement connecté aux cellules électrolytiques pour fournir le courant électrique nécessaire à la réaction électrochimique.

L'appareil dispose d'une tension de sortie réglable de 0 à 15 volts et d'un courant maximal de 2 ampères, ainsi que d'un affichage numérique pour des mesures précises et d'une protection contre les courts-circuits pour garantir la sécurité du circuit pendant son fonctionnement



FigureIV.1 : Générateur de courant continue (DC)

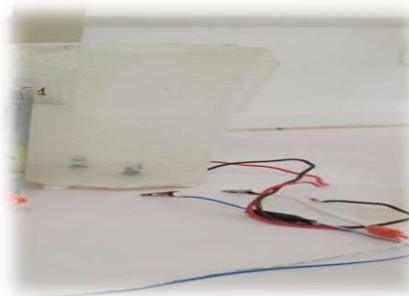
IV.2.B. Cellule d'électrolyse de l'eau :

Le système est alimenté par une cellule électrolytique alcaline qui convertit l'énergie électrique en énergie chimique par électrolyse de l'eau. L'électrolyse consiste à faire passer un courant électrique à travers une solution électrolytique, ici de l'hydroxyde de potassium (KOH) dissous dans l'eau.

À l'intérieur de la cellule électrolytique, les ions se répartissent selon leur charge : les anions migrent vers l'anode (électrode positive) et les cations vers la cathode (électrode négative). Du dihydrogène est produit à la cathode et du dioxygène à l'anode.

La cellule est constituée d'électrodes conductrices (généralement en graphite) reliées à une source de courant continu. Le dihydrogène produit est recueilli et stocké dans une éprouvette graduée pour une mesure volumétrique.

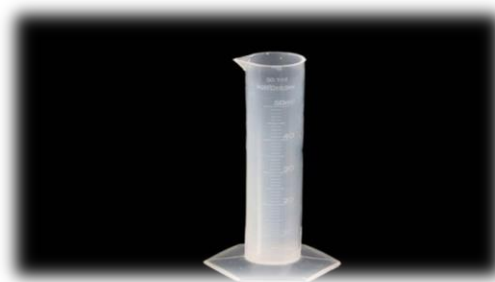
\



FigureIV.2 : Cellule d'électrolyse de l'eau

IV.2.C. Epprouvette graduée:

L'éprouvette graduée est un récipient utilisé pendant les expériences pour mesurer le volume
De l'hydrogène



FigureIV.3 : Epprouvette graduée

IV.2.D. Appareil Hi 9829 multiparameter

Le multi paramètre 9829 est un instrument de mesure et d'analyse multifonctionnel principalement utilisé pour l'évaluation de la qualité de l'eau en laboratoire et lors d'expériences scientifiques et environnementales.

Cet instrument mesure simultanément plusieurs propriétés importantes de l'eau, telles que le pH (acidité ou alcalinité), la conductivité électrique (reflétant la quantité de sels et d'ions dissous) et la température (qui influe sur toutes les réactions chimiques). Il peut également mesurer l'oxygène dissous (OD) selon le type de capteurs utilisés. Cet instrument se caractérise par sa précision et sa simplicité d'utilisation, grâce à des capteurs immergés dans l'échantillon d'eau qui fournissent des mesures directes et rapides.



FigureIV.4 : Hi 9829 multiparameter

IV.2.E. KOH - Hydroxyde de potassium

Il s'agit d'un composé chimique basique fort (une base forte), de formule chimique KOH, et il est composé de :

Potassium (K)

Oxygène (O)

Hydrogène (H)

Son rôle dans l'électrolyse de l'eau :

Lors des expériences de production d'hydrogène, le KOH est essentiel car il :

Augmente la conductivité électrique de l'eau (l'eau pure étant un mauvais conducteur)

Contribue à accélérer la réaction

Rend le processus de production d'hydrogène plus efficace

Comment l'utilise-t-on ?

Une petite quantité de KOH est dissoute dans l'eau, la transformant en une solution basique qui facilite le passage du courant électrique.



Figure IV.5: KOH - Hydroxyde de potassium

IV.2.F. Balance électronique:

Cet appareil sert à mesurer la masse avec une grande précision, en affichant des valeurs en grammes (g) ou en milligrammes (mg). Il est utilisé lors d'expériences scientifiques pour mesurer la masse de substances telles que l'hydroxyde de potassium (KOH) ou toute autre substance solide ou liquide.



FigureIV.6 : balance de précision

IV.2.G. Thermomètre :

Cet appareil sert à mesurer la température, généralement en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Il est utilisé lors d'expériences pour contrôler la température d'une solution pendant l'électrolyse, car la température influe sur la vitesse de la réaction et la production d'hydrogène.



Figure IV.7 : Thermomètre

IV.3. Grandeurs mesurées lors des expériences :

Ces expériences ont permis de mesurer plusieurs grandeurs physiques et chimiques fondamentales :

Premièrement : le volume d'eau utilisé lors de l'électrolyse.

Deuxièmement : la masse (ou le volume) d'hydroxyde de potassium (KOH) utilisé comme solution électrolytique.

Troisièmement : la température à l'intérieur de la cuve de l'électrolyseur pendant l'expérience.

Quatrièmement : le volume de dihydrogène (H_2) produit par l'électrolyse.

Cinquièmement : la pression atmosphérique (liée à l'air ambiant), considérée lors de l'électrolyse.

IV.4. Conditions de réalisation des expériences :

Température : 22°C

Pression : 1 atm (pression atmosphérique normale)

Tension : 3,1 V

Masse d'hydroxyde de potassium (KOH) : 14 g

Volume d'eau : 1 L par type d'eau

Intensité du courant : Variable selon le type d'eau (mesurée en ampères)

IV.5. Protocole expérimental :

IV.5.1. Contenu et but de l'expérience :

Un travail appliqué qui vise à mesurer le volume d'hydrogène produit par 6 types d'eau différents sur une période ne dépassant pas 4 heures afin de choisir le meilleur type d'eau adapté à la production d'un pourcentage élevé d'hydrogène et quel est l'effet de la qualité de l'eau (purity. Salinity.Salts...) Sur l'efficacité de la production d'hydrogène par électrolyse.

- Comparaison de la quantité d'hydrogène produite en utilisant une eau de qualité différente
- Analyse et détermination de la relation entre conductivité électrique et taux de production d'hydrogène
- Notez l'étendue de l'effet des impuretés (chlore Selsde calcium...) Sur l'efficacité de la production

IV.5.2. Principe de l'expérience :

Lors de l'électrolyse, la molécule d'eau se décompose en hydrogène à la cathode et en oxygène à l'anode, assurant ainsi le passage d'un courant électrique.

Lorsque nous plaçons un tube à essai de 50 ml à l'intérieur de la cellule au-dessus de l'électrode cathodique, nous remarquons la désintégration de l'eau et la montée du gaz d'hydrogène libéré vers le sommet du tube. Ainsi, nous pouvons lire la valeur du volume d'hydrogène produit toutes les heures ou pendant toute période de temps où nous voulons étudier le volume d'hydrogène produit.

IV.5. 3. Date : Ces expériences ont été menées le (6.7.8.9.12) avril 2026

IV.5.4. Chercheur : Nahoui Hana. Annou Sara. Le professeur superviseur, le professeur Salami Muhammad Hassan

IV.5.5. Matériaux et dispositifs :

➤ **Matériel :**

- Ampères mètres et volts mètres
- Source d'alimentation en courant continu
- Cellule d'électrolyse
- Tubes de mesure de gaz (listés 50ml)
- Conductimètre électrique
- Thermomètre
- Chronomètre
- Équilibre sensible
- Boîte de pesée de laboratoire
- Cuillère de laboratoire

➤ Matériaux :

- Eau trouble (difficulté)
- Eau de mer
- Eau filtrée (filtrée)
- Eau distillée
- Eau minérale (Ghadir)
- Eau du robinet (Ouargla)
- Hydroxyde de potassium (KOH) pour améliorer la conductivité

IV.5.6. Procédures de sécurité :

- Travail dans un laboratoire préparé pour l'expérience (bien ventilé car le gaz hydrogène est inflammable)
- Évitez toute étincelle près des buses de sortie de gaz
- N'utilisez pas d'électrodes qui réagissent avec le chlore (dans l'eau salée)
- Portez des gants, des masques et des tabliers.

IV.6. Étapes pratiques du travail :**IV.6 .1. Préparez chaque échantillon :**

Tout d'abord, à l'aide d'une plaque de pesée et d'une cuillère de laboratoire, nous mesurons 14g d'hydroxyde de potassium dans une balance sensible et mettons la quantité en 1L de n'importe lequel des 6 types d'eau disponibles (Eau trouble. Eau filtrée. Eau distillée. Eau minérale. Eau du robinet) Mélangez bien le mélange pour la fusion et le mixage.

Deuxièmement, pour l'eau trouble, lors de sa préparation, nous mesurons ses propriétés chimiques afin de prendre en compte les proportions et l'ampleur de leur effet sur la production

IV.6 .2. Effectuer l'électrolyse de chaque échantillon :

- 1) Versez l'échantillon dans la cellule d'électrolyse, en conservant 50 ml, afin de le verser dans le tube à essai placé à l'intérieur de la cellule au-dessus de l'électrode cathodique.
- 2) Placez le tube de mesure du gaz inversé sur l'électrode négative (pour collecter l'hydrogène).
- 3) Connexion des deux électrodes de la cellule à la source de courant (l'électrode positive à l'élévateur et l'électrode négative à la cathode)
- 4) Réglez la tension à 3,1 volts constants.
- 5) Allumez l'appareil et démarrez le chronomètre immédiatement. Commencez l'expérience et notez-le dans un carnet.
- 6) Enregistrement et consignation du volume d'hydrogène libéré dans le tube inversé, recueilli toutes les heures pendant 4 heures consécutives.
- 7) Ré-expérimentation pour chaque échantillon d'eau préparé pour l'expérience.

- 8) Bien nettoyer les appareils et nettoyer les électrodes entre les expériences avant et après le début de toute expérience.
- 9) N'oublions pas d'écrire les mesures dans un tableau qui inclut le type d'eau et le volume d'hydrogène libéré chaque heure pendant 4 heures.

Remarque :

Dans notre expérience, nous avons utilisé une cellule d'électrolyse de tension personnelle composée d'un récipient en plastique (cuvette de cellule d'analyse) à l'intérieur. Pôles cathodiques et anodiques en alliage de cuivre jaune (CuZn40Pb2) La cellule se compose également de fils électriques positifs et négatifs normaux à connecter au courant continu pour produire de l'hydrogène.

IV.7. Explication détaillée des expériences :**Expérience 1 : Eau de mer****1. Mesures fixes pour cette expérience :**

Quantité d'eau de mer : 1L

Valeur de tension : 3,1 V

Valeur d'ampérage : Lorsque la cellule était connectée au secteur, l'appareil donnait une valeur de 0,04 ampères

Température modérée : 22°C

2. Caractéristiques de l'eau de mer :

Couleur : bleu-vert.

Odeur : odeur marine caractéristique.

Goût : salé.

pH : légèrement basique ($\approx 8 - 8,3$).

Salinité : élevée (≈ 35 g/L).

Conductivité électrique : élevée.

Densité : supérieure à celle de l'eau douce.

Contient des sels minéraux dissous (NaCl, Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ ...).

Peut contenir des matières en suspension et des micro-organismes

3. Déroulement d'expérimentation :

Après avoir mesuré 14g d'hydroxyde de potassium et l'avoir placé dans 1L d'eau de mer avec un bon mélange, nous remplissons un tube à essai d'un volume de 50 ml. C'est ainsi que nous remplissons l'eau restante de l'échantillon dans la cellule d'électrolyse à l'électrode négative (cathode). Nous mettons le tube à l'envers, en prenant soin de ne pas laisser entrer d'air dans le

tube. Ensuite, nous connectons les fils de la cellule aux fils de l'ampère et du voltmètre afin de commencer l'expérience. Après plus d'une heure de l'expérience, nous remarquons que l'eau a commencé à se désintégrer et que du gaz hydrogène a été libéré au niveau de l'électrode négative dans le tube à essai inversé. Le volume d'hydrogène produit a atteint 29 ml en une heure, puis le volume a commencé à augmenter de seulement 2 ml dans la deuxième heure. Quant à la troisième heure, elle a augmenté de 1 ml, et cette augmentation est très faible. Quant à la qu 3

Le tableauIV. 1 :volume H_2 cumulé en fonction de temps sur l'eau de mer :

Le temps	Volume H_2 cumulé
1 l'heure	29ml
2 l'heure	31ml
3 l'heure	32ml
4 l'heure	32ml

Remarque : La valeur de l'ampère est passée de 0,04 à 0,06 40 minutes après le début de l'expérience, puis après une heure elle a été changée à 0,08 ampères, puis elle a été fixée jusqu'à la fin de l'expérience.

Discussion et analyse des résultats du tableau :

Comme nous l'avons déjà remarqué, la quantité d'hydrogène produite en 4 heures était de 29 ml de production dans la première heure, puis elle a diminué significativement pendant les deuxièmes et troisièmes heures, ne produisant que 1 à 2 ml, puis elle n'a jamais été produite, et cette baisse de production est due, en premier lieu, à une forte salinité. L'eau de mer a une résistance électrique plus élevée que l'eau pure, ce qui conduit à gaspiller de l'énergie sous forme de chaleur au lieu de l'utiliser pour produire de l'hydrogène. Cela est également dû à la forte teneur en chlorure. Ces ions entrent en compétition avec les molécules d'eau pour les électrodes d'électrolyse, ce qui conduit à la faible capacité de l'électrode à attirer l'oxygène nécessaire pour attirer les électrons et produire de l'hydrogène.

Expérience 2 : Eau filtrée (filtre)

1. Mesures fixes pour cette expérience :

Quantité d'eau filtrée : 1L+ (14g de KOH).

Valeur de l'ampérage : Lorsque la cellule était branchée au courant électrique, le dispositif donnait une valeur de 0,05 ampères, puis après une minute sa valeur passait à 0,03 et était fixée

Température modérée : 22°C

1. Caractéristiques de l'eau filtrée :

Couleur : incolore.

Odeur : inodore.

Qualité : bonne ou acceptable.

Teneur et matière en suspension.

Contient des traces d'eau brute.

Conductivité électrique : plus efficace (selon le type de filtration).

pH : généralement neutre ($\approx 6,5 - 7,5$).

Niveau de transparence.

Réduction des particules, du chlore et de certaines impuretés.

De plus en plus adaptée à certains usages expérimentaux.

3. Processus d'expérimentation:

Après avoir suivi le même protocole expérimental pour ce type d'eau, nous remarquons que lorsque l'eau est mélangée avec de l'hydroxyde de potassium, sa couleur est claire par rapport à l'eau de mer car il s'agit d'eau pure issue d'impuretés et de plancton, ce qui facilite la lecture du volume d'hydrogène produit. (Libéré à l'intérieur du tube inversé)

Dans la première heure, un volume d'hydrogène de 16 ml a été produit, puis il a commencé à augmenter dans la deuxième heure d'un volume de 13 ml. Quant à la troisième heure, elle a augmenté de 14 ml, et dans la dernière heure de l'expérience, elle a augmenté de 15 ml. Le volume produit en 4 heures est de 57 ml d'hydrogène libéré. L'augmentation était très logique compte tenu du type d'eau utilisé dans cette expérience.

Le tableau IV.2 : volume H_2 cumulé en fonction de temps sur l'eau filtrée (filtrée) :

Le temps	Volume H_2 cumulé
1 l'heure	16ml
2 l'heure	29ml
3 l'heure	43ml
4 l'heure	58ml

Remarque : En ce qui concerne l'ampérage, sa valeur a été modifiée à trois heures pour passer à 0,04, puis elle a été fixée. Cela est dû au mouvement. L'augmentation des interactions entre les pôles (haute conductivité)

Discussion et analyse des résultats du tableau :

Ces résultats s'expliquent par le fait qu'ils reflètent le comportement de l'eau filtrée électriquement pure, ce qui signifie que l'augmentation progressive de la production n'est pas due à une amélioration de l'efficacité de l'électrolyse, mais plutôt à un effet cumulatif de la chaleur et d'une diminution de la résistance interne de l'eau au fil du temps.

Chaque fois que nous le remarquons auparavant, dans la première heure l'eau est encore froide et la résistance. High, le courant est limité et les bulles entravent les pôles,

Donc la production est constante et faible Aux deuxième et troisième heures, la température de la buse a augmenté davantage, donc la résistance a diminué davantage, et ainsi la quantité de production a augmenté par rapport à la première heure. Quant à la quatrième heure, la production a augmenté en raison de l'augmentation de la température due à la résistance des courants. En bref, l'eau pure filtrée produit peu d'hydrogène, ce qui n'est pas causé par un manque d'eau, mais plutôt par l'excès de pureté qui empêche le courant de passer, donc la quantité d'électrons atteignant la cathode est faible, et ainsi l'hydrogène résultant diminue par rapport à l'eau de mer.

Expérience 3 : Eau trouble (dure)**1. Mesures fixes pour cette expérience :**

Quantité d'eau trouble : 1L+(14g de KOH)

Valeur de tension : 3,1 V

Valeur d'ampérage : Lorsque la cellule était connectée au secteur, l'appareil donnait une valeur de 0,04 ampères

Température modérée : 22°C

2. Propriétés physico-chimiques de cette eau

pH :4.48

Turbidité : 0,21 ppm DO

Conductivité spécifique : 5558 μ S/cm

Conductivité réelle : 5 .456mS/cm^A

Résistance spécifique : 0,0002M Ω cm

Salinité : 3,00PSU

Matières dissoutes totales : 2779 mg /L, TdS

Température de l'échantillon 24,03°C

2. . Interprétation des résultats :

Après l'avoir fait. Avec le même protocole expérimental pour ce type d'eau, on remarque que lorsque l'eau est mélangée à de l'hydroxyde de potassium, sa couleur est sombre et il est difficile de voir le volume d'hydrogène qu'elle contient. D'une part. Autre : Malgré son odeur nauséabonde, lorsque du KOH est ajouté, une odeur plus forte se dégage en raison des réactions chimiques qui se produisent à l'intérieur de l'eau.

Par heure-là première est qu'après le démarrage du procédé, l'eau produit 14 ml de gaz d'hydrogène libéré, puis après que la deuxième heure soit passée, sa valeur augmente de 12 ml. Quant à la troisième heure, sa valeur augmente de seulement 6 ml, et dans la quatrième heure, la valeur totale du volume d'hydrogène produit pendant 4 heures augmente de 4 ml. 36 ml d'hydrogène, donc en observant les résultats, nous voyons que l'augmentation au fil du temps diminue et s'affaiblit, et cela est dû à plusieurs facteurs.

➤ Le tableau IV.3. Volume H_2 cumulé en fonction de temps d'eau trouble (dure)

Le temps	Volume H_2 cumulé
1 l'heure	14ml
2 l'heure	26ml
3 l'heure	32ml
4 l'heure	36ml

 **Remarque :** En ce qui concerne l'ampère de la première heure, la valeur de l'ampère était de 0,04 ampères, mais après un certain temps, sa valeur a diminué à 0,02 puis s'est stabilisée. Cela explique la diminution du volume de production d'hydrogène au fil des heures.

3. Discussion et analyse des résultats du tableau :

Comme nous l'avons déjà remarqué, le taux de production d'hydrogène diminue au fil des heures. Dans la première heure, c'était 14 ml, puis 12 ml, puis 6 ml, jusqu'à ce qu'il n'atteigne que 4 ml dans la quatrième heure. Cela est souvent dû à plusieurs raisons. Comme il s'agit d'une eau trouble, elle contient certainement des accumulations d'ions durs sur les électrodes (calcium, magnésium). Ces ions se déposent sous forme de carbonates ou d'hydroxydes à la surface de l'électrode négative (cathode), formant une couche isolante blanche qui empêche les électrons d'atteindre l'eau, de sorte que la résistance électrique augmente et le courant diminue, provoquant ainsi une diminution du processus de production d'hydrogène.

D'autre part, avec la poursuite de l'analyse, la diminution de la conductivité électrique est faible en raison des propriétés de l'eau dure, et la valeur du pH passe également de l'acide au basique au fil du temps. Parmi les raisons qui réduisent la production figurent les bulles formées par des gaz d'hydrogène et d'oxygène susceptibles de coller à la surface de l'électrode. Surtout si elles sont

rugueuses en raison des dépôts, cela réduit la capacité effective de la réaction et entraîne une diminution de la production

Expérience 4 : Eau du robinet

1. Mesures de base pour l'expérience :

Quantité d'eau du robinet : 1 litre+(14g de KOH)

Tension : 3,1 V

Courant : Lorsque la pile a été connectée au courant électrique, l'appareil a fourni une valeur approximative de 0.03A (à compléter selon la mesure)

Température : 22 °C

Pression : 1 atm

2. Déroulement de l'expérience :

Lors de l'expérience réalisée avec de l'eau du robinet, une libération progressive d'hydrogène à l'électrode négative (cathode) et d'oxygène à l'électrode positive (anode) a été observée en début d'électrolyse, indiquant une réaction chimique au sein de la cellule électrolytique. Durant la première heure, le volume d'hydrogène produit était relativement faible (14 mL) en raison de la conductivité électrique modérée de l'eau du robinet, due à sa faible teneur en ions. Au fil du temps, le volume d'hydrogène produit a augmenté significativement : de 11 mL durant la deuxième heure, à 14 mL durant la troisième heure, puis à 10 mL durant la quatrième heure. Cette évolution reflète la progression du processus d'électrolyse, avec de légères variations du débit de production en fonction des conditions opératoires et de l'intensité du courant. De plus, le déplacement du tube a amélioré le contact entre les ions et les électrodes, augmentant ainsi l'efficacité du transfert de courant et le rendement de la réaction. Enfin, l'eau du robinet contient des sels minéraux tels que le calcium et le magnésium, qui contribuent à une meilleure conductivité électrique que l'eau pure, bien qu'elle demeure inférieure à celle des solutions alcalines concentrées. Par conséquent, le volume total d'hydrogène produit en quatre heures était d'environ 49 ml à partir d'un litre d'eau du robinet, confirmant que la qualité de l'eau joue un rôle clé dans l'efficacité de la production d'hydrogène lors de l'électrolyse.

Tableau IV 4 : volume H_2 cumulé en fonction de temps sur l'eau du robinet

le temps	Volume H_2 cumulé
1 l'heure	14 ml
2 l'heure	25 ml
3 l'heure	39 ml
4 l'heure	49ml

3. Interprétation des résultats :

Les résultats de cette expérience indiquent que le volume d'hydrogène gazeux augmente progressivement au fil du temps, passant de 14 mL la première heure à 25 mL la deuxième, puis à 39 mL la troisième, pour atteindre 49 mL la quatrième. Ceci confirme que la production d'hydrogène est directement liée au flux continu de courant électrique au sein de la cellule électrolytique. Cette augmentation s'explique par plusieurs facteurs interdépendants. La tension appliquée (3,1 V) était suffisante pour initier la dissociation des molécules d'eau, tandis que l'intensité du courant joue un rôle crucial dans la détermination de la vitesse de production, sa stabilisation au fil du temps entraînant une augmentation de la quantité de gaz formé. De plus, la conductivité électrique de l'eau du robinet, bien que modérée en raison du nombre limité d'ions, s'améliore relativement au cours de l'expérience, notamment avec l'augmentation progressive de la température induite par le courant. Ceci contribue à réduire la résistance interne de la solution, à améliorer la mobilité des ions et à accroître l'efficacité de la réaction. En revanche, la production était relativement faible durant la première heure en raison de la résistance élevée et de la faible conductivité de la solution. Elle s'est ensuite améliorée au cours des heures suivantes grâce à la stabilisation des conditions électriques et thermiques et à un meilleur contact entre les électrodes et la solution. Toutefois, cette augmentation peut ne pas être parfaitement uniforme, notamment en raison de l'accumulation de bulles à la surface des électrodes ou de la conductivité relativement limitée par rapport aux solutions riches en ions. La pression est restée constante à 1 atm et n'a pas influencé directement la variation de volume. La quantité d'eau utilisée (1 litre) était suffisante pour entretenir la réaction. Par conséquent, la variation du rendement de production d'hydrogène reflète un équilibre entre l'intensité du courant, la tension, la température, la résistance interne et les propriétés de l'eau utilisée.

Expérience 5 : Eau minérale (EL-Ghadir).

1. Mesures de base pour l'expérience :

Quantité d'eau minérale : 1 litre+ (14g de KOH)

Tension : 3,1 V

Courant : Lorsque la pile a été connectée au courant électrique, l'appareil a fourni une valeur approximative de 0,05A (à compléter selon la mesure)

Température : 22 °C

Pression : 1 atm

2. Propriétés de l'eau minérale

Calcium (Ca^{2+}) = 111 mg/L

Magnésium (Mg^{2+}) = 28 mg/L

Sodium (Na^+) = 25 mg/L

Potassium (K^+) = 3 mg/L

Chlorures (Cl^-) = 37 mg/L

Bicarbonate (HCO_3^-) = 317 mg/L

Sulfates (SO_4^{2-}) = 106 mg/L

Nitrates (NO_3^-) = 25 mg/L

Nitrites (NO_2^-) = Absent

Résidu sec à 180 °C = 700 mg/L

pH = 7,5

3. Déroulement de l'expérience :

Lors de l'électrolyse de l'eau minérale, de l'hydrogène a été observé à l'électrode négative et de l'oxygène à l'électrode positive dès le début, indiquant une réaction efficace au sein de la cellule.

L'eau minérale, plus riche en ions tels que le calcium et le magnésium, est plus conductrice que l'eau du robinet, ce qui favorise une meilleure production d'hydrogène. À la première heure, 19 mL d'hydrogène ont été produits, puis 34 mL à la deuxième heure, 48 mL à la troisième heure et enfin 57 mL à la quatrième heure, démontrant une augmentation progressive de la quantité de gaz produite.

L'élévation de température durant l'expérience a également contribué à réduire la résistance interne et à améliorer la mobilité des ions, favorisant ainsi l'électrolyse. Malgré quelques fluctuations mineures liées à des facteurs tels que l'intensité du courant ou l'accumulation de bulles, la production a globalement augmenté de façon continue.

En conclusion, l'obtention d'environ 57 mL d'hydrogène après quatre heures confirme que l'eau minérale riche en ions améliore significativement l'efficacité de l'électrolyse.

Tableau IV.5 : volume H_2 cumulé en fonction de temps sur l'eau minérale

le temps	Volume H_2 cumulé
1 l'heure	19ml
2 l'heure	34 ml
3 l'heure	48 ml
4 l'heure	57ml

Remarque : Dans l'eau minérale, malgré une concentration d'ions plus élevée, la diminution du courant de 0,05 à 0,03 en 7 minutes indique une légère diminution du flux de courant, entraînant une diminution relative du taux de production d'hydrogène au fil du temps.

3. Interprétation des résultats :

Les résultats montrent que le volume d'hydrogène gazeux augmente progressivement au fil du temps, passant de 19 mL à la première heure à 57 mL à la quatrième heure, ce qui indique une électrolyse continue et régulière au sein de la cellule.

Cette évolution est liée aux paramètres électriques utilisés lors de l'expérience, notamment la tension (V) et le courant (I). Une augmentation du courant signifie qu'un plus grand nombre d'électrons traversent la cellule au fil du temps, produisant ainsi une plus grande quantité d'hydrogène gazeux. La relation entre la tension et la résistance interne de la solution est donnée par $V = R \times I$, et par conséquent, toute variation de résistance entraîne une variation de l'intensité du courant et, de ce fait, de la quantité de gaz produite.

Quant à l'eau minérale, elle contient des sels minéraux dissous, ce qui en fait un milieu permettant une meilleure conductivité électrique que l'eau pure. Ceci contribue à stabiliser le courant au sein de la cellule, améliorant ainsi la continuité de la réaction et la production de gaz.

L'hydroxyde de potassium (KOH) joue un rôle important en tant que solution support pour l'électrolyse, car il :

Augmente la conductivité électrique de la solution.

Fournit des ions qui facilitent le transfert de charge au sein du milieu.

Permet une meilleure circulation du courant entre les électrodes sans consommation par la réaction. Ceci contribue significativement à l'augmentation de l'efficacité de la production d'hydrogène.

Expérience 6 : Eau distillé

1. Mesures de base pour l'expérience :

Quantité d'eau du robinet : 1 litre+ (14g de KOH)

Tension : 3,1 V

Courant : Lorsque la pile a été connectée au courant électrique, l'appareil a fourni une valeur approximative de 0,05 A (à compléter selon la mesure)

Température : 22 °C

Pression : 1 atm

2. Caractéristiques de l'eau distillée :

Couleur : incolore.

Odeur : inodore.

Goût : neutre.

Très pure, sans sels minéraux dissous.

Faible conductivité électrique.

pH proche de la neutralité (≈ 7).

Absence d'impuretés et de matières en suspension.

Transparence élevée.

Ne contient pratiquement pas d'ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- ...).

3. Déroulement de l'expérience :

Lors de l'expérience d'électrolyse réalisée avec de l'eau distillée, le dégagement d'hydrogène à l'électrode négative (cathode) et d'oxygène à l'électrode positive (anode) a été observé dès la mise sous tension du circuit électrique, indiquant le début de la réaction électrochimique au sein de la cellule.

Au cours de l'expérience, une augmentation progressive du volume d'hydrogène produit a été enregistrée : 16 ml la première heure, 37 ml la deuxième, 55 ml la troisième et enfin 60 ml la quatrième, reflétant la progression continue et régulière du processus d'électrolyse.

L'eau distillée est un milieu presque dépourvu de sels et d'ions, et présente donc une conductivité électrique très faible comparée à celle d'autres eaux. Ceci est dû à la rareté des ions libres capables de conduire un courant électrique dans la solution, ce qui entraîne un flux de courant relativement faible au sein de la cellule.

Néanmoins, l'application d'un potentiel électrique permet au courant de circuler en continu et à la réaction de se produire, ce qui explique la production progressive et continue de gaz hydrogène et oxygène tout au long de l'expérience.

Tableau IV.6: volume H_2 cumulé en fonction de temps sur l'eau distillé

le temps	Volume H_2 cumulé
1 l'heure	16ml
2 l'heure	37 ml
3 l'heure	55 ml
4 l'heure	60ml

Remarque : Dans l'expérience avec l'eau distillée, l'intensité du courant était faible et instable ($0,05 \rightarrow 0,03 \rightarrow 0,07 \rightarrow 0,03$), ce qui indique une faible conductivité électrique due à une faible concentration d'ions. Par conséquent, la quantité d'hydrogène produite était faible et lente.

3. Interprétation des résultats :

Les résultats montrent que le volume d'hydrogène gazeux augmente progressivement de 16 mL à 60 mL. Ceci s'explique par l'influence de plusieurs facteurs expérimentaux : le potentiel électrique (tension) fournit la force motrice nécessaire au passage du courant dans la cellule, tandis que l'intensité du courant (ampères) contrôle la quantité d'électrons qui la traversent et donc la vitesse de production d'hydrogène. De plus, l'augmentation de la température contribue à réduire la résistance et à améliorer la mobilité des ions. Par ailleurs, l'eau distillée se caractérise par une faible conductivité électrique, car elle est exempte de sels et d'ions, ce qui rend le passage du courant moins efficace. En revanche, l'ajout de KOH améliore la conductivité électrique de la solution et augmente l'efficacité du transfert de charge au sein du milieu. Ainsi, l'interaction de ces facteurs explique l'augmentation continue du volume de gaz produit au cours de l'expérience.

IV.8. Comparaison des résultats expérimentaux :

Dans ces expériences, nous avons étudié l'influence de la qualité de l'eau sur la production d'hydrogène gazeux lors de l'électrolyse. Nous avons mené six expériences avec différents types d'eau : eau distillée, eau filtrée, eau minérale, eau du robinet, eau trouble et eau de mer.

Pour chaque expérience, une cellule électrolytique a été mise en place dans des conditions quasi identiques (mêmes électrodes, même tension et même durée d'expérience). Un courant électrique a ensuite été appliqué à chaque type d'eau, et la quantité d'hydrogène gazeux produite à la cathode a été enregistrée pendant des durées identiques.

Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus avec les différents échantillons et observé une nette différence dans la quantité d'hydrogène produite selon le type d'eau. Ceci nous a permis de conclure que la composition de l'eau, et notamment sa teneur en sels et en ions, influe directement sur la vitesse et l'efficacité du processus d'électrolyse.

Le tableau IV. 7 : Suivant indique le volume d'hydrogène produit (en millilitres) pour chaque type d'eau pendant 4 heures

Type d'eau	Quantité d'hydrogène produite	Observation	Interprétation scientifique
Eau distillée	60ml	Conductivité maximale	Eau distillée (60 ml) : Offre le meilleur rendement grâce à sa grande pureté. L'ajout de KOH en fait un bon conducteur, sans dépôts ni impuretés susceptibles d'entraver la réaction.
Eau filtrée	58ml	Conductivité élevée	Eau filtrée (58 ml) : Très similaire à l'eau distillée, elle réduit les impuretés solides tout en conservant certains ions, ce qui assure des performances stables et satisfaisantes.
Eau minérale	57ml	Conductivité moyenne à élevée	Eau minérale (57 ml) : Bon conducteur grâce à ses minéraux, elle offre un rendement initial élevé. Cependant, des dépôts peuvent se former, réduisant ainsi son efficacité au fil du temps.
Eau du robinet	49ml	Conductivité moyenne	Eau du robinet (49 ml) : Performances moyennes. Elle contient des sels bénéfiques à la conductivité, mais aussi des impuretés (comme le chlore) qui provoquent corrosion et dépôts, réduisant l'efficacité.
Eau trouble	36ml	Faible conductivité	Eau trouble (36 ml) : Faible rendement dû aux impuretés et aux particules qui recouvrent les électrodes et augmentent la résistance électrique.
Eau de mer	32ml	Conductivité plus faible	Eau de mer (32 ml) : Le pire résultat est dû aux ions chlore, qui provoquent des réactions secondaires (production de chlore), entraînant la corrosion des électrodes et une réduction de la production d'hydrogène.

IV.9. Représentations graphiques des résultats expérimentaux :

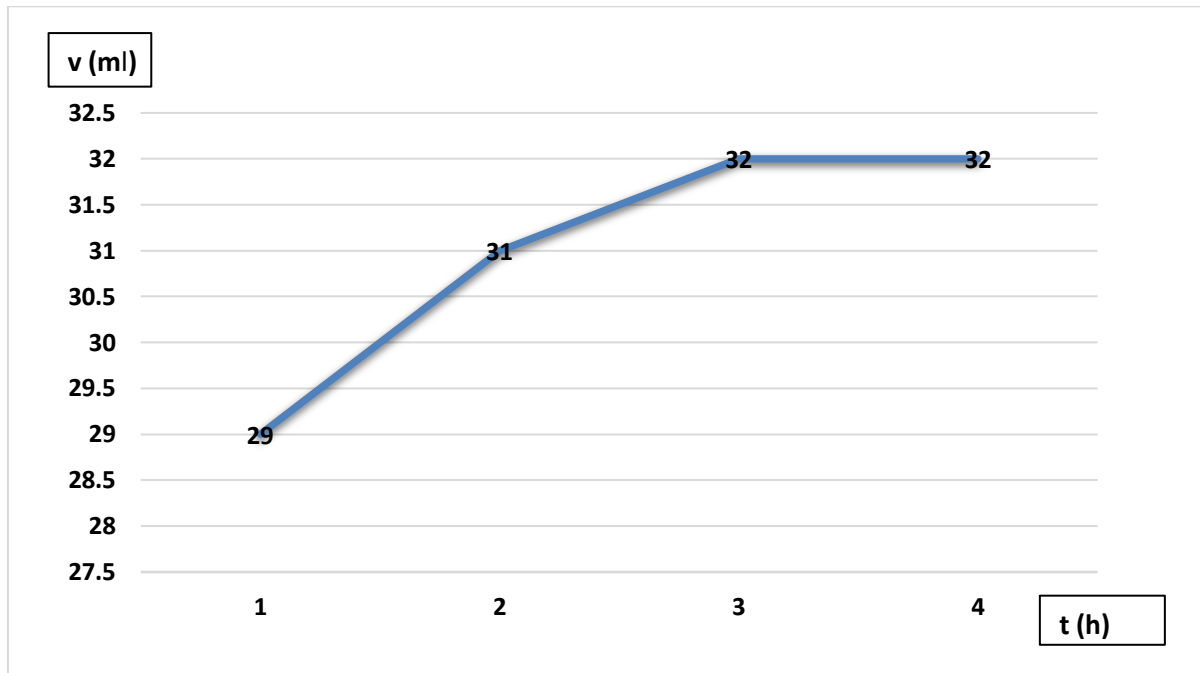


Figure IV.1 : Une courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau de mer en termes de temps

❖ Interprétation graphique :

Le graphique nous a montré la productivité de l'eau de mer en hydrogène sur une période de 4 heures. Au début, la première et la deuxième heure, il y a une augmentation rapide du volume de gaz d'hydrogène produit, puis la croissance ralentit nettement entre la deuxième et la troisième heure jusqu'à ce qu'elle atteigne le stade de saturation et s'arrête complètement, de sorte que le volume se stabilise sans augmenter. Ce dernier est causé par la réaction atteignant un état d'équilibre, ou une baisse de l'efficacité du catalyseur au milieu de l'eau de mer, ou à la fin de la substance active, comme le magnésium, qui réagit avec l'eau pour la production d'hydrogène et en raison des sels inhibiteurs abondants dans l'eau de mer.

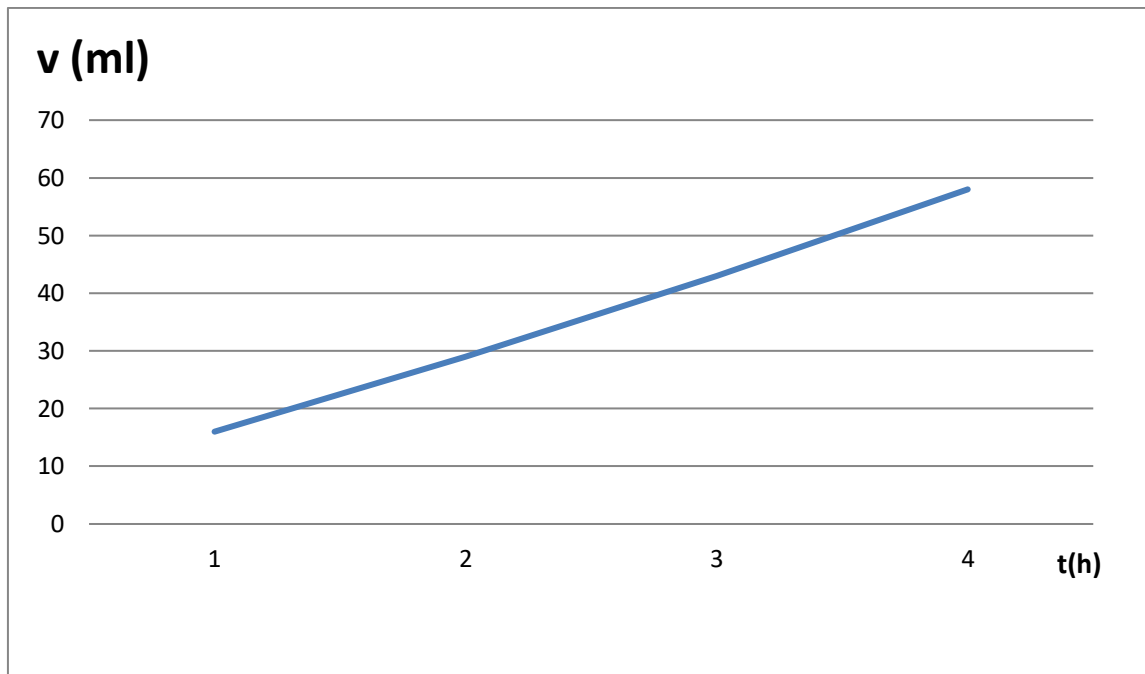


Figure IV.2 : Une courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau filtrée En termes de temps

❖ Interprétation graphique :

Le graphique nous montre le volume d'hydrogène produit à partir de l'eau filtrée en termes de temps. Nous remarquons au début de l'expérience, dans la première heure, que l'augmentation était importante par rapport à l'eau libre, donc la production est bonne. De même, pour les heures restantes, la production ne s'est pas arrêtée ou ralentie, mais a plutôt continué à augmenter. Ce comportement s'explique par le fait que l'eau filtrée est exempte de sels inhibiteurs, ce qui permet à la réaction de se poursuivre avec une grande efficacité et est complètement exempte de dépôts et de sels. Cela ne constitue pas un obstacle à la surface du catalyseur pour ralentir ou arrêter le taux de production. Au contraire, il augmente jusqu'à atteindre la plus grande quantité du volume produit, 58 ml, en 4 heures, comme l'expérience précédente nous l'a montré.

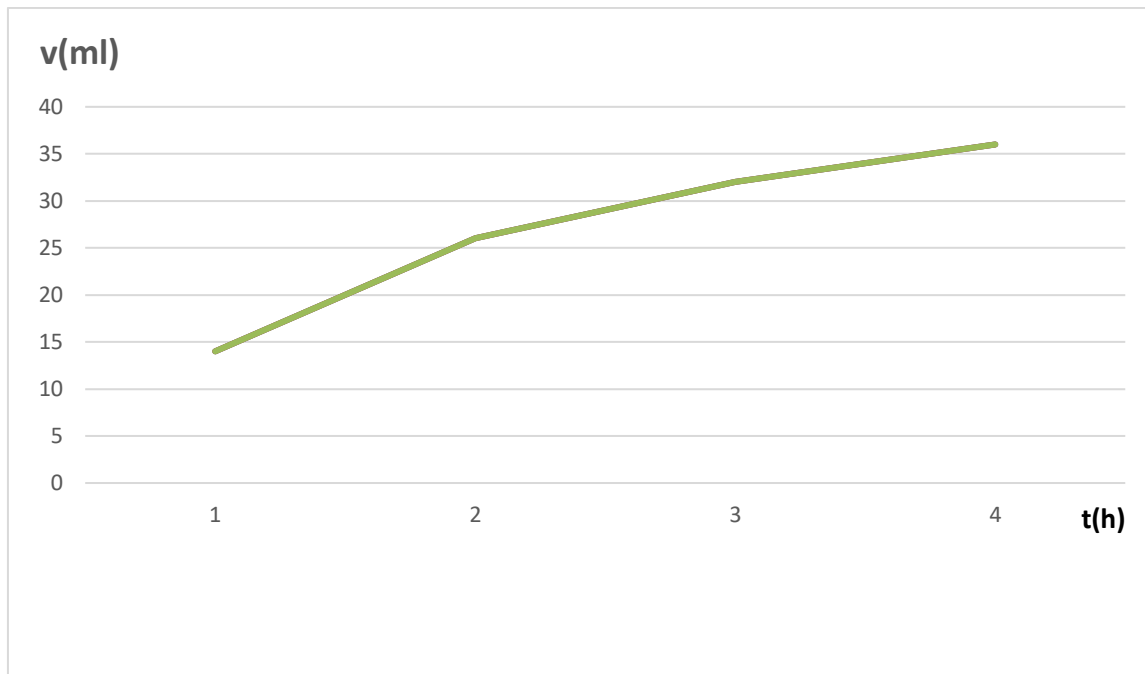


Figure IV.3 : Une courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau trouble En termes de temps

❖ Interprétation graphique :

Ce graphique représente la variation du volume d'hydrogène produit en termes de temps sur une période de 4 heures. Les résultats ont été les suivants : Au début de l'expérience, la production était très faible à 14 ml en raison de la résistance des matériaux en suspension et des ions présents dans l'eau dure, mais le volume s'est amélioré par des valeurs cumulées dans la deuxième heure à 26 ml après l'activation des électrodes car l'ampérage a augmenté pendant cette période, ce qui signifie que la conductivité s'est améliorée, mais le taux d'augmentation cumulative a commencé à ralentir dans les troisième et quatrième heures en raison du dépôt de calcium et de particules en suspension sur la surface de l'électrode.

De plus, les ions sont presque terminés pendant cette période malgré la tension constante, ce qui a rendu le processus limité par le facteur de diffusion et la contamination de surface au lieu de la tension électrique.

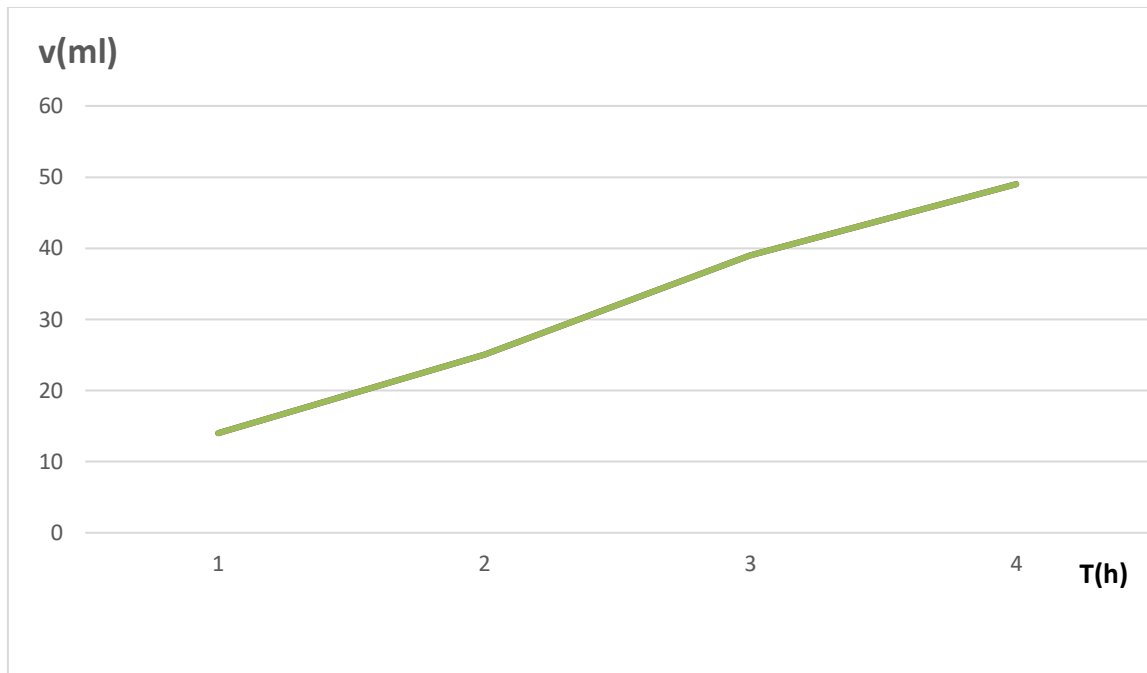


Figure IV.4 : Courbe graphique montrant la quantité de production d'hydrogène par volume d'eau du robinet En termes de temps

❖ Interprétation graphique :

Le graphique représente le volume d'hydrogène produit dans l'eau distillée sur une période de 4 heures continues et spécifie la quantité de production par heure. Alors amène-nous. Dans la première heure, la production a été un peu plus lente que prévu car l'eau distillée est semi-isolante (sa conductivité est très faible), donc la production était de 16 ml. Il a également fallu beaucoup de temps pour que les ions OH^- et H^+ se forment, ce qui est suffisant pour que les molécules d'eau se désintègrent sous l'influence d'une tension constante. Ensuite, le volume cumulé s'est accéléré à 37 ml, puis 5 ml au deuxième et troisième heures en raison de l'amélioration de la conductivité électrique due à l'augmentation des ions. Ensuite, le volume cumulé a augmenté dans la quatrième heure à 60 ml+ (ce qui signifie plus de 60 ml). En effet, la connexion n'était pas obstruée par des impuretés ou des matériaux déposés sur les électrodes.

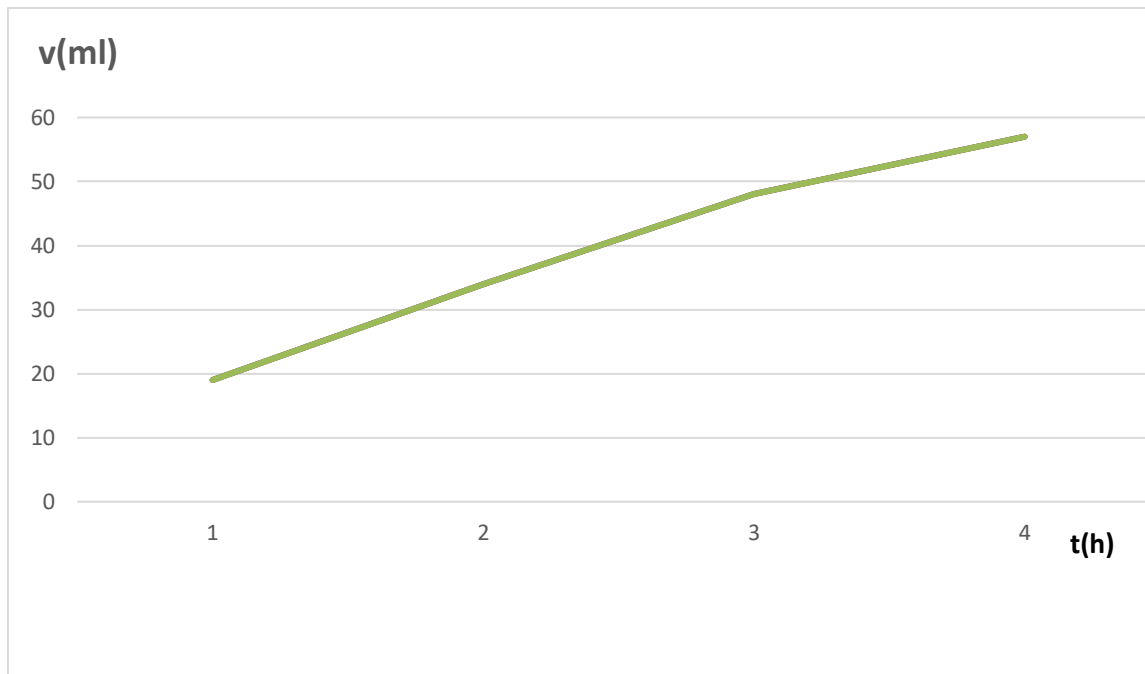


Figure IV.5 : Une courbe graphique montrant la quantité d'hydrogène produite en volume à partir d'eau minérale en termes de temps

❖ Interprétation graphique :

Le graphique représente le volume de production d'hydrogène de l'eau minérale de Ghadir en termes de temps, durant 4 heures. Toutes les heures, nous enregistrons les résultats de l'augmentation de la production. Dans la première heure, nous remarquons que l'eau minérale contient des ions ($\text{Ca}^{+2}.\text{Mg}^{+2}.\text{HCO}_3^-$). Ces ions conduisent à une bonne conductivité initiale, donc la production commence avec 19 ml d'hydrogène avec un courant de 0,05 ampères, formant des dépôts isolants de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et CaCO_3 sur la surface de l'électrode. Cette contamination entraîne une augmentation de la résistance électrique et une diminution du courant à 0,03 ampères, ce qui ralentit la production. Le volume cumulé d'hydrogène dans les deuxièmes et troisièmes heures est de 34 ml et 48 ml dans la quatrième heure. En raison des bulles de H_2 , les dépôts se séparent, le courant passe donc à 0,04 ampères et la production cumulée atteint 57 ml au cours de la dernière heure.

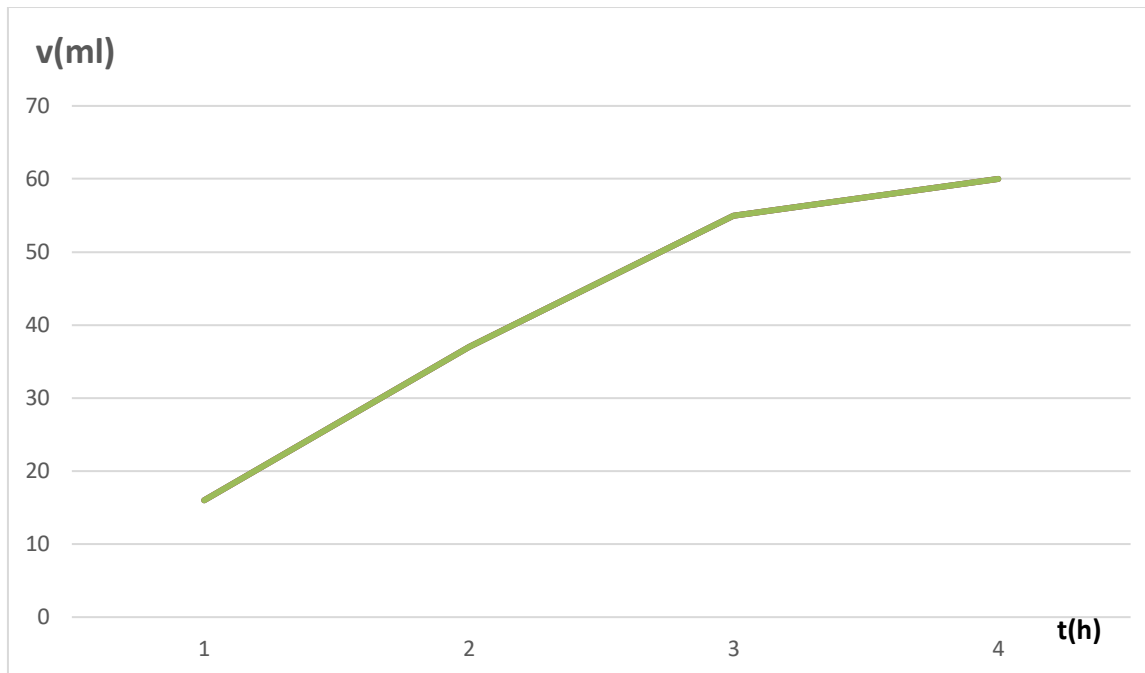


Figure IV.6 : Une courbe graphique montrant la quantité d'hydrogène produite à partir de l'eau distillée en termes de temps

❖ Interprétation graphique :

La courbe de production d'hydrogène pour l'eau du robinet (Ouargla) peut s'expliquer en termes de temps comme le résultat d'une compétition continue entre deux facteurs : La conductivité s'améliore en raison des ions présents et l'efficacité de l'électrode se détériore en raison des sédiments et des matériaux en suspension présents dans l'eau. Au début de l'expérience, 5 ml d'hydrogène ont été produits malgré la forte résistance causée par la turbidité de l'eau et le manque d'ions libres près des électrodes. Au fil du temps, les particules en suspension se déposent ou flottent sous l'effet des bulles de gaz, ce qui ouvre de meilleurs canaux pour le passage des ions. La production cumulative d'hydrogène s'améliore à 25 ml et 39 ml dans les deuxièmes et troisièmes heures, mais à la quatrième heure le facteur d'inhibition commence à prévaloir (la couche de carbonates et d'hydroxydes de calcium et de magnésium devient suffisamment épaisse pour isoler certaines parties de la cathode. D'autre part, les solides organiques peuvent s'oxyder sur l'anode et précipiter, ce qui limite l'accès de l'eau à la surface de réaction. Cette concurrence explique pourquoi la production augmente constamment, mais à un rythme décroissant (le volume total cumulé par quatre heures est de 49 ml)

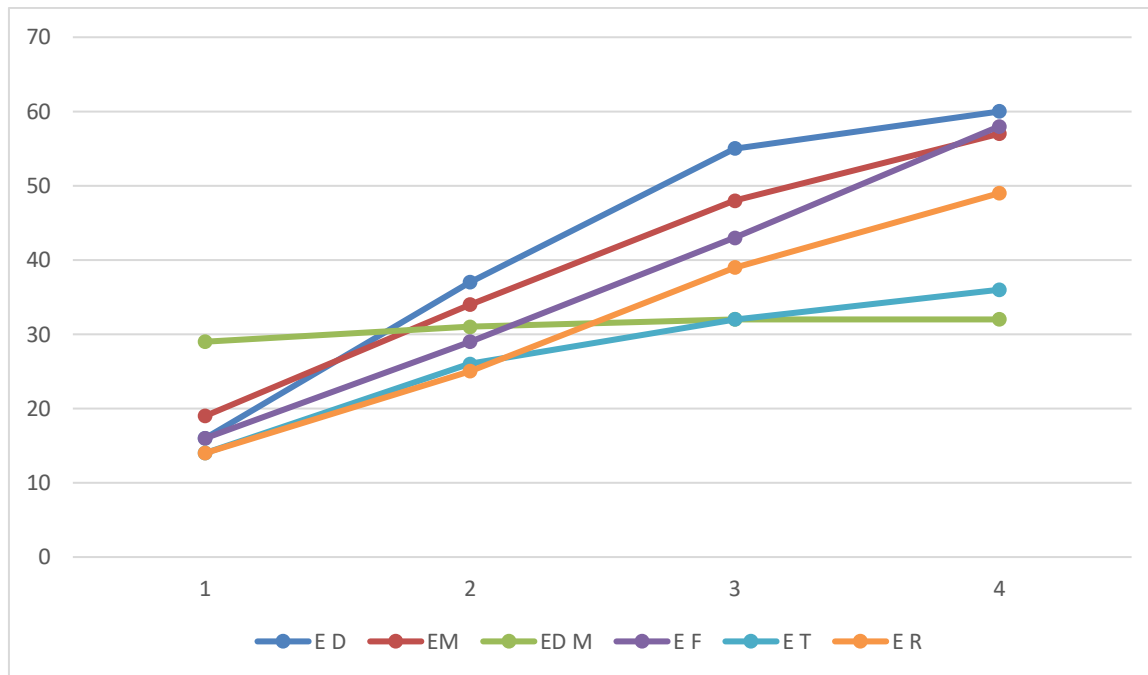


Figure IV.7 : Une courbe graphique pour comparer le volume d'un gaz avec différents types d'eau.

❖ Interprétation graphique :

Un graphique montrant la quantité de production d'hydrogène pour chaque type d'eau utilisé dans les expériences afin de distinguer et différencier l'eau la meilleure et la plus optimale à

partir de laquelle la production d'hydrogène la plus pure et la meilleure peut être extraite.

Tableau IV.8: des symboles de la courbe graphique

Le symbole	le nom
ED	Eau distillée
EM	Eau minérale
EDM	Eau de mer
EF	Eau filtrée
ET	Eau trouble
ER	Eau du robinet

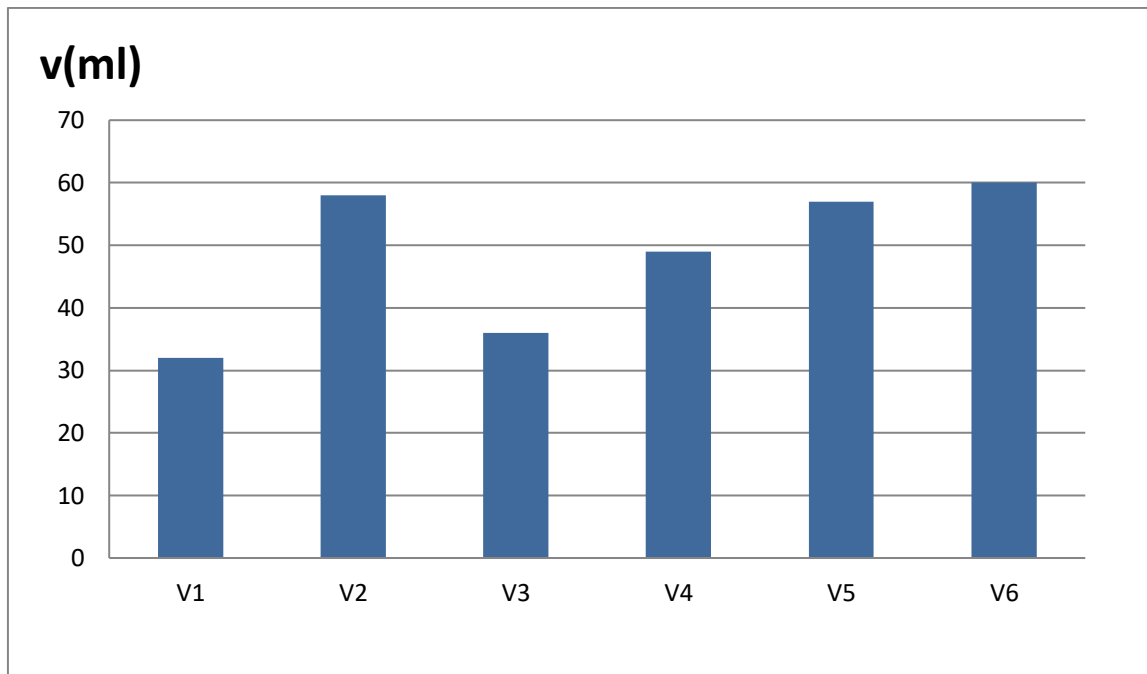


Figure IV.8: barres comparant le volume de gaz avec différents types d'eau.

❖ Interprétation graphique :

Colonnes graphiques représentant la quantité de production d'hydrogène par type d'eau donné (6 types) afin d'observer la différence de production et de choisir le type le meilleur et le plus optimal à partir duquel la plus grande quantité possible d'hydrogène peut être extraite.

Tableau IV.10 : des symboles pour les graphiques à barres

Le symbole	le nom
V1	Eau de mer
V2	Eau filtrée
V3	Eau trouble
V4	Eau du robinet
V5	Eau minérale
V6	Eau distillée

IV. 10. Conclusion :

La production d'hydrogène par électrolyse est fortement influencée par la nature des ions dissous et leurs réactions secondaires. À travers les résultats des expériences en 4 heures pour chaque expérience, nous avons remarqué que l'eau distillée a la production la plus élevée de 60 ml et augmente, suivie par l'eau filtrée et minérale (la matière première), tandis que d'autre part, l'eau de mer et l'eau dure ont une production plus faible. Cela est dû à la forte concentration de chlorure dans l'eau d'évaporation, car elle conduit à son oxydation, produisant du chlore gazeux au lieu d'oxygène, ce qui consomme beaucoup de courant électrique et réduit la production d'hydrogène. Quant à l'eau dure, la raison de sa faible production d'hydrogène est les dépôts de calcium et de magnésium à la surface de la cathode. Ici, la résistance augmente et la fatigue diminue. D'autre part, avec l'absence d'ions de courant, toute l'énergie électrique a été consommée pour décomposer directement les molécules d'eau distillée et filtrée et réduire l'eau en hydrogène, surtout lorsque la tension est constante, comme le montrent les résultats expérimentaux. Ce que ces résultats confirment, c'est que l'efficacité électrochimique ne signifie pas seulement une conductivité élevée, mais aussi la transition vers la réaction requise, et non uniquement sur le volume du courant. Nous notons également que la production d'hydrogène la plus pure est calculée à partir de l'eau avec le moins d'impuretés, avec l'ajout de KOH pour améliorer la conductivité sans interférence.

Chapitre V : partie calcul

Chapitre V : partie calcul

V, 1 Introduction :

L'électrolyse de l'eau est l'une des applications les plus importantes de l'électrochimie. Elle permet d'étudier le transfert de charges électriques et leur transformation en réactions chimiques produisant des gaz, notamment de l'hydrogène. Ce processus repose sur un ensemble de lois fondamentales reliant l'intensité du courant électrique, le temps et la quantité de substance formée.

Dans cette section, nous calculerons la quantité d'électricité traversant le circuit à partir de l'intensité du courant et du temps, puis nous déterminerons la quantité d'hydrogène produite grâce à la constante de Faraday, qui est liée au nombre d'Avogadro et à la charge de l'électron. Nous calculerons également le volume théorique du gaz dans les conditions normales et le comparerons au volume expérimental obtenu, après correction de l'effet de la température.

Ces calculs visent à évaluer l'efficacité de l'expérience et la cohérence des résultats expérimentaux avec les valeurs théoriques, permettant ainsi de déterminer la précision de l'expérience et d'analyser les facteurs qui l'influencent.

V,2 Définition des symboles et éléments utilisés dans les calculs :

(Courant électrique) I : Quantité de charge électrique traversant le circuit par unité de temps, mesurée en ampères (A).

(Temps) t : Durée du courant électrique, mesurée en secondes (s).

(Quantité d'électricité) Q : Représente la charge électrique totale traversant le circuit, calculée à l'aide de la relation suivante : $Q = I \times t$

(Constante de Faraday) F : Représente la charge d'une mole d'électrons, calculée à partir du nombre d'Avogadro et de la charge élémentaire : $F = 96368 \text{ C/mol}$

(Nombre d'Avogadro) N_A : Nombre de particules (atomes, molécules ou électrons) dans une mole de substance, et sa valeur est : $N_A = 6 \cdot 023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Charge de l'électron e^- : La charge d'un électron. Elle est égale à : $e^- = 1 \cdot 6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Volume théorique V_{Th} : Volume de dihydrogène calculé mathématiquement dans les conditions normales.

Volume appliqué V_{exp} : Volume de dihydrogène mesuré expérimentalement.

Volume molaire V_m : Volume d'une mole de gaz dans les conditions normales, égal à : $22,41 \text{ l/mol}$

Température absolue T : Mesurée en kelvins (K), calculée à l'aide de la relation :

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

Rendement η : Rapport du rendement expérimental au rendement théorique, calculé à l'aide de la

relation : $\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100$

La loi des gaz parfaits, également appelée équation des gaz parfaits, s'écrit :

$$PV = nRT$$

Légende des symboles :

P : Pression (Pa)

V : Volume (m^3)

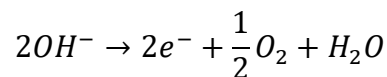
A : Quantité de matière (mol)

I : Constante des gaz parfaits

T : Température (K)

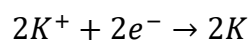
V.3 Mécanisme des réactions aux électrodes (anode et cathode) lors de la production d'hydrogène gazeux :

À l'anode (oxydation) :

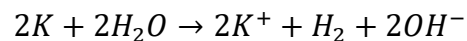


À la cathode (réduction) :

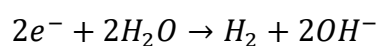
Tentative initiale :



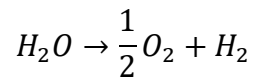
Réaction correcte :



Équation globale :



Solutions :



V.4 Calcul des résultats des expériences :

Première : eau du robinet

Calcul de la consommation d'électricité

Intensité du courant : $I = 0.03 \text{ A}$

Durée : 4 heures = 14400 s

$$Q = I \times t = 0.03 \times 14400 = 432 \text{Cb}$$

Volume molaire dans les conditions normales

$$V_m = 22.4 \text{ l/mol}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 0^\circ\text{C}$$

Comme $96368 \text{Cb} \rightarrow \frac{1}{2}H_2 \text{ mol} :$

$$96368 \text{Cb} \rightarrow \frac{22.4}{2} L$$

$$96368 \text{Cb} \rightarrow 11.2 L$$

Concrètement et scientifiquement, le volume H_2 sur quatre heures est de 49 millilitres et la température est de 22°C degrés Celsius.

Conversion de la taille à la spécification standard

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \rightarrow \frac{273.15}{V_1} = \frac{295.15}{49} \rightarrow V_1 = 45.35 \text{ ml}$$

Théorie de l'électricité

$$96368 \text{Cb} \rightarrow 11.2 L$$

$432Cb \rightarrow ?$

$$\frac{11.2 \times 10^3 \times 432}{96368} = 50.2 \text{ ml}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100 \rightarrow \frac{45.35}{50.2} \times 100 \rightarrow 90.33\%$$

$$\eta = 90.33\%$$

Deuxième : Eau minérale (EL-Ghadir).

Calcul de la consommation d'électricité

Intensité du courant : $I = 0.04 \text{ A}$

Durée : 4 heures = 14400 s

$$Q = I \times t = 0.04 \times 14400 = 576 \text{ cb}$$

Volume molaire dans les conditions normales

$$V_m = 22.4 \text{ l/mol}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 0^\circ\text{C}$$

Comme : $96368 \text{ Cb} \rightarrow \frac{1}{2} H_2 \text{ mol}$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow \frac{22.4}{2} L$$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 L$$

Concrètement et scientifiquement, le volume H_2 sur quatre heures est de 57 millilitres et la température est de 22°C degrés Celsius.

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \rightarrow \frac{273.15}{V_1} = \frac{295.15}{57} \rightarrow V_1 = 52,75 \text{ ml}$$

Théorie de l'électricité

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

$$576 \text{ Cb} \rightarrow ?$$

$$\frac{11.2 \times 10^3 \times 576}{96368} = 66,94 \text{ ml}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100 \rightarrow \frac{52,75}{66,94} \times 100 \rightarrow 78,80\%$$

$$\eta = 78,80\%$$

Troisième : Eau distillé

Calcul de la consommation d'électricité

$$\text{Intensité du courant : } I = 0.045 \text{ A}$$

$$\text{Durée : } 3 \text{ heures} = 10800 \text{ s}$$

$$Q = I \times t = 0.045 \times 10800 = 486 \text{ Cb}$$

Volume molaire dans les conditions normales

$$V_m = 22.4 \text{ l/mol}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 0^\circ\text{C}$$

$$\text{Comme : } 96368 \text{ Cb} \rightarrow \frac{1}{2} \text{ H}_2 \text{ mol}$$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow \frac{22.4}{2} \text{ L}$$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

Concrètement et scientifiquement, le volume H_2 sur quatre heures est de 60 millilitres et la température est de 22°C degrés Celsius.

Conversion de la taille à la spécification standard

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \rightarrow \frac{273.15}{V_1} = \frac{295.15}{60} \rightarrow V_1 = 55,52 \text{ ml}$$

Théorie de l'électricité

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

$$486 \text{ Cb} \rightarrow ?$$

$$\frac{11.2 \times 10^3 \times 486}{96368} = 56,48 \text{ ml}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100 \rightarrow \frac{55,52}{56,48} \times 100 \rightarrow 98,30\%$$

$$\eta = 98,30\%$$

Quatrièmement : l'eau de mer :

Calcul de la consommation d'électricité :

Intensité du courant : $I=0.04 \text{ A}$

Durée : 4 heures = 14400 s

$$Q=I \times t=0.04 \times 14400 = 576 \text{ Cb}$$

Volume molaire dans les conditions normales :

$$V_m=22.4 \text{ l/mol}$$

$$P=1 \text{ atm}$$

$$T=0^{\circ}\text{C}$$

Comme : $96368 \text{ Cb} \rightarrow \frac{1}{2} H_2 \text{ mol}$

$96368 \text{ Cb} \rightarrow 22.4/2 \text{ L}$

$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$

Concrètement et scientifiquement, le volume H_2 sur quatre heures est de 32 millilitres et la température est de 22°C degrés Celsius.

Conversion de la taille à la spécification standard

$$P_1=P_2$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \rightarrow \frac{273.15}{V_1} = \frac{295.15}{32} \rightarrow V_1 = 29.61 \text{ ml}$$

Théorie de l'électricité

$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$

$576 \text{ Cb} \rightarrow ?$

$$\frac{11.2 \times 10^3 \times 576}{96368} = 66.94 \text{ ml}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100 \rightarrow \frac{29.61}{66.94} \times 100 \rightarrow 44.23\%$$

$$\eta = 44.23\%$$

Cinquièmement : Eau filtrée

Calcul de la consommation d'électricité :

Intensité du courant : $I=0.04\text{A}$

Durée : 4 heures = 14400 s

$$Q = I \times t = 0.04 \times 14400 = 576 \text{ Cb}$$

Volume molaire dans les conditions normales :

$$V_m = 22.4 \text{ l/mol}$$

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 0^\circ\text{C}$$

$$\text{Comme : } 96368 \text{ Cb} \rightarrow \frac{1}{2} H_2 \text{ mol}$$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 22.4/2 \text{ L}$$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

Concrètement et scientifiquement, le volume H_2 sur quatre heures est de 57 millilitres et la température est de 22°C degrés Celsius.

Conversion de la taille à la spécification standard

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \rightarrow \frac{273.15}{V_1} = \frac{295.15}{57} \rightarrow V_1 = 52.75 \text{ ml}$$

Théorie de l'électricité :

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

$$576 \text{ Cb} \rightarrow ?$$

$$\frac{11.2 \times 10^3 \times 576}{96368} = 66.94 \text{ ml}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100 \rightarrow \frac{52.75}{66.94} \times 100 \rightarrow 78.80\%$$

$$\eta = 78.80\%$$

Sixième : Eau trouble et dure :**Calcul de la consommation d'électricité :**

Intensité du courant : $I=0.04\text{A}$

Durée : 4 heures = 14400 s

$$Q=I \times t=0.04 \times 14400 = 576\text{Cb}$$

Volume molaire dans les conditions normales :

$$V_m=22.4 \text{ l/mol}$$

$$P=1\text{atm}$$

$$T=0^\circ\text{C}$$

Comme : $96368 \text{ Cb} \rightarrow 1/2 \text{ H}_2 \text{ mol}$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 22.4/2\text{L}$$

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

Concrètement et scientifiquement, le volume H_2 sur quatre heures est de 36 millilitres et la température est de 22°C degrés Celsius.

Conversion de la taille à la spécification standard

$$P_1=P_2$$

$$\frac{nRT_1}{V_1} = \frac{nRT_2}{V_2}$$

$$\frac{T_1}{V_1} = \frac{T_2}{V_2} \rightarrow \frac{273.15}{V_1} = \frac{295.15}{36} \rightarrow V_1 = 33.31 \text{ ml}$$

Théorie de l'électricité :

$$96368 \text{ Cb} \rightarrow 11.2 \text{ L}$$

$$576\text{Cb} \rightarrow ?$$

$$\frac{11.2 \times 10^3 \times 576}{96368} = 66.94 \text{ ml}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{V_{exp}}{V_{Th}} \times 100 \rightarrow \frac{33.31}{66.96} \times 100 \rightarrow 49.76$$

$$\eta = 49.76 \%$$

Le tableau.1.V. Analyse et comparaison du rendement en termes théorique et appliquée :

type d'eau	Volume d'hydrogène théorique	Volume réel d'hydrogène	Électricité théorique	rendement	l'analyse et la comparaison
eau du robinet	45.35	50.02	432	90.33	Volume théorique 45.35 / réel 50.02 → écart +4.67. Rendement 90.33% : bon car l'eau contient peu de sels. Consommation 432 : faible grâce à une ébullition rapide.
Eau minérale	52.75	66.94	576	78.80	Volume théorique 52.75 / réel 66.94 → écart +14.19. Rendement 78.80% : plus faible à cause des minéraux qui augmentent le point d'ébullition. Consommation 576 : plus élevée.
Eau distillée	55.52	56.48	486	98.30	Volume théorique 55.52 / réel 56.48 → écart +0.96 seulement. Rendement 98.30% : excellent car l'eau est presque pure, elle bout vite sans dépôts. Consommation 486 : raisonnable.
eau de mer	29.61	66.94	576	44.23	Volume théorique 29.61 / réel 66.94 → écart très grand +37.33. Rendement très faible 44.23% : à cause de la salinité très élevée qui retarde l'ébullition. Consommation 576 : élevée pour un faible rendement
Eau filtrée	52.75	66.94	576	78.80	Mêmes chiffres que l'eau minérale (52.75→66.94, rendement 78.80%, électricité 576). Interprétation : la filtration a éliminé certaines impuretés mais a laissé une quantité de sels similaire à l'eau minérale.
Eau dure et turbide	33.31	66.94	576	49.76	Volume théorique 33.31 / réel 66.94 → écart +33.63. Rendement 49.76% : légèrement meilleur que l'eau de mer. Interprétation : le trouble (matières en suspension) affecte le transfert de chaleur mais moins que la salinité.

V. 5. Conclusion :

Nous concluons de ce tableau qu'une eau de meilleure qualité peut générer la plus grande production d'hydrogène et l'électricité la moins utilisée consommée.

Tout d'abord, l'eau distillée a un rendement très élevé de 98,30 % et une faible consommation d'électricité de seulement 486 cb.

Puis vient une deuxième. L'eau du robinet à 90,33 %, qui consomme le moins d'énergie électrique, seulement 432 cb

Troisièmement, l'eau filtrée et l'eau minérale ont un rendement de 78,30 %, tandis que la consommation d'énergie est de 576 cb, et ici l'énergie utilisée a augmenté.

Le dernier est l'eau trouble, qui a un rendement de 49,76% et l'eau de mer, qui a un rendement de 44,23%, ce qui représente un rendement inférieur et la dernière production, c'est-à-dire qu'elle n'est pas adaptée à la production d'hydrogène et consomme le plus d'énergie électrique pour la production 576 cb.

Conclusion générale

Conclusion générale :

À la lumière des analyses présentées dans cette étude, il est possible d'affirmer que l'hydrogène est un élément central de la transition énergétique mondiale. Vecteur énergétique propre et efficace, il contribue à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à limiter les émissions polluantes. Ce travail a permis d'explorer en profondeur divers aspects théoriques et appliqués liés à cet élément, depuis ses propriétés physico-chimiques jusqu'à son rôle croissant dans les applications industrielles et énergétiques, en passant par différentes méthodes de production conventionnelles et modernes.

L'étude a démontré que les méthodes conventionnelles de production d'hydrogène, malgré leur rentabilité, restent associées à la production de quantités importantes de gaz à effet de serre, ce qui souligne la nécessité de développer des alternatives plus durables. Dans ce contexte, l'électrolyse de l'eau apparaît comme une solution prometteuse, notamment lorsqu'elle est combinée à des sources d'énergie renouvelables, car elle permet de produire de l'hydrogène propre sans émissions polluantes. Différents types de cellules d'électrolyse, comme les cellules alcalines et les cellules à membrane échangeuse de protons (PEM), ont également été abordés, en mettant en lumière les caractéristiques et les applications de chaque type. L'analyse du principe de l'électrolyse a révélé que l'efficacité de ce procédé dépend de plusieurs facteurs clés, notamment la température, la pression, la distance entre les électrodes et le type d'électrolyte utilisé. Dans ce contexte, le rôle important de l'hydroxyde de potassium (KOH) est apparu comme un électrolyte efficace qui contribue à améliorer la conductivité électrique de la solution en augmentant la concentration d'ions libres. Ceci facilite la circulation du courant électrique au sein de la cellule et conduit à une production d'hydrogène plus efficace. De plus, le choix de matériaux d'électrode appropriés et la conception optimisée de la cellule sont essentiels pour améliorer les performances et minimiser les pertes d'énergie.

D'un point de vue pratique, une série d'expériences a été menée sur différents types d'eau, notamment l'eau de mer, l'eau distillée, l'eau minérale, l'eau du robinet, l'eau filtrée et l'eau trouble. Les résultats ont montré des différences significatives dans la quantité d'hydrogène produite. Les eaux riches en sels et en ions, comme l'eau de mer, ont présenté une conductivité électrique plus élevée, ce qui contribue à une meilleure efficacité d'électrolyse et à une production de gaz accrue. En revanche, l'eau pure, et notamment l'eau distillée, a présenté une faible efficacité en raison de son manque d'ions nécessaires à la transmission du courant électrique. Ceci souligne l'importance de l'ajout d'un électrolyte tel que la potasse (KOH) pour améliorer ses performances.

L'étude a également confirmé que la qualité de l'eau, en termes de pH, de salinité, de turbidité et de concentration ionique, influe directement sur l'efficacité du procédé et la stabilité de la cellule électrolytique. Par conséquent, le contrôle de ces propriétés et le traitement de l'eau avant utilisation sont essentiels pour garantir des performances optimales, en particulier dans les applications industrielles exigeant une production d'hydrogène continue et efficace.

Conclusion générale

Malgré ces résultats encourageants, plusieurs défis freinent encore l'adoption généralisée de l'hydrogène comme source d'énergie primaire. Parmi ceux-ci figurent les coûts de production élevés, les difficultés de stockage et de transport liées à ses propriétés physiques, ainsi que les exigences de sécurité dues à sa forte inflammabilité. De plus, le développement des infrastructures nécessaires à son utilisation à grande échelle requiert des investissements importants et des efforts de recherche continus.

En conséquence, l'avenir de l'hydrogène repose principalement sur les progrès réalisés dans ses technologies de production, notamment celles basées sur des sources d'énergie renouvelables, ainsi que sur l'amélioration de leur efficacité et la réduction de leurs coûts. De plus, le renforcement de la recherche scientifique dans ce domaine contribuera à trouver des solutions novatrices aux défis actuels et ouvrira de nouvelles perspectives pour l'utilisation de cette ressource énergétique dans divers secteurs.

En conclusion, on peut affirmer que l'hydrogène n'est pas seulement une source d'énergie alternative, mais un pilier fondamental de la construction d'un système énergétique mondial durable, fondé sur l'innovation et l'intégration de diverses sources d'énergie propre. Il représente ainsi un enjeu majeur pour l'avenir, permettant de concilier développement économique et préservation de l'environnement.

Références bibliographiques

❖ Références bibliographiques :

- [1]: RAACHE, Mohamed Nasreddine. Utilisation des nano-fluides dans le procédé de la production de l'hydrogène. Thèse de Doctorat LMD en Génie des Procédés, spécialité Procédés et systèmes industriels, Faculté des Sciences Appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2021. P 7-17
- [2]: Boukhabza, Khadija et Chaouch, Douaa. Contribution à la production d'hydrogène renouvelable dans le secteur industriel. Mémoire de master en génie des procédés, département des industries pétrochimiques, spécialisation génie pétrochimique, faculté des sciences appliquées, université Kasdi Merbah de Ouargla, Algérie, soutenu le 15 juin 2023, année universitaire 2022/2023. P 3 -13
- [3] : Jamal, Tajeh Eddine. Étude sur l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie alternative. Mémoire de master en sciences des matériaux, département de physique, spécialisation physique de l'énergie et énergies renouvelables, faculté de mathématiques et de sciences des matériaux, université Kasdi Merbah de Ouargla, Algérie, soutenu le 04/06/2018, année universitaire 2017/2018. P 5 -25
- [4]: MARMAGNE, Nicolas. H2 : ou comment transformer l'eau en or. XO Investîmes, publié le 01 juillet 2021. Disponible sur : [Allnews](https://www.allnews.ch/content/points-de-vue/h2-ou-comment-transformer-leau-en-or?utm_source=chatgpt.com). Consulté le 19 mai 2026.
- [5]: Wuhan Air Gas Electronic Materials Enterprise Co., Ltd. Hydrogène gazeux 5N et 6N (99,999 % et 99,9999 %), bouteille 47 L / 6,8 m³, H₂ gaz hydrogène de haute pureté. Disponible sur : https://french.alibaba.com?utm_source=chatgpt.com. Consulté le 19 mai 2026.
- [6]: Mémoire de maîtrise en physique de l'énergie et énergies renouvelables intitulé « Étude thermodynamique et électrochimique des piles à combustible à hydrogène (PEMF) », 2017-2018, préparé par l'étudiante Gayâ Saad Ramzi
- [7] : Mémoire de master en physique de l'énergie et énergies renouvelables intitulé « Étude expérimentale de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire via la remontée d'eau à la surface de la Terre dans la ville de Ouargla, 2019-2020 », réalisé par les étudiantes Salwa Boualati et Bouchra Lagougui.
- [8] : The Electrolysés of water (Prouesses ana Applications) by Victor NGELHARDT
- [9] : livre (chemistry : The Central Science)Les quatorzième et quinzième éditions
Le chapitre(Electrochimistry)
- [10] : livre (Electrochimistry) Chapitre 16. Électrolyse. Préparé par Omar bin Abdullah Al-Hazazi

Références bibliographiques

- [11] : Mémoire de maîtrise, Université d'El Oued, 2017-2018. Intitulé « Une étude de la nature de l'eau d'El Oued dans l'électrolyse », présenté par les étudiants Moumen Bekouche, Mohamed Khamis et Doudi Taha
- [12] : Mémoire de master, spécialisé en physique des énergies et énergies renouvelables, intitulé : Une étude expérimentale de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire par les méthodes de l'eau remontant à la surface de la Terre dans la ville de Ouargla (Chute) au cours de l'année 2019/2020, pp. 17_18_19_20.
- [13] : Mémoire de maîtrise en chimie, spécialisation en chimie organique, intitulé « Analyse physicochimique de l'eau du robinet (El Ouadi) et des eaux minérales commerciales, et comparaison des résultats avec les normes internationales », préparé par l'étudiante Souad Wafaa, 2017-2018.
- [14] : <https://share.google/DJ3oPCXQxTGVJRXFg>
- [15] : <https://share.google/pLZD5XQRwsQchLHG9>
- [16] : <https://share.google/3ULhO10mu4D9bTZ7k>
- [17] : <https://share.google/ZJLD98V1fCn8ia0ye>
- [18] : <https://share.google/ZCXeLZDSZFMovsvZD>
- [19] : <https://share.google/LXLgYH5Mbj5fcz1ZK>
- [20] : <https://share.google/hSwyJVE5uE2gxVBpm>
- [21] : <https://share.google/doc8PCsQfGJzXSmdL>
- [22] : <https://share.google/sGuMwEqJtjwhiwHbZ>
- [23] : https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEik3oeLaSfn6mUBweuyTS_e7mXeCrhRWT8pGWGScw2iyR7KLfvouNCSdUaYC-e7fsr36I0OeEVasQWRPSaxbukY2i2Xvo0XHH0_A9MdbIVrmD45e_xwzZydJKWvuZ8EKID4uN_a99TVYBq0/s1600/22.jpg
- [24] : <https://share.google/aOX5dxgBmXaMbQY5R>
- [25] : <https://share.google/I4TV98zZP11p1TnZ9>
- [26] : <https://share.google/d7FJvWrBG3pCjeUup>
- [27] : <https://share.google/45XdWErhPS55I8Mju>
- [28] : <https://share.google/RLId9QMVmiJtesLJj>

[29]:Amjadal El Khira, Belhout Sana Sakiina, Mémoire de fin d'études de Master académique en sciences de la matière, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Matière, intitulé : Analyse de l'électrolyse de l'eau utilisant l'énergie solaire, Université Mohamed Boudiaf – M'Sila, année universitaire 2021/2022. Pag (3.4 .5.8)

[30] : Note de remise des diplômes pour un diplôme d'ingénieur du gouvernement intitulé Production d'hydrogène à l'aide de systèmes optiques, préparée par les étudiants de Souad KHAZEN et Fatiha GUITOUBI en 2005/2006