

Université Kasdi Merbah-Ouargla
Faculté des hydrocarbures et des énergies Renouvelables et des Sciences de
la Terre et de l'univers
Département des énergies renouvelables



Mémoire

Présenté pour l'obtention d'un diplôme de

MASTER

Filière : énergies renouvelables

Spécialité : Hydrogène vert vecteur d'énergie

Présenté par : Djerroudib Abir

Thème :

**Réalisation d'un prototype pour la production
d'hydrogène vert dans la région de Ouargla**

Soutenu publiquement le : 22/06/2025

Devant le jury :

Ammari Chouaib	Président	U. Kasdi Merbah Ouargla	MCA
Mohamed Hafedh Berrebeuh	Examineur	U. Kasdi Merbah Ouargla	MCA
Gharbi Brahim	Encadreur	U. Kasdi Merbah Ouargla	MCA
Djamel Belatrache	Co_encadreur	U. Kasdi Merbah Ouargla	MCA
Mohamed Yacine Rachedi	Invité	U. Kasdi Merbah Ouargla	MCA
Zineb Chaich	Invitée	U. Kasdi Merbah Ouargla	MCA

Année universitaire : 2024/2025

إهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال تعالى: {يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ وَرَحْمَاتِي}

إلى الداعمة الأولى في مسيرتي،

إلى من كانت سدي الأول في كل لحظة، إلى نبع الحنان،

إلى من كانت دعواتها سرّ نجاحي، إلى قلب لا يتأم إلا مطمئناً عليّ،

إلى تاج رأسي ونور حياتي،

أمي الحبيبة

إلى مصدر قوتي وعزّي وعزوتي،

إلى من عمل بصمتٍ وتعبٍ ليجعلني ما أنا عليه اليوم،

إلى من كانت نظراته فخراً، وصمته دعماً،

إلى الرجل الذي كان ولا يزال مصدر فخري الأبدي،

أبي الحبيب

أهديكما هذا النجاح، وفاء لكل تعبٍ ودعّمٍ وحبٍّ قدّمتموه لي

Abir Djir

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu, le tout-puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail parfaitement.

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire d'énergies renouvelables à l'université de Kasdi Merbah à Ouargla.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Dr. Gharbi Ibrahim, ainsi qu'à mon co-encadreur Dr. Djamel Belatrache, pour leur encadrement, disponibilité et patience.

Je vous remercie également pour vos engagements vos conseils et vos orientations tout au long de ce travail.

Nous remercions vivement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques enrichissantes.

Je souhaite exprimer ma gratitude à mes collègues et amis pour leur soutien moral et leur aide précieuse durant l'ensemble de mon parcours universitaire.

Enfin, je n'oublie pas mon entourage, notamment ma famille, en particulier à mes chers parents, pour leur amour, leurs prières constantes, leur soutien indéfectible et leur grande confiance en moi. Merci à ma mère, Linda, pour sa tendresse et sa force, et à mon père, Azouz, pour son soutien constant et son accompagnement à chaque étape.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette recherche, je dis :

merci du fond du cœur.

Sommaire

Dedication	I
Remerciements.....	II
Sommaire	III
Nomenclature.....	VI
Liste des figure	VII
Liste des tableaux	X
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur l'hydrogène.

I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition de l'Hydrogène	5
I.3. Historique	6
I.4. Les caractéristiques	7
I.4.1 Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène.....	7
I.4.2 Propriétés énergétique de l'hydrogène	8
I.5. Les différents types de l'hydrogène.....	8
I.6. Les sources d'énergie renouvelable pour produire l'hydrogène	9
I.7. Technologies de production d'hydrogène	10
I.8. La production d'hydrogène par l'électrolyse d'eau.....	12
I.8.1 Définition d'électrolyseur	12
I.8.2. Principe de fonctionnement	12
I.8.3. Les types d'électrolyseurs.....	13
I.9. Stockage de l'hydrogène.....	15
I.9.1.1. Stockage gazeux sous pression	15
I.9.1.2. Stockage sous forme liquide cryogénique.....	15
I.9.1.3. Stockage solide par adsorption et absorption	16
I.9.2. Comparaison des différents modes de stockage.....	17
I.10. Applications potentielles de l'hydrogène	17
I.11. Les avantages et les défis de l'hydrogène.....	19
I.12. Stratégie Nationale de Développement de l'Hydrogène en Algérie.....	20
I.13. L'hydrogène dans la transition énergétique.....	20
I.14. Conclusion	21

Chapitre II : Réalisation du prototype

II.1. Introduction	22
II.2. Présentation générale de la région de Ouargla [21].....	22
II.3. Prototype de production d'hydrogène PVEH2	23
II.4. Description du procédé et des équipements utilisés	24
II.4.1. Générateur photovoltaïque.....	25
II.4.2. Électrolyseur	26
II.4.3. Matériaux et composants auxiliaires	28
II.4.4. Les appareils de mesure.....	31
II.5. Schéma de fonctionnement du prototype.....	32
II.5. Les paramètres mesurables du système	33
II.5.1. Le rayonnement solaire.....	33
II.5.2 Le courant qui traverse l'électrolyseur	33
II.5.3.La puissance absorbée par l'électrolyse	34
II.5.4.Le volume de production d'hydrogène.....	34
II.5.5. Le rendement d'électrolyseur.....	34
II.7.Conclusion.....	35

Chapitre III: Résultats et Discussion

III.1.Introduction.....	Error! Bookmark not defined.
III.1. Étude expérimentale du système	Error! Bookmark not defined.
III.1.1.Expérience 01	Error! Bookmark not defined.
III.1.2.Expérience 02	Error! Bookmark not defined.
III.1.3.Expérience 03	Error! Bookmark not defined.
III.2. Comparaison entre les trois expériences	Error! Bookmark not defined.
III.3. Conclusion	Error! Bookmark not defined.

Chapitre IV : Évaluation économiques et environnementaux

IV.1. Introduction	50
IV.2. Coûts de production et d'installation	50
IV.2.1. Coût initial d'investissement.....	51
IV.2.2. Coût de maintenance et exploitation.....	51
IV.2.3. Coût de remplacement	52
IV.3. Revenus et bénéfices du projet	52
IV.3.1. Prix de vente de l'hydrogène	52

IV.3.2. Revenus totaux.....	52
IV.3.3. Bénéfice net	52
IV.4. Estimation des données économiques du système	53
IV.5. Analyse économique du système de production d'hydrogène	53
IV.6. Impacts environnementaux de la production d'hydrogène vert.....	56
IV.7. Intégration d'hydrogène vert dans la transition énergétique.....	57
IV.8. Conclusion.....	58
Conclusion générale	62
Références bibliographique	62
Résumé	61

Nomenclature

PVEH₂ : Nom choisi pour le prototype de production d'hydrogène.

V_{H₂} : volume d'hydrogène produit pendant l'électrolyse (litre).

Q_{H₂} : débit molaire de production d'hydrogène (ml/s).

n : quantité d'hydrogène produite en mols.

P : Pression atmosphérique (1 atm).

R : constante des gaz parfaits (0,0821 L.atm/mol.k).

t : durée de fonctionnement de l'électrolyse (en secondes).

T : température en kelvins (k).

Z : nombre d'électrons nécessaires pour former une molécule de gaz (pour H₂, Z = 2).

F : constante de Faraday (96 485 C/mol).

I : courant de fonctionnement d'électrolyseur (en A).

η_{el} : le rendement énergétique du processus d'électrolyse (%).

E_{utile} : l'énergie chimique stockée dans l'hydrogène produit par électrolyse (Joule).

E_{électrique} : l'énergie électrique consommée par l'électrolyseur (Joule).

m : la masse d'hydrogène (en kg).

HHV : ou (PCS) Pouvoir Calorifique Supérieur de l'hydrogène (J/Kg).

P : La puissance électrique (watt).

LCOH: Levelised Cost of Hydrogen en DZD/kg.

C_{total} : coût total du projet en DZD.

C_{in inv}: coût initial d'investissement en DZD.

C_{m&e} : coût de maintenance et exploitation en DZD.

C_{rem} : coût de remplacement en DZD.

m_{H₂} : masse totale d'hydrogène produite en kg.

C_{pv} :coût des panneaux photovoltaïques.

C_{el} : coût de l'électrolyseur .

C_{autre} : coût des composants auxiliaires (les supports , les vis de fixation, les câbles ,..).

Cap_{pv} : capitale du système PV (DZD/W).

P_{max} : puissance maximale du système PV (W).

C_{eld} : coût des électrodes.

C_{cuv} : coût de la cuve.

C_{coll} : coût du collecteur.

$C_{m.pv}$: coût de maintenance du panneau photovoltaïque.

$C_{m.el}$: coût de maintenance de l'électrolyseur.

φ : Rapport des coûts de maintenance

$C_{rem .el}$: coût de remplacement (Remplacement les électrodes chaque année pendant n ans).

n : durée de vie du système ($n = 10$ ans).

P_{vente} : prix de vente de l'hydrogène.

Marge : Taux de bénéfice.

Liste des figure

Figure I.1 : Les types d'électrolyseurs.....	14
Figure I.2 : L'adsorption et l'absorption de l'hydrogène.....	16
Figure I.3 : Avantages des véhicules à hydrogène face aux véhicules électriques et thermiques.....	18
Figure II.1: Localisation de la région d'Ouargla.....	23
Figure II.2: Connexion directe de Panneau photovoltaïque et électrolyseur.....	24
Figure II.3: Cuve d'électrolyse.....	26
Figure II.4: les électrodes en aluminium.....	27
Figure II.5: Réservoir d'eau.....	28
Figure II.6: Collecteur de gas.....	29
Figure II.7: Les câbles de raccordement.....	29
Figure II.8: Tuyaux de transfer.....	29
Figure II.9: Vis de fixation.....	30
Figure II.10: Les bouteilles de stockage.....	31
Figure II.11: Les appareils de mesure utilisés.....	32
Figure II.12: Schéma de fonctionnement du prototype.....	32
Figure II.13 : Le prototype expérimental PVEH₂ de production d'hydrogène solaire avec représentation symbolique du stockage et de l'utilisation.....	33
Figure III.1: Variation de Rayonnement solaire en fonction du temps pour deux cas (18,21/05/2025).....	38
Figure III.2: Évolution du courant de l'électrolyseur en fonction du temps pour deux cas (18,21/05/2025).....	39
Figure III.3: Variation de puissance d'électrolyseur en fonction du temps pour deux cas (18,21/05/2025).....	39
Figure III.4: Évolution du volume d'hydrogène produit en fonction du temps pour deux cas (18,21/05/2025).....	40
Figure III.5: Évolution de rendement d'électrolyseur en fonction du temps pour deux cas (18,21/05/2025).....	41
Figure III.6: Variation de Rayonnement solaire et du puissance électrique en fonction du temps (20/05/2025).....	42
Figure III.7: Évaluation du courant d'électrolyseur et du volume d'hydrogène en fonction du temps(20/05/2025).....	43
Figure III.8: Évolution de rendement d'électrolyseur en fonction du temps (20/05/2025).....	43

Figure III.9: Variation de Rayonnement solaire et du puissance électrique en fonction du temps (27/05/2025).....	44
Figure III.10: Évaluation du courant d'électrolyseur et du volume d'hydrogène en fonction du temps(27/05/2025).....	44
Figure III.11: Évolution de rendement d'électrolyseur en fonction du temps (27/05/2025)....	45
Figure IV.1: Variation de la masse d'hydrogène et du coût total de production selon les différentes expériences.....	54
Figure IV.2 : Évolution du coût nivelé de l'hydrogène (LCOH) en fonction de la masse produite selon les différentes expériences.....	55
Figure IV.3 : Comparaison entre le coût total et le bénéfice net.....	56
Figure IV.4: Comparaison des émissions de CO_2 selon le type d'hydrogène produit	57

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Bref historique d'hydrogène.....	6
Tableau I.2: Principales caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène.....	7
Tableau I.3: Données techniques des types des électrolyseurs.....	14
Tableau I.4: Données techniques des modes de stockage de l'hydrogène.....	17
Tableau II.1: Les caractéristiques électriques des modules solaires utilisés.....	26
Tableau III.1: Synthèse comparative des paramètres mesurés.....	46
Tableau IV.1 : Les données économiques du panneau photovoltaïque.....	53
Tableau IV.2 : Les données économiques de l'électrolyseur.....	53
Tableau IV.3 : Les résultats de calcul économique.....	54



Introduction générale

Introduction générale

Actuellement, une grande part de la production mondiale d'énergie repose encore sur les sources fossiles. L'utilisation de ces sources entraîne la production de gaz à effet de serre, ce qui contribue à l'augmentation de la pollution. Un risque supplémentaire réside dans l'exploitation excessive des ressources naturelles épuise les réserves de ce type d'énergie, ce qui peut être dangereux pour les générations futures.

De plus, face aux diverses crises énergétiques et environnementales actuelles, la science se tourne plus vers les ressources renouvelables et l'amélioration du rendement énergétique, considérés comme un secteur stratégique occupant une position privilégiée dans le domaine de la recherche et du développement. Parmi les nouvelles technologies de production d'une énergie propre, l'hydrogène se présente comme vecteur énergétique du futur. Il semble être la solution miracle pour sortir des crises actuelles. Ceci peut être vrai à condition de résoudre tous les problèmes associés à son cycle de vie (production, distribution, stockage et utilisation).

Aujourd'hui, l'Algérie aspire à faire de l'hydrogène un vecteur stratégique de son programme de transition énergétique et de ses engagements climatiques. Elle dispose également de nombreux avantages compétitifs qui lui permettent de développer l'économie de l'hydrogène, ce qui peut créer une dynamique économique se traduisant par des opportunités d'innovation, la création de nouveaux postes d'emplois durables et la génération de revenus supplémentaires provenant des exportations hors du secteur des hydrocarbures, et ainsi lancer une nouvelle filière industrielle. Dans le cadre du renforcement de l'intégration des énergies durables dans le système de production énergétique national et avec la disponibilité de grands potentiels d'énergie, en particulier l'énergie solaire. L'Algérie, grâce à sa position géographique particulière (à proximité du marché européen), a son potentiel solaire exceptionnel, ses centres de développement et de recherche, ainsi qu'à ses universités dynamique et efficace, se distingue par son potentiel à établir durablement une filière de l'hydrogène performante.

Cette filière est très prometteuse, pourrait contribuer au développement économique et la transition énergétique du pays .de plus de générer des bénéfices en matière de création de richesse et d'emplois durables sur le moyen et long terme.

L'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables présente l'avantage de ne pas générer de gaz à effet de serre. Malheureusement, ces sources étant de nature intermittente, il est indispensable de réfléchir à un système de stockage propre et efficace. Il est donc nécessaire de les associer à des technologies de stockage adaptés. L'hydrogène est l'une des solutions

Introduction générale

énergétiques qui donnent l'espoir d'une disponibilité à long terme d'une énergie abondante et respectueuse de l'environnement.

L'hydrogène vert attire l'intérêt mondial en tant que vecteur d'énergie propre et durable, grâce à ses multiples propriétés: il ne produit pas d'émissions lors de son utilisation, et peut être stocké, transporté et utilisé dans divers secteurs tels que l'industrie, le transport et la production d'électricité.

Grâce à ses riches ressources naturelles, l'Algérie joue un rôle central dans l'économie nationale. Avec l'orientation croissante du pays vers les énergies renouvelables, cela lui offre des perspectives prometteuses pour devenir un pilier clé des projets de production et d'utilisation de l'hydrogène vert, qui est produit grâce à l'énergie solaire et éolienne pour séparer les molécules d'eau par électrolyse.

Par ce projet, nous espérons contribuer à la valorisation du potentiel solaire exceptionnel dont dispose notre pays, en particulier les régions sahariennes, et ainsi encourager le développement de technologies innovantes et avancées qui soutiennent la transition énergétique et servent l'avenir des générations futures.

Cependant, malgré le potentiel solaire important de l'Algérie, la mise en œuvre pratique de systèmes de production d'hydrogène vert reste limitée. Le couplage efficace entre panneaux photovoltaïques et électrolyseurs ainsi que l'optimisation du rendement posent encore des défis techniques. D'où l'importance de développer et réaliser des prototypes expérimentaux pour mieux comprendre leur fonctionnement et évaluer leurs performances.

L'objectif de notre mémoire est la conception et la réalisation d'un prototype expérimental pour la production d'hydrogène vert par les énergies renouvelables dans le sud algérien, et particulièrement dans la région de Ouargla. Le système est constitué d'un panneau photovoltaïque et d'un électrolyseur, reliés par une connexion directe. vise à identifier les facteurs influençant la production d'hydrogène et à permettre une meilleure compréhension du fonctionnement du système.

Ce travail a été organisé et structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une vue générale sur l'hydrogène, en mettant l'accent sur ses propriétés, ses méthodes de production, les différents types d'électrolyseurs, ainsi que les modes de stockage existants et leurs applications. Ce chapitre traite également des enjeux liés à l'hydrogène et de la stratégie nationale adoptée par l'Algérie dans le cadre de la transition énergétique.

Introduction générale

Le deuxième chapitre est consacré à la réalisation du prototype de production d'hydrogène vert. Nous y décrivons les étapes de conception du système PVEH₂, les composants utilisés, le principe de fonctionnement ainsi qu'un schéma illustrant l'interconnexion entre les différents éléments.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus lors des essais du prototype. Une analyse détaillée des paramètres mesurés (courant, tension, puissance, volume d'hydrogène produit, rendement) est effectuée à travers trois expériences comparatives. Le quatrième chapitre porte sur l'étude économique et environnementale du système. Nous y évaluons la rentabilité du projet à travers l'analyse des coûts, des revenus et du bénéfice net. De plus, les impacts environnementaux positifs liés à la production d'hydrogène propre sont examinés, tout en considérant l'intégration du projet dans une vision régionale de développement durable.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats et perspectives futures.

Chapitre I :
Généralité sur l'hydrogène.

I.1. Introduction

Le changement climatique nous confronte à deux défis majeurs : le premier est de pouvoir répondre à l'augmentation de la consommation énergétique mondiale, le deuxième est de limiter l'impact de l'activité humaine sur le climat. Il faut donc limiter les émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie, dans le transport et dans la production de l'énergie [1].

L'hydrogène se présente comme une solution prometteuse et un candidat idéal pour répondre aux actuels défis énergétiques [1].

L'intégration de technologies modernes telles que l'hydrogène dans les applications actuelles représente une réelle opportunité pour la croissance industrielle et la création de nouveaux emplois dans le domaine de la transition énergétique, il est donc essentiel de soutenir cette recherche et innovation pour développer de nouveaux produits et répondre aux besoins énergétiques dans une perspective de développement durable [1].

Dans ce chapitre, on va donner une vue générale sur l'hydrogène, incluant ses propriétés. Ses modes de production et les différents types d'électrolyseurs utilisées, ainsi que les méthodes de stockage et leur applications potentielles.

I.2. Définition de l'Hydrogène

L'hydrogène (H) est classé en première place dans le tableau périodique de Mendeleïev, il s'agit de l'atome le plus simple et le plus léger noté H (un proton et un électron), il existe sous la forme de la molécule de dihydrogène notée H_2 .

Le dihydrogène est un composé moléculaire à l'état gazeux aux conditions normales de pression et de température. Les molécules comportent deux atomes d'hydrogène, et c'est cette forme couramment appelée « hydrogène ».

L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'univers. On le trouve dans la composition du Soleil, des étoiles, des planètes gazeuses, mais il n'existe pas à l'état pur, il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, Il existe aussi bien dans la molécule d'eau qu'au niveau des hydrocarbures lesquels associent hydrogène et carbone, présents dans tous les tissus vivants du monde animal ou végétal.

L'ensemble des technologies étudiées pour produire, stocker et convertir l'hydrogène à des fins énergétiques est appelé technologie de l'hydrogène [2].

I.3. Historique

En 1766, L'hydrogène a été découvert par le chimiste anglais Henry Cavendish. Plus tard, en 1783, le chimiste français Antoine Lavoisier confirme les expériences de Cavendish et propose le mot [hydrogène] pour remplacer l'expression [air inflammable].

Ce nom, d'origine grecque, est formé des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, ce qui signifie « générateur d'eau ». En effet, l'anglais Cavendish fut le premier chimiste à démontrer que, lorsque l'hydrogène et l'oxygène sont combinés, ils forment de l'eau.

Tableau I.1:Bref historique d'hydrogène [3].

Année	Historique
1766	Identification de l'élément Hydrogène.
1800	Découverte de l'électrolyse.
1839	Découverte de la pile à hydrogène.
1960	Début de l'utilisation de l'hydrogène dans les piles à combustible pour les missions spatiales de la NASA.
1973	Application commerciale des piles à combustible hydrogène après le 1er choc pétrolier.
1990	Première usine de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire.
2001	Première membrane à échange de protons dans les piles à combustible.
2015	Mise en circulation de la Toyota Mirai, l'une des premières voitures à hydrogène produites en série.
2020	Publication de la stratégie européenne pour l'hydrogène, avec des objectifs ambitieux pour la production d'hydrogène vert et le développement des infrastructures correspondantes.
2023	Lancement de la stratégie nationale algérienne pour l'hydrogène vert et le développement des énergies renouvelables.

I.4. Les caractéristiques

I.4.1 Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène

- L'hydrogène est un gaz incolore, inodore, non toxique, hautement inflammable et très léger. Il est le plus abondant des éléments chimiques sur terre et il constituerait environ 75% de la masse de l'Univers [4].
- l'hydrogène est diatomique (ses molécules sont constituées de deux atomes). Aux températures élevées, il se décompose en atomes libres, comme la plupart des éléments gazeux.
- L'élément hydrogène n'appartient à aucun groupe. L'hydrogène peut comme les alcalins perdre un électron pour donner le cation H^+ . Il peut également, comme les halogènes compléter son niveau de valence par capture d'un électron pour donner l'anion hydrure H^- [2].

le tableau suivant représente Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène :

Tableau I.2: Principales caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène [4].

Propriétés	Valeur numérique
Numéro atomique	1
Masse atomique	1.0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Température de fusion	- 259,14 °C
Densité de masse	0,00838 kg/m ³
Electronégativité	2.1
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	120 MJ/kg
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	142 MJ/kg
Chaleur spécifique Cp	14.3 kJ/kg. K
Chaleur spécifique Cv	10,3 kJ/kg. K
Energie d'inflammation	0.020 Mj
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 Cm/s

I.4.2 Propriétés énergétique de l'hydrogène

Sur le plan énergétique, l'hydrogène offre de nombreux avantages :

- Il a une très grande densité de masse d'énergie, qui renferme deux fois celle fournie par l'énergie conventionnelle. Elle est presque trois fois celle de l'essence et près de six fois celle du méthanol. Il est considéré par certains comme le « carburant du futur ». L'hydrogène est utilisable comme « vecteur d'énergie » [2].
- L'hydrogène est le vecteur d'énergie le plus polyvalent, il peut être converti en énergie utile suivant cinq différents procédés. En plus de la combustion, l'hydrogène peut être directement converti en vapeur, converti en chaleur par combustion catalytique, converti directement en électricité par des procédés électrochimiques et il peut aussi agir comme source de chaleur par réaction chimique [2].
- L'hydrogène est un carburant propre. Il est le seul combustible non carboné, donc non producteur de CO_2 au cours de sa combustion. Dans le tableau, on a reporté les polluants produits par différents carburants [2].

I.5. Les différents types de l'hydrogène**➤ L'hydrogène vert**

Est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable, La raison pour laquelle il est appelé vert est qu'il n'y a pas d'émission de CO_2 associée à la production d'hydrogène ni à son utilisation .

➤ L'hydrogène gris

Est fabriqué par procédés thermo-chimiques avec comme matières premières des sources fossiles (charbon ou gaz naturel) '. Au cours de ce processus, du CO_2 est produit et finalement rejeté dans l'atmosphère. Il représente environ 95% de l'hydrogène produit dans le monde aujourd'hui .

➤ L'hydrogène bleu

Est fabriqué de la même manière que l'hydrogène gris, à la différence que le CO_2 émis. Toutefois, la plupart (mais pas la totalité) du CO_2 émis au cours du processus serait capturé et stocké sous terre (séquestration du carbone) ou lié à un produit solide (comme des briques) et utilisé. C'est ce qu'on appelle le captage, le stockage et l'utilisation du carbone (CSUC).

Comme l'émission de CO_2 est limitée, le processus de production de l'hydrogène bleu est considéré comme faible en carbone.

➤ **L'hydrogène jaune**

Plus spécifique à la France, est fabriqué par électrolyse comme l'hydrogène vert mais l'électricité provient essentiellement de l'énergie nucléaire.

L'ADEME a récemment suggéré de changer la terminologie. L'hydrogène qui était jusqu'ici appelé « vert » est désormais appelé « renouvelable », l'hydrogène « gris » devient « fossile », et enfin, les hydrogènes « bleu » et « jaune » sont regroupés sous l'appellation « bas-carbone ». Une fois fabriqué, cet hydrogène doit être stocké, puis transporté jusqu'à son lieu de distribution et d'utilisation [5].

I.6. Les sources d'énergie renouvelable pour produire l'hydrogène

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et d'autres ressources végétales possèdent un potentiel énergétique que les technologies humaines peuvent exploiter. Leur faible impact environnemental en fait des sources d'énergie prometteuses pour relever les défis de la gestion des déchets nucléaires et des émissions de gaz à effet de serre.

Il existe divers types d'énergies renouvelables comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, et la biomasse. Leur caractéristique commune est de ne pas produire d'émissions polluantes, et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre.

On peut identifier différentes catégories d'énergies renouvelables, qui proposent diverses technologies.

- **L'énergie solaire** : Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement:
 - **Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques)** : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
 - **Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques)**: la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité [2].
- **L'énergie éolienne** : Par définition, il est l'énergie produite par le vent grâce aux turbines éoliennes, qui sont des machines produisant de l'électricité. Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air [6].

- **L'énergie hydraulique** : L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité.

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité [7].

- **La biomasse** : Elle est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme. La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...).

L'énergie biomasse permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion des matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses [7].

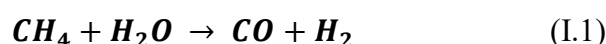
I.7. Technologies de production d'hydrogène

Aujourd'hui, 95 % de l'hydrogène est produit à partir d'hydrocarbures, solution la moins coûteuse. On appelle « énergie fossile » l'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Ces combustibles, riches en carbone et hydrogène, sont issus de la transformation de matières organiques enfouies dans le sol pendant des millions d'années.

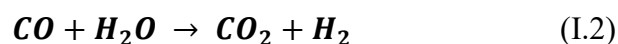
Il existe plusieurs types de procédés de production :

- **Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau**

Est la principale source industrielle de production d'hydrogène et la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO_2 . Le CO_2 émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarbonné. C'est un procédé à trois étapes : En premier, le méthane composé prédominant du gaz naturel est prétraité, et ensuite introduit avec la vapeur d'eau dans un réacteur catalytique à une température de l'ordre de 850 °C et sous une pression de 15 à 25 atm, sous la réaction suivante [8]:



En 2ème étape, après un refroidissement, une réaction shift a lieu permettant l'oxydation du monoxyde de carbone et donnant ainsi de l'hydrogène, selon la réaction :



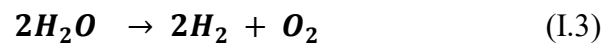
Le mélange gazeux à la sortie du réacteur est de 70% hydrogène et 25% dioxyde de carbone, 4% de méthane et moins de 1% de monoxyde de carbone.

La troisième étape consiste en la séparation des différents gaz. Le procédé industriel le plus utilisé est l'adsorption du CO_2 sur du charbon actif, permet d'obtenir une pureté de 99,99% [8].

▪ L'électrolyse de l'eau

Est un procédé commercial très courant, utilisé pour la production à petite échelle lorsqu'une très grande pureté en hydrogène est requise. Cette voie est encore peu répandue car nettement plus coûteuse (2 à 3 fois plus chère que le reformage du gaz naturel). L'électrolyse présente le principal avantage de ne pas générer de gaz à effet de serre.

Un électrolyseur est un dispositif de décomposition chimique de l'eau par un courant électrique. Il est constitué d'un bac qui regroupe : deux électrodes (anode et cathode, conducteur électrique) reliées à un générateur de courant continu, et d'un électrolyte selon la réaction [8] :

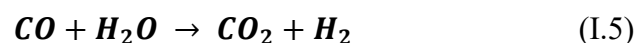
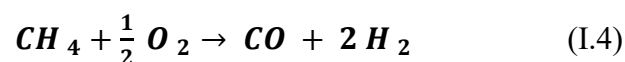


La décomposition de l'eau demande une quantité d'électricité comprise entre 53,4 - 70,1 $kWh.kg^{-1}$ de H_2 à 1 atm à 25°C avec un rendement compris entre 56 et 73%.

▪ Oxydation partielle

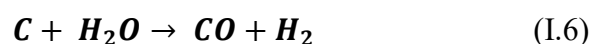
Le procédé d'oxydation partielle du méthane est plus simple et plus efficace que le reforming à la vapeur classique. Il présente l'avantage d'être exothermique, ce qui signifie qu'elle libère une grande quantité d'énergie.

L'hydrogène peut être synthétisé par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, un processus appelé oxydation partielle, qui est également un processus de production majeur. Dans ce processus, le méthane réagit avec l'oxygène sous la réaction suivante [8] :



▪ La gazéification du charbon

Source principale de l'hydrogène avant l'utilisation du gaz naturel. Elle n'est plus utilisée actuellement sauf en Afrique du Sud ou en Chine, elle permet de produire de l'électricité et des sous-produits comme l'hydrogène en mélangeant le charbon, l'eau, et l'air à 1000°C et sous pression ; Le principe est le suivant : formation du gaz à l'eau ou gaz de synthèse.



Cette réaction endothermique nécessite un soufflage de dioxygène pour maintenir la température par combustion du carbone [9].

I.8. La production d'hydrogène par l'électrolyse d'eau

L'électrolyse de l'eau est une méthode couramment utilisée pour produire de l'hydrogène à partir d'une source d'électricité. Elle offre la possibilité de produire de l'hydrogène de manière propre et durable, en utilisant de l'eau comme matière première et en évitant les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, l'efficacité et le coût de ce processus sont des aspects importants qui nécessitent encore des améliorations pour rendre l'électrolyse de l'eau plus compétitive à grande échelle.

C'est un processus qui permet de séparer les atomes d'oxygène et d'hydrogène présents dans les molécules d'eau à l'aide d'un électrolyseur [11].

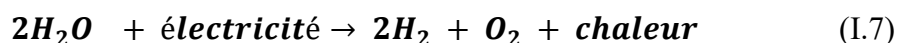
I.8.1 Définition d'électrolyseur

Un électrolyseur est l'appareil inverse de la pile à combustible ; consiste à faire passer un courant électrique dans l'eau pour que les molécules se séparent et forme du dihydrogène et l'oxygène [11].

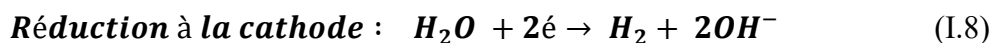
I.8.2. Principe de fonctionnement

L'électrolyse de l'eau consiste en la dissociation électrochimique de l'eau en hydrogène et en oxygène gazeux à l'état ambiant, sous l'effet d'un courant continu circulant entre deux électrodes (l'anode et la cathode) et d'ions circulant dans un électrolyte (liquide ou solide).

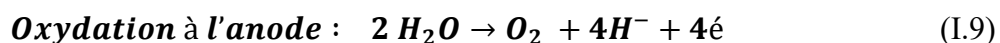
La réaction globale est la suivante :



Le processus se produisant à l'électrode négative, la cathode, est la réduction. C'est le processus par lequel la molécule subit un gain en électron(s) et se divise en hydrogène (H_2), en produisant un anion hydroxyde (OH^-), selon la réaction suivante :



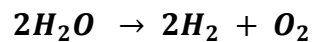
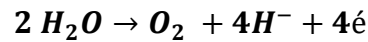
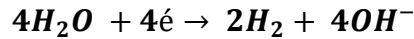
Le processus se produisant à l'électrode positive, l'anode, est l'oxydation. C'est le processus par lequel la molécule subit une perte en électron(s). Chaque molécule d'eau se divise alors en oxygène (O_2), et produit un cation hydrogène (H_2), en libérant des électrons qui se déplacent dans le circuit vers la cathode. La réaction est :



La combinaison des deux réactions qui se produisent en même temps dans le circuit donne la réaction totale représentant l'électrolyse de l'eau ; pour équilibrer les électrons transférés, il est nécessaire de multiplier l'équation de la réaction de réduction à la cathode par 2.

Les ions (H^-) et (OH^-) s'associent pour créer des molécules d'eau (H_2O). Suite à l'addition et à la simplification [11].

Nous obtenons :



I.8.3. Les types d'électrolyseurs

- **Électrolyseurs Alcalins (AEL)**

C'est la technologie la plus employée dans l'industrie et est donc mature. Elle a été appliquée pour la production d'hydrogène à grande échelle dès le début du 20ème siècle. L'électrolyte employé est généralement une solution aqueuse de 25-30% d'hydroxyde de potassium (KOH) [12]. il est proposé en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 Nm³/h d'hydrogène). Les modules comprennent généralement une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse, une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle. Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars [12].

- **Électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM)**

Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons (PEM) à basse température. General Electric c'est la compagnie qui a introduit un prototype fini de ce type des électrolyseurs dans les années 60s. Les avantages de cette technologie sont la compacité, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion et des performances sensiblement supérieures, mais elle reste coûteuse en raison de l'utilisation d'électro-catalyseurs à base de métaux nobles et elle est encore en phase de développement, spécialement ce qui concerne les matériaux utilisés comme le catalyseur [12].

- **Électrolyseurs à oxyde solide (Solid Oxide Electrolyser (SOE))**

Ce type possède un électrolyte en céramique, conducteur à température comprises entre 700 et 900°C. Ces dernières années, SOE a reçu un intérêt croissant en raison des progrès des piles à combustible à oxyde solide, ainsi qu'à la motivation de la transition vers des systèmes énergétiques neutres en carbone. Son fonctionnement à haute température permet d'obtenir un

rendement plus élevé que les alcalines ou PEM, mais il implique un défi remarquable pour la stabilité du matériau. Ce type d'électrolyseur est actuellement en phase de recherche et d'étude [12].

Le principe de ces trois types d'électrolyse est représenté sur la figure I.2. ci-dessus :

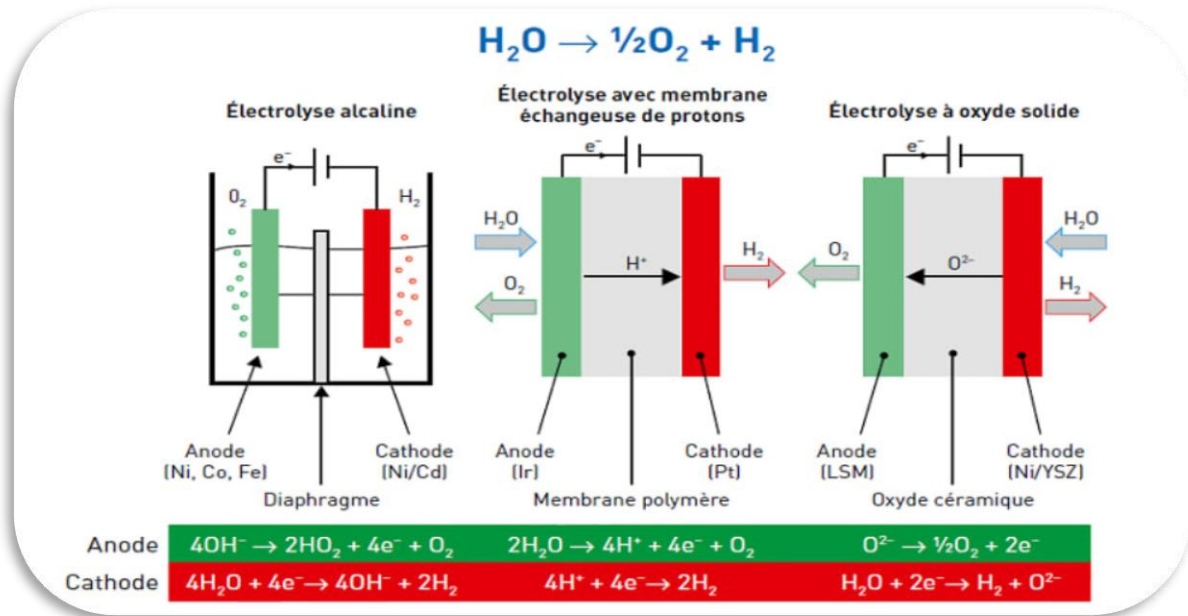


Figure I.1 : Les types d'électrolyseurs [13].

Tableau I.3: Données techniques des types des électrolyseurs [12].

Caractéristique	Électrolyse alcaline (AEL)	Électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM)	Électrolyse à oxyde solide (SOE)
Électrolyte	Une Solution aqueuse de KOH	Une membrane polymère conductrice de protons (PEM)	Une membrane céramique conductrice d'ions (O^{2-})
Température de fonctionnement (°C)	60-80	50-80	700-1000
Rendement (%)	75-90	80-90	80-90
Hydrogène production (Nm^3/h)	<760	<30	--

I.9. Stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène est un élément important dans l'économie de l'hydrogène et l'une des applications les plus urgentes et les plus difficiles consistant à développer des mécanismes de stockage sûrs, fiables et efficaces.

Le dihydrogène possède une très grande densité massique d'énergie (1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole) mais une très faible densité volumique. Il faut le transformer pour pouvoir le stocker dans un volume utilisable.

Il existe trois approches typiques pour stocker l'hydrogène [14] :

- Stockage physique sous forme de gaz comprimé
- Stockage physique en tant qu'hydrogène liquide cryogénique
- Stockage basé sur les matériaux à adsorption à l'état solide.

I.9.1.1. Stockage gazeux sous pression

Le moyen le plus simple de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression. La méthode la plus utilisée est le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression de 200 à 700 bars. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stocké est grande. Le moyen le plus simple de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression. Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène a une densité de 42 (kg/m^3), contre 0,090 (kg/m^3) dans des conditions normales de pression et de température. A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 125 litres [08].

I.9.1.2. Stockage sous forme liquide cryogénique

C'est le moins coûteux et le plus abouti des procédés pour stocker de grosses quantités de dihydrogène. Pour stocker l'hydrogène à l'état liquide, on le refroidit jusqu'à 20 K (-253 °C). La technologie est maîtrisée, notamment pour des applications spatiales ou de stockage stationnaire.

À (-252.87°C) et 1,013 bar, l'hydrogène liquide a une densité proche de 71 kg/m^3 . A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 75 litres.

Afin de maintenir l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés [08].

I.9.1.3. Stockage solide par adsorption et absorption

Le stockage d'hydrogène sous forme solide est plus sécuritaire que les méthodes conventionnelles de stockage par compression ou par liquéfaction. Il consiste à stocker l'hydrogène dans un autre matériau, ce qui représente une piste de recherche prometteuse. Ces méthodes de stockage sont des techniques impliquant des mécanismes d'adsorption physique et d'absorption chimique de l'hydrogène par un matériau.

L'adsorption physique du gaz d'hydrogène par un solide, ou physisorption, met en jeu des liaisons de type de Van der Waals entre l'hydrogène et le matériau. Elle correspond à l'augmentation de la densité de ce gaz à la surface du solide par effet des forces intermoléculaires. Cette adsorption augmente avec la pression de gaz et est d'autant plus importante que la température est plus basse. L'adsorption de l'hydrogène se fait généralement sur des surfaces solides nanostructures tels que les nanofibres et les nanotubes de carbone. Étant purement physique, elle est entièrement réversible. Elle diminue lorsque l'on baisse la pression et/ou quand la température augmente [08].

L'absorption chimique, ou chimisorption, est une combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec le solide. Il y a création d'une liaison métallique entre les atomes de l'hydrogène et le matériau. L'hydrogène moléculaire s'absorbe en effet dans une large variété de métaux et alliages métalliques. Les composés solides ainsi formés sont appelés hydrures métalliques .

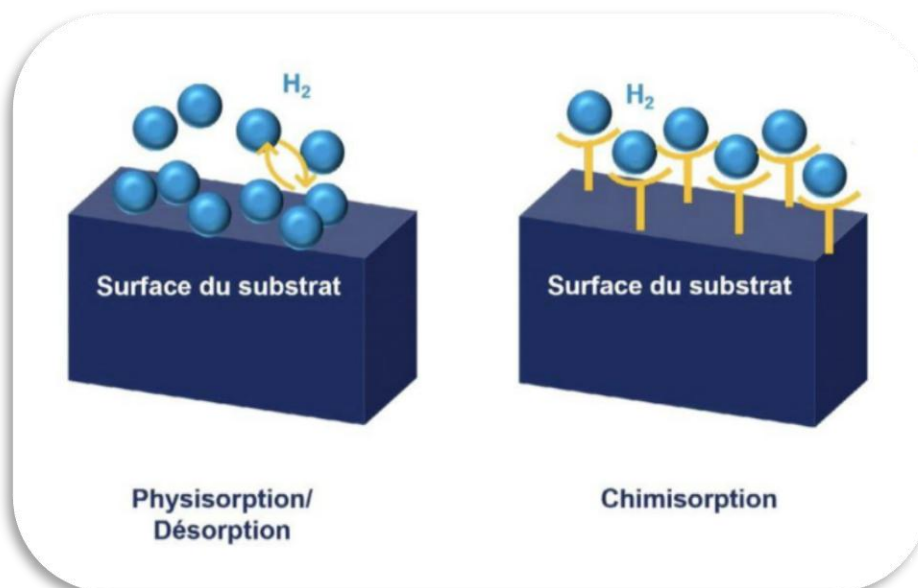


Figure I.2 : L'adsorption et l'absorption de l'hydrogène.

I.9.2. Comparaison des différents modes de stockage

Les caractéristiques des méthodes possibles de stockage de l'hydrogène sont rassemblées dans le tableau (I.4) :

Tableau I.4: Données techniques des modes de stockage de l'hydrogène [15].

Caractéristiques	H_2 comprimé	H_2 liquéfié	H_2 Solidifié
Pression de stockage (atm)	200	1 à 8	1 à 10
Température de stockage (°C)	Ambiante	-253	Ambiante
Pertes au stockage (% par jour)	Nulles	0,5 à 1	Nulles
Dépense énergétique	Élevée	Très élevée	Faible

I.10. Applications potentielles de l'hydrogène

L'hydrogène est polyvalent et peut être utilisé de différentes manières. Ces utilisations multiples peuvent être classées en deux grandes catégories [16]:

A. L'hydrogène comme matière première

Il est utilisé comme un composant de base dans de nombreuses industries et processus chimiques, et agit comme un réactif dans diverses réactions chimiques pour produire d'autres substances. Il est utilisé comme un composant de base dans de nombreuses industries et processus chimiques, et agit comme un réactif dans diverses réactions chimiques pour produire d'autres substances.

A.1. La production d'ammoniac

Le composé hydrogène-azote le plus important est l'ammoniac (NH_3), également connu sous le nom d'azane. Techniquement, l'ammoniac est obtenu à grande échelle par le procédé Haber-Bosch. Ce procédé combine directement par synthèse l'hydrogène et l'azote. Près de 90 % de l'ammoniac est utilisé pour la production de fer liseurs. En raison de sa grande énergie d'évaporation, l'ammoniac est également utilisé dans les réfrigérateurs des usines comme réfrigérant écologique et peu coûteux.

A. 2. Domaines industriels

L'hydrogène est utilisé dans diverses applications industrielles; celles-ci comprennent le travail des métaux (principalement dans les alliages de métaux), la production de verre plat (hydrogène utilisé comme gaz inerte ou gaz protecteur.), l'industrie électronique (utilisés comme gaz protecteur et vecteur, dans les dépôts sur les procédés, pour le nettoyage, la

gravure, la réduction des processus, etc.) et applications en général pour l'électricité, par exemple pour le refroidissement de générateurs ou pour la prévention de la corrosion dans les pipelines de centrales électriques.

A .3. Production de carburant

L'hydrogène est utilisé pour transformer le pétrole brut en carburants raffinés, comme l'essence et le diesel, et aussi pour éliminer les contaminants, comme le soufre, de ces carburants. Environ 75 % de l'hydrogène consommé actuellement dans le monde par les raffineries de pétrole est fourni par les grandes usines d'hydrogène qui produisent de l'hydrogène à partir du gaz naturel ou d'autres combustibles à base d'hydrocarbures [14].

B. L'hydrogène comme vecteur d'énergie

Dans ce cas, l'hydrogène est un carburant ou une source d'énergie. L'utilisation de l'hydrogène dans ce contexte a déjà commencé et augmente progressivement. La polyvalence et la diversité de l'hydrogène sont les raisons pour lesquelles il peut contribuer à la décarbonisation des économies actuelles.

B .1. Le transport

L'hydrogène est considéré comme un bon candidat pour contribuer à la décarbonation du secteur des transports routiers s'il est produit par le processus d'électrolyse. Dans ce cas, les principaux avantages des véhicules électriques à pile à combustible sont l'émission zéro de CO_2 et de polluants et le rendement plus élevé des piles à combustible par rapport aux combustibles internes sur moteurs.

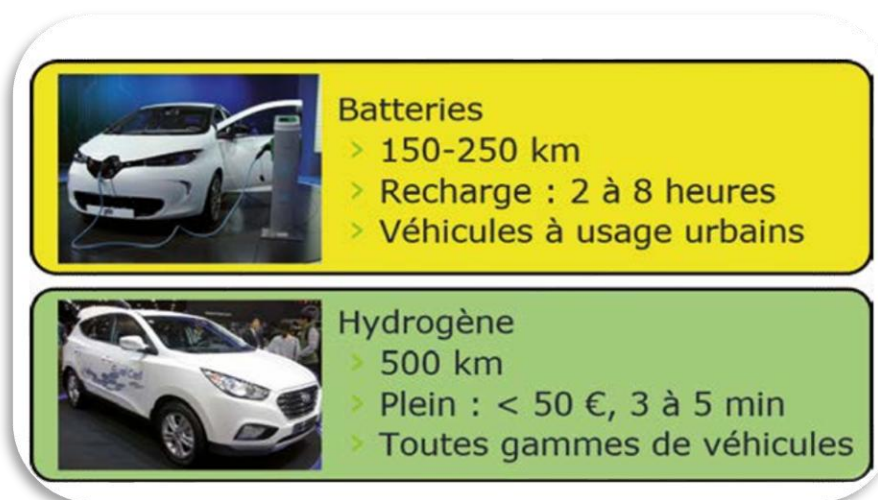


Figure I.3: Avantages des véhicules à hydrogène face aux véhicules électriques et thermiques [1].

B .2. Production d'électricité via les piles à combustibles

Les piles à combustibles ont actuellement l'objet de programmes importants de recherche et développement dans le cadre de l'utilisation de combustibles écologiques comme l'hydrogène solaire. En effet, les piles à combustibles permettent une production d'énergie électrique et thermique à partir de l'énergie chimique emmagasinée dans l'hydrogène. Leur utilisation est alors envisagée dans des applications comme le stationnaire (centrale de production d'énergie), le transport (automobile) ou le spatial et cela, conjointement ou non, aux moteurs thermiques .

I.11. Les avantages et les défis de l'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique d'avenir et substitut possible aux hydrocarbures, il présente plusieurs avantages conséquents [3]:

- Sa combustion génère une forte quantité d'énergie (environ 3 fois plus que l'essence à poids constant).
- Elle est très abondante sur Terre sous forme atomique (eau, hydrocarbures, etc.). Le dihydrogène existe aussi à l'état naturel (les premières sources naturelles d'hydrogène ont été découvertes au fond des mers dans les années 1970 et plus récemment à terre).
- Sa combustion peut être non carbonée (pas d'émission de CO_2 lorsqu'il est issu de sources renouvelables).
- Elle est stockable et peut constituer un moyen efficace de stockage de l'électricité sur de longues durées.

Malgré les multiples avantages de l'hydrogène, Il doit encore relever plusieurs défis [3]:

- Le stockage de l'hydrogène nécessite des quantités d'énergie importantes en raison de sa faible densité (il peut être stocké sous forme comprimée, liquide ou encore d'hydrure métallique).
- L'efficacité de son transport (énergie transportée par unité de volume) est beaucoup moins forte que celle du pétrole ou du gaz en raison de cette faible densité .
- Des risques d'inflammabilité et de détonation avec l'air existent (bien que moindres que pour le gaz naturel).
- Le coût du procédé de production d'hydrogène le plus prometteur, l'électrolyse de l'eau, reste élevé bien qu'en forte baisse .
- Son utilisation grand public dans les transports nécessite la mise en place d'un réseau de stations à hydrogène (de type stations-services) qui requiert des investissements considérables, alors que l'accent est actuellement porté sur l'électromobilité et les infrastructures associées.

I.12. Stratégie Nationale de Développement de l'Hydrogène en Algérie

La feuille de route nationale pour le développement de l'hydrogène vise à atteindre les objectifs stratégiques suivants [17]:

- Diversification de l'approvisionnement énergétique, accélération de la transition énergétique et renforcement de la sécurité énergétique du pays à moyen et long terme ainsi que la réduction de l'empreinte carbone des différents secteurs d'activités.
- Réduction de la consommation locale des énergies fossiles notamment le gaz naturel et préservation des ressources énergétiques du pays.
- Mise en place d'un écosystème favorable et adapté pour le développement de l'hydrogène renouvelable et propre, y compris l'intégration industrielle.
- Maîtrise technologique et technique de toute la chaîne de valeur de l'hydrogène notamment le développement du capital humain (recherche, développement et formation : constitution d'un vivier de talents et pôles d'excellence autour de l'économie de l'hydrogène).
- Mise en place progressive d'une économie nationale de l'hydrogène et ses dérivés (ammoniac, urée, méthanol, carburants synthétiques, ...).
- Constitution d'un Hub pour la production et l'exportation de l'hydrogène.

I.13. L'hydrogène dans la transition énergétique

L'hydrogène est un élément central dans la transition énergétique, répondant à deux défis majeurs. Premièrement, il contribue à la décarbonation du secteur des transports grâce aux véhicules électriques équipés de piles à combustible. Ces véhicules transforment l'hydrogène en électricité et en vapeur d'eau, offrant une alternative écologique à condition que l'hydrogène soit produit à partir de sources d'énergie décarbonées [18].

Deuxièmement, l'hydrogène permet de gérer l'intermittence des énergies renouvelables, comme l'éolien et le solaire, en stockant l'énergie excédentaire. Produit par électrolyse de l'eau en utilisant l'électricité excédentaire, l'hydrogène peut être stocké puis reconverti en électricité lorsque nécessaire. Parmi les solutions de stockage envisagées, les cavités salines sont considérées comme une option prometteuse [19].

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la chaîne de l'hydrogène et détaillé ses méthodes de production, de stockage. Nous avons particulièrement mis en évidence les techniques d'électrolyse de l'eau. La production d'hydrogène est démontrée par l'électrolyse de l'eau à partir de sources d'énergie renouvelables, comme une technologie mature et prometteuse pour la production directe sur site.

Ce chapitre a montré que l'hydrogène présente de grands avantages qui en font un candidat solide pour devenir un vecteur d'énergie intermédiaire à l'avenir. Il couvre un large éventail de besoins énergétiques, tant dans les transports que dans les applications fixes et portables, ainsi que son rendement énergétique élevé. De plus, lorsqu'il est produit à partir d'énergies propres telles que le solaire, l'éolien et d'autres énergies renouvelables, l'hydrogène devient une solution propre et durable. Cet aspect est particulièrement important à la lumière des défis croissants du réchauffement climatique et de la transition énergétique.

L'hydrogène apparaît ainsi comme un des piliers clés pour relever les défis énergétiques et environnementaux de demain.

Chapitre II : Réalisation du prototype

II.1. Introduction

Le secteur de l'énergie est un domaine important et stratégique pour tous les pays du monde. Chaque pays cherche à atteindre l'autosuffisance énergétique par la recherche et l'exploitation optimale des ressources critiques [20].

Grâce à sa position géographique particulière, l'Algérie bénéficie d'un rayonnement solaire élevé et une grande partie de son territoire s'étend sur des zones sahariennes. Cet atout lui confère un rôle majeur dans le domaine des énergies renouvelables. Le pays dispose en effet de multiples zones naturelles propices à une grande diversité de sources d'énergie propre [20].

L'Algérie dispose d'un énorme potentiel énergétique, notamment dans la wilaya de Ouargla, qui se caractérise par un fort ensoleillement et de vastes espaces, ce qui en fait une région idéale pour la production d'hydrogène vert à des coûts très compétitifs.

Cette partie de notre recherche consiste à étudier la région de Ouargla, ce chapitre inclut également la conception, la réalisation d'un prototype basé sur l'énergie photovoltaïque, abondamment disponible dans la région de Ouargla, à travers l'électrolyse de l'eau.

Enfin, les principaux paramètres du système ont été présentés afin de permettre l'évaluation des performances expérimentales.

II.2. Présentation générale de la région de Ouargla [21].

Ouargla (amazigh Zenete : Warjelen) est une ville saharienne située au sud-est de l'Algérie et de l'Etat numéro 30 dans la division administrative algérienne. Elle est l'une des régions sahariennes les plus importantes en raison de sa situation stratégique et l'une des plus riches en ressources naturelles .

Elle s'étend sur une superficie de 136 787 kilomètres carrés, faisant d'elle l'une des plus vastes du pays et se situe à environ 900 Kilomètres de la capitale algérienne.

Historiquement, elle s'agit d'un important centre urbain qui est depuis longtemps un carrefour et contient une importante richesse de palmiers. Aujourd'hui, elle joue un rôle clé dans l'économie algérienne ainsi que les ressources énergétiques et la richesse pétrolière, en particulier le champ pétrolier de Hassi Messaoud, qui constitue le pilier de la production nationale . Sa population était estimée à 382 391 habitants en 2023. Son climat est aride et semi-saharien, caractérisé par de faibles précipitations, des températures élevées en été et basses en hiver, ainsi qu'une forte évaporation.

La wilaya de Ouargla est délimitée par :

Au nord : les wilayas de Touggourt, El Oued ;

À l'est : la Tunisie ;

À l'ouest : la wilaya de Ghardaïa ;

Au sud : les wilayas de Tamanrasset et Illizi ;

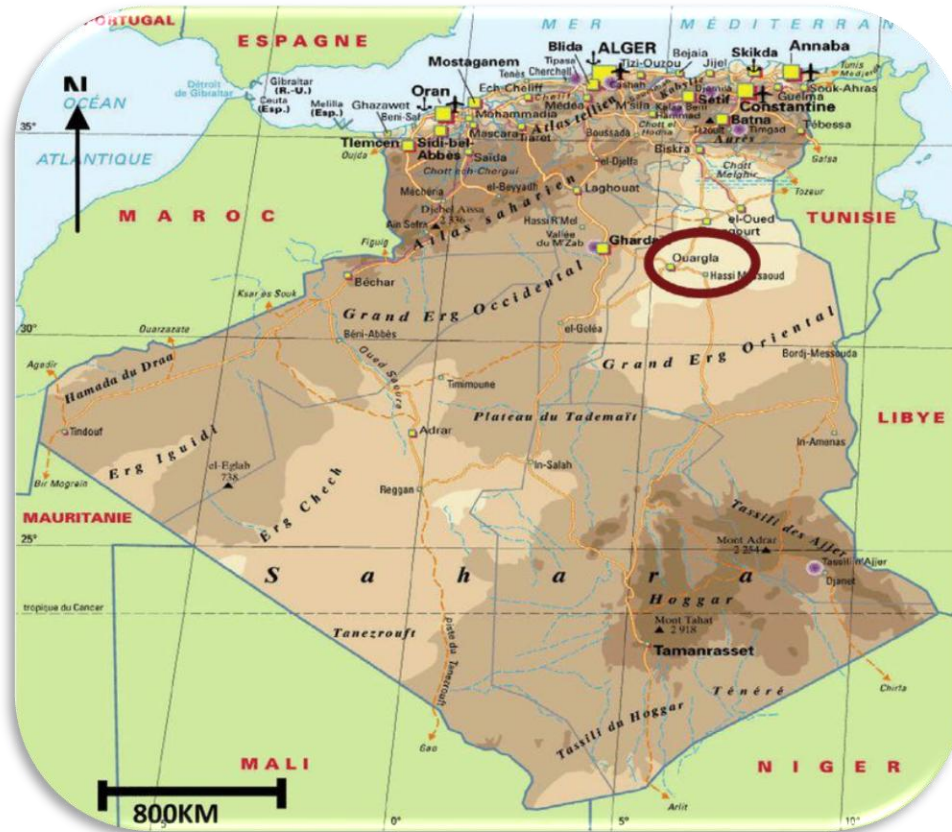


Figure II.1: Localisation de la région d'Ouargla [22].

II.3. Prototype de production d'hydrogène PVEH₂

Dans le cadre de ce travail expérimental, un prototype de production d'hydrogène vert a été réalisé, basé sur l'électrolyse de l'eau à l'aide de l'énergie solaire, une source renouvelable et propre.

Ce prototype a été mis en place dans la région de Ouargla, en raison de son fort potentiel en ensoleillement et de ses conditions climatiques favorables à l'exploitation de l'énergie solaire. Le principe du système est illustré dans la figures (II.2).

Le système est composé de panneaux photovoltaïques qui convertissent l'énergie solaire en électricité, ainsi que d'un électrolyseur pour la production d'hydrogène. Une connexion directe a été étudiée, où les panneaux sont reliés directement à l'électrolyseur. Plusieurs essais

expérimentaux ont été réalisés afin d'évaluer l'impact de différents paramètres sur la quantité d'hydrogène produite, notamment l'intensité de l'éclairement solaire, les dimensions des panneaux photovoltaïques, le volume de la cellule électrolytique, ainsi que la concentration de l'électrolyte.

Lors de son fonctionnement, l'électricité produite permet de décomposer les molécules d'eau en deux gaz : l'hydrogène (H_2) et l'oxygène (O_2), selon le principe de l'électrolyse.

Dans cette étude, nous avons réalisé un dispositif d'électrolyse de l'eau, alimenté par l'énergie solaire, dans le but de concevoir et de mettre en œuvre un prototype expérimental.

Ce projet se concentre sur la compréhension du fonctionnement, l'évaluation de la performance de l'électrolyseur dans des conditions réelles, ainsi que analyser son efficacité et sa fiabilité pour la production d'hydrogène à partir de ressources locales simples.

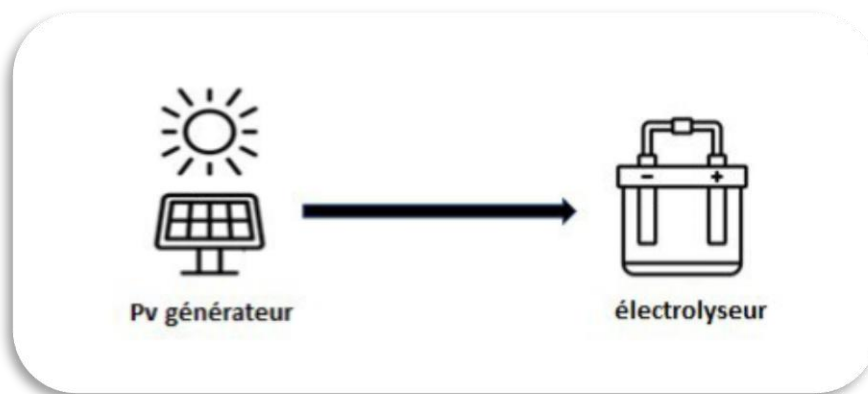


Figure II.2: Connexion directe de Panneau photovoltaïque et électrolyseur

II.4. Description du procédé et des équipements utilisés

L'électrolyse utilisant le photovoltaïque comme source d'électricité est la méthode la plus propre pour produire de l'hydrogène. Le gaz obtenu est très pur, ne nécessitant aucun traitement chimique spécifique pour être utilisé dans les piles à combustible [25].

Dans un système PV-électrolyseur avec stockage, il y a plusieurs éléments, tels que des batteries, un dispositif de contrôle et de régulation, et un convertisseur DC/DC avec fonction MPPT. L'élément le plus fragile dans le système est le dispositif électronique. Les appareils électroniques tombent souvent en panne de manière imprévisible. De plus, la batterie est un élément fragile dont la défaillance est également imprévisible et dont la durée de vie est limitée [25].

Donc Le couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur permet de se passer de batteries de stockage ainsi que des dispositifs électroniques, constitue la configuration étudiée dans ce travail, tout en réduisant le coût global du système, afin d'assurer un bon compromis entre l'efficacité, simplicité de fonctionnement et coût réduit.

Dans ce prototype, la production d'hydrogène est assurée par un électrolyseur alcalin utilisant une solution électrolytique composée d'hydroxyde de sodium (NaOH). L'électrolyseur est alimenté en eau distillée et ne produit que de l'hydrogène et de l'oxygène. Il est directement connecté à un panneau photovoltaïque qui fournit l'énergie électrique nécessaire. Le système fonctionne au fil du soleil, donc il n'utilise pas de batterie de stockage d'énergie [25].

Le système examiné se compose de divers équipements, chacun jouant un rôle spécifique dans le processus de production d'hydrogène vert.

- **Générateur Photovoltaïque** : constitué de panneaux solaires.
- **La charge** : l'électrolyseur.
- **Matériaux et composants auxiliaires** : Les éléments secondaires qui assurent le bon fonctionnement du système comprennent des tuyaux, des câbles de raccordement, de réservoir d'eau et des bouteilles de stockage.
- **Les appareils de mesure** : on utilise quelques appareils tels que l'ampèremètre, le voltmètre, le thermocouple, le pyranomètre et le multimètre .

II.4.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion de le rayonnement solaire en électricité par effet photovoltaïque.

Le module solaire photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles en série et/ou en parallèle selon la puissance requise. Les caractéristiques I-V du module photovoltaïque et de la Électrolyte cellule d'électrolyse sont influencées par les variations des conditions météorologiques [25]. Par conséquent, trois types de panneaux photovoltaïques. chacun ayant ses caractéristiques électriques, ont été testés afin d'analyser leur impact sur le fonctionnement de l'électrolyseur. L'objectif était d'identifier les points de fonctionnement optimaux du système, ce qui constitue une étape essentielle pour adapter le dimensionnement des composants aux conditions réelles d'utilisation. Les modules solaires utilisés possèdent les caractéristiques suivantes :

Tableau II.1: Les caractéristiques électriques des modules solaires utilisés.

Caractéristique	Type 01	Type 02	Type 03
Puissance nominale de crête (Pmax)	150 W	12W	15W
Tension en circuit ouvert (Voc)	22.46 V	5.7 V	4.51 V
Courant de court-circuit (Isc)	8.58 A	3.07 A	4.88 A
Tension à la puissance maximale (Vmpp)	18.75 V	4.31 V	3.4 V
Courant à la puissance maximale (Impp)	8.05 A	2.79 A	4.44 A

II.4.2. Électrolyseur

Le principe est simple : en faisant passer un courant électrique, il décompose les molécules d'eau en gaz d'hydrogène (au niveau de la cathode) et gaz d'oxygène (au niveau de l'anode). Il existe deux types de ce dispositif, dont l'un est submergé, en se fondant sur le principe selon lequel les électrodes sont complètement immergées dans une solution électrolytique, tandis que l'autre type n'est pas submergé, où l'eau circule entre les plaques sans immersion. Dans notre travail, nous nous sommes appuyés sur le premier type, en concentrant tous nos efforts sur la conception et la réalisation d'un prototype fonctionnel et efficace [26].

- Cuve d'électrolyse

Dans notre expérience, nous avons réalisé l'électrolyseur à partir d'une cuve en matériau isolant et résistant à la corrosion. Nous utilisons du plastique avec des dimensions de 30 cm de longueur, 17 cm de hauteur et 16,5 cm de largeur. Elle est dotée d'un couvercle pour éviter les fuites de gaz et permettre la récupération sécurisée de l'hydrogène et de l'oxygène.

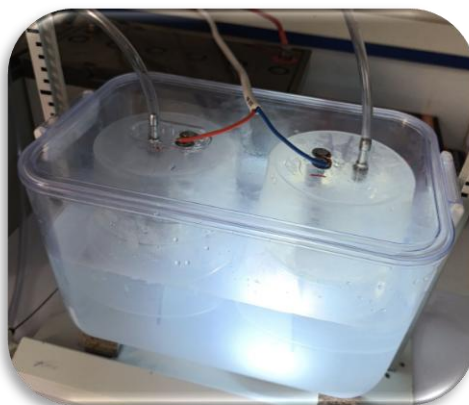


Figure II.3: Cuve d'électrolyse

- **Les électrodes**

Les électrodes ont été conçues sous forme de plaque dans le but d'augmenter la surface disponible pour la réaction, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité du processus d'électrolyse. De plus, tous les matériaux conducteurs peuvent être pris comme électrode, mais ils ne sont pas tous efficaces. Par exemple, le cuivre ou encore le fer sont de mauvais matériaux, car ce sont des matériaux qui s'oxydent facilement. L'électrolyse augmente l'effet d'oxydation.

Il est donc beaucoup plus avantageux d'utiliser des matériaux comme l'acier inoxydable, l'aluminium, la platine ou l'or qui rouillent très peu ou pas.

L'aluminium a été choisi comme matériau pour les électrodes en raison de son faible coût, de sa légèreté et de sa facilité de mise en forme. Il reste un choix approprié pour des expériences à petite échelle grâce à sa disponibilité et pour la validation initiale du système. Les électrodes utilisées ont des dimensions de 10 cm de large et 10 cm de long.



Figure II.4: Les électrodes en aluminium

- **L'électrolyte**

Pour obtenir de meilleurs résultats, il est essentiel d'ajouter un électrolyte dans l'eau, car l'eau pure n'est pratiquement pas conductrice donc la réaction est très lente. L'électrolyte est une substance conductrice contenant des ions en déplacement. Les ions facilitent la circulation rapide du courant entre les électrodes. Les cations (les ions positifs) traversent vers la cathode, et les anions (les ions négatifs) vers l'anode. Ces électrolytes sont habituellement des bases ou des sels tels que KOH, NaOH ou NaCl [26].

La concentration de l'électrolyte joue un rôle très important dans le processus d'électrolyse de l'eau. Plus la concentration est élevée, plus les ions se déplacent rapidement entre les électrodes et inversement. Cela influence ainsi l'efficacité de la conductivité électrique et améliore les performances de l'électrolyse. Cependant, il faut bien prendre en compte qu'une concentration excessive entraîne la corrosion des électrodes ou l'apparition de réactions indésirables.

- **Collecteur de gaz**

Des couvercles en plastique ont été utilisés à l'intérieur de la cuve d'électrolyse de l'eau pour couvrir les électrodes afin de séparer les gaz produits : le gaz d'hydrogène, produit à l'électrode négative (la cathode), et le gaz d'oxygène, produit à l'électrode positive (l'anode). Cette séparation évite le mélange de ces deux gaz, ce qui améliore leur pureté et augmente la sécurité du système, surtout que le mélange d'hydrogène et d'oxygène entraîne un risque d'explosion. Ces couvercles sont conçus de manière à permettre la sortie séparée des gaz tout en maintenant l'efficacité de la réaction et le mouvement continu des ions dans la solution.

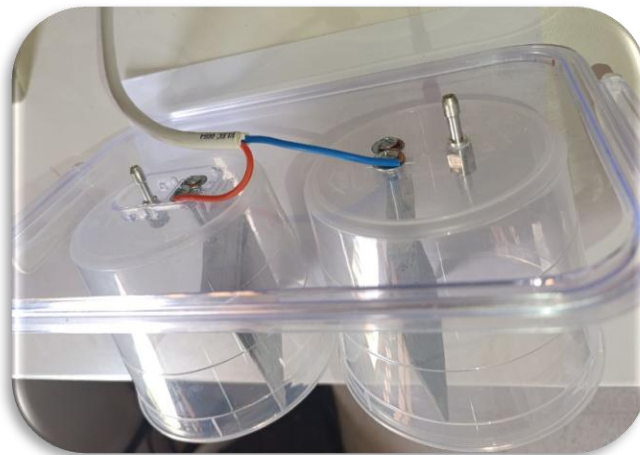


Figure II.5: Collecteur de gaz

II.4.3. Matériaux et composants auxiliaires

Ces composants sont une partie importante du système de production d'hydrogène vert, car ils contribuent à assurer sa sécurité et son fonctionnement continu. Nous allons les mentionner:

- **Réservoir d'eau**

Utilisez le réservoir pour stocker l'eau nécessaire au processus d'électrolyse de l'eau, car il est situé en haut du système et est relié à des tuyaux menant à la cellule d'électrolyseur.



Figure II.6: Réservoir d'eau

- **Les tuyaux**

sont utilisés pour transporter l'eau vers l'électrolyseur et la pompe, et pour transférer les deux gaz, hydrogène et oxygène, vers les bouteilles de stockage.



Figure II.7: Tuyaux de transfert.

- **Les câbles de raccordement**

Les câbles jouent un rôle essentiel dans le transfert de l'énergie électrique entre les différents composants du système. Notamment entre le panneau solaire et l'électrolyseur.



Figure II.8: Les câbles de raccordement

- **Les vis de fixation**

C'est un élément mécanique, comportant une tige filetée et une tête; il est destiné à réaliser la fixation de plusieurs pièces de système de manière solide.

Dans notre expérience, des vis de fixation ont été utilisées pour fixer les électrodes et les collecteurs de gaz au couvercle de la cellule d'électrolyse de l'eau.

La fixation par vis crée une liaison-plan sur démontable, ce qui facilite le remplacement ou la maintenance des électrodes lorsque nécessaire, et donc la possibilité de modifier le système sans endommager les autres composants [26].



Figure II.9: Vis de fixation

- **Les bouteilles de stockage**

Afin de compléter l'autre chaîne de production d'hydrogène, ce prototype a utilisé une bouteille en métal résistante à la corrosion et à la pression, recyclée à partir d'une bouteille d'extincteur. Celle-ci a été modifiée pour agir comme cuve de stockage des deux gaz produits par le processus d'électrolyse de l'eau.

Il a été mis en place pour stocker l'hydrogène, avec une structure garantissant une isolation complète du gaz et éviter toute fuite. Le gaz ne peut s'échapper que par une vanne installée dans la partie supérieure, permettant un contrôle précis du débit. Il était relié à la cellule d'électrolyseur par d'un tube qui permettait de transporter le gaz.

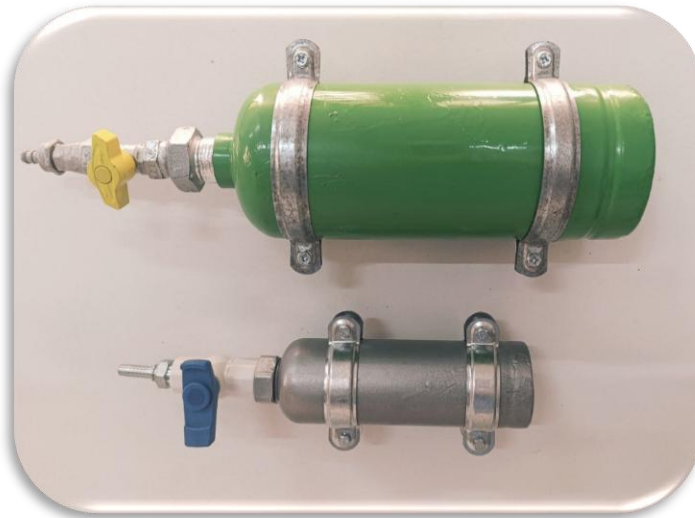


Figure II.10: Les bouteilles de stockage

La bouteille destinée à l'hydrogène a une hauteur de 25 cm et un diamètre de 10 cm, tandis que la bouteille utilisée pour l'oxygène mesure 18 cm de hauteur pour un diamètre de 6 cm.

II.4.4. Les appareils de mesure

- **Le multimètre**

Il est également appelé appareil de mesure multifonctions, est un outil utilisé pour mesurer plusieurs grandeurs électriques telles que : la tension, le courant et la résistance, la température.

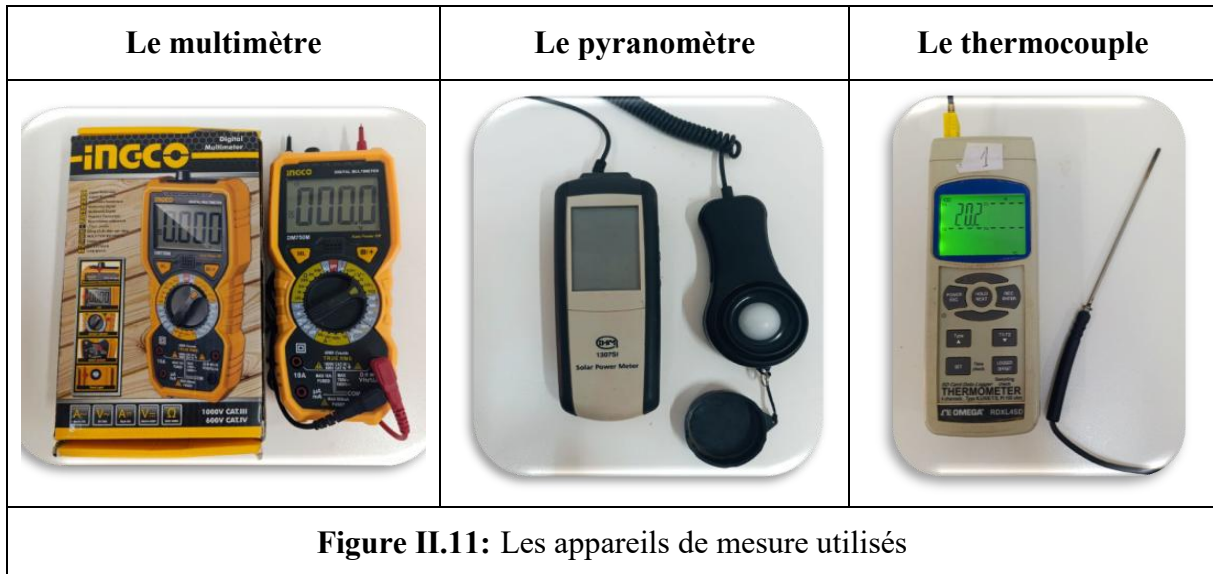
- **Le pyranomètre**

Un pyranomètre est un capteur utilisé pour mesurer l'irradiance solaire dans le spectre visible. La mesure est absolue (et non relative). L'unité de mesure est le : W/m^2

- **Le thermocouple**

Le thermocouple est un capteur permettant de mesurer la température en (**Kelvin** ou en $^{\circ}\text{C}$).

Il est utilisé ici pour surveiller la température de l'eau pendant l'électrolyse ainsi que celle de la cellule photovoltaïque dans le système.



II.5. Schéma de fonctionnement du prototype

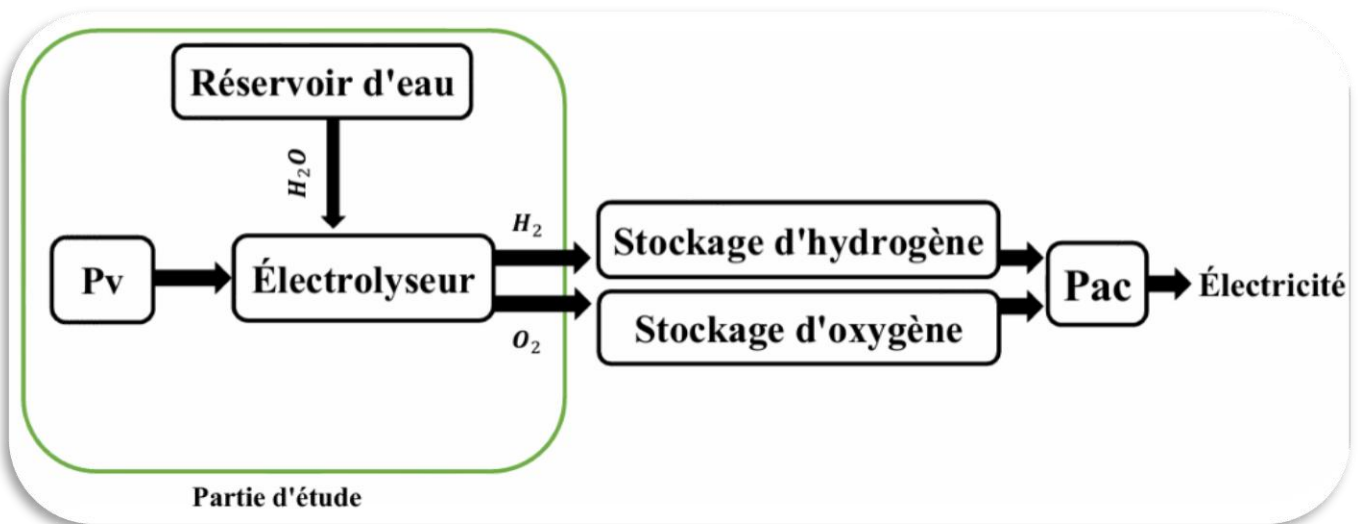


Figure II.12: Schéma de fonctionnement du prototype.

Le figure (II.14) montre un prototype expérimental du processus de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire, à l'aide d'un électrolyseur alimenté par des panneaux photovoltaïques. Bien que le système actuel se limite à l'étape de production, des éléments visuels symbolisant les étapes de stockage et d'utilisation ont été intégrés, afin d'expliquer le principe de fonctionnement de l'ensemble de la chaîne de l'hydrogène solaire.

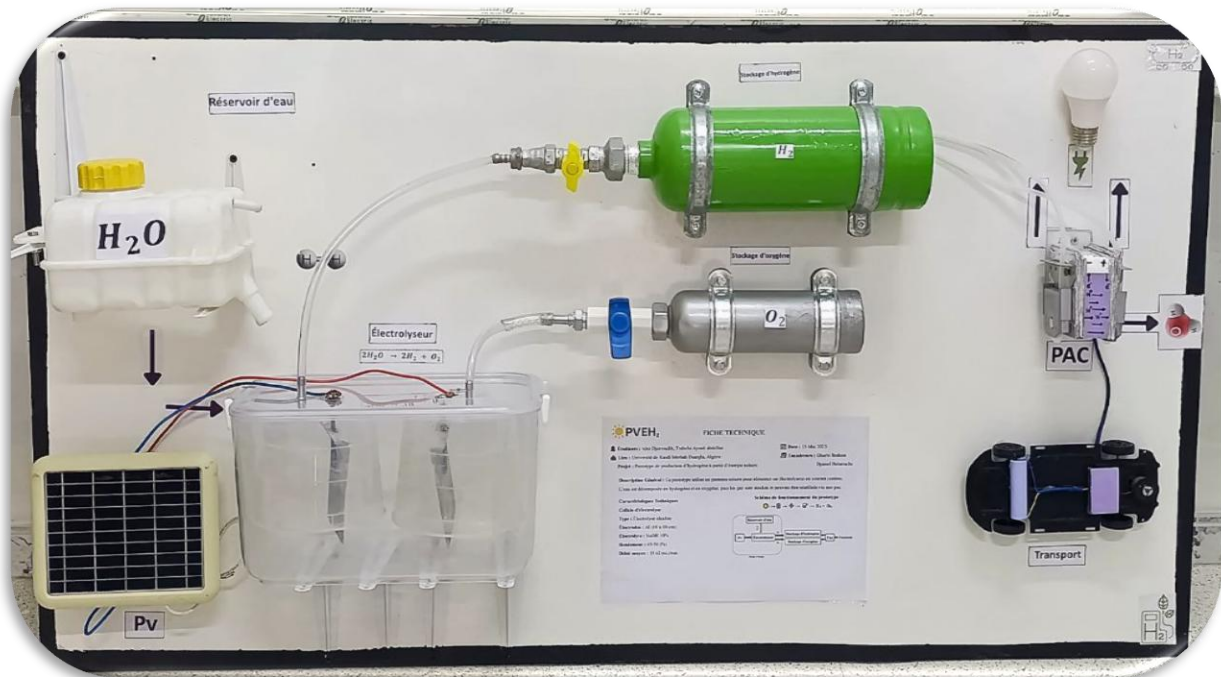


Figure II.13 : Le prototype expérimental $PVEH_2$ de production d'hydrogène solaire avec représentation symbolique du stockage et de l'utilisation.

II.5. Les paramètres mesurables du système

Dans ce travail expérimental, nous avons surveillé et mesuré plusieurs paramètres principaux qui ont une relation significative avec le processus de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en utilisant l'énergie solaire.

Ces mesures permettent de calculer la quantité d'hydrogène produite, de comprendre l'efficacité du procédé, ainsi que l'influence des conditions environnementales sur la performance globale du système.

II.5.1. Le rayonnement solaire

Nous avons analysé le rayonnement solaire pour estimer la quantité d'énergie que le soleil peut fournir pendant une journée, dans le but d'évaluer la capacité des panneaux solaires à fournir au système l'énergie suffisante et ainsi déterminer la capacité de produire de l'hydrogène. Un appareil de mesure du rayonnement solaire a été installé sur les panneaux utilisés dans le prototype, et des données ont été recueillies pour caractériser les conditions de rayonnement et analyser leur impact sur le système.

II.5.2 Le courant qui traverse l'électrolyseur

Le courant est mesuré en utilisant l'ampèremètre. Il est connecté en série avec l'électrolyseur électrique et le panneau d'alimentation principal.

II.5.3. La puissance absorbée par l'électrolyse

Est la puissance consommée par l'électrolyseur pour électrolyser l'eau, et dépend directement de la tension appliquée et de l'intensité du courant traversant le système.

$$P_{el} = I.V \quad (II.1)$$

II.5.4. Le volume de production d'hydrogène

Par l'utilisation de la loi de gaz parfaits et la loi de Faraday, le volume de gaz d'hydrogène produite est calculé par l'équation suivante :

$$PV_{H_2} = nRT \quad (II.2)$$

$$V_{H_2} = \frac{nRT}{P} = Q_{H_2} \cdot t \quad (II.3)$$

$$n = \frac{I.t}{Z.F} \quad (II.4)$$

En combinant les deux équations (III.3) et (III.4), on obtient la formule finale pour calculer le volume de gaz hydrogène produit :

$$V_{H_2} = \frac{I.t.R.T}{Z.F.P} \quad (II.5)$$

V_{H_2} : volume d'hydrogène produit pendant l'électrolyse (litre).

Q_{H_2} : débit molaire de production d'hydrogène (ml/s).

n : quantité d'hydrogène produite en mols.

P : Pression atmosphérique (1 atm).

R : constante des gaz parfaits (0,0821 L.atm/mol.k).

t : durée de fonctionnement de l'électrolyse (en secondes).

T : température en kelvins (k).

Z : nombre d'électrons nécessaires pour former une molécule de gaz (pour H_2 , $Z = 2$).

F : constante de Faraday (96 485 C/mol).

I : courant de fonctionnement d'électrolyseur (en A).

II.5.5. Le rendement d'électrolyseur

$$\eta_{el} = \frac{E_{utile}}{E_{electrique}} \times 100\% \quad (II.6)$$

$$E_{utile} = m \times HHV \quad (II.7)$$

$$E_{electrique} = P \times t = U \times I \times t \quad (II.8)$$

η_{el} : le rendement énergétique du processus d'électrolyse (%).

E_{utile} : l'énergie chimique stockée dans l'hydrogène produit par électrolyse (Joule).

$E_{electrique}$: l'énergie électrique consommée par l'électrolyseur (Joule).

m : la masse d'hydrogène (en kg).

HHV : ou (PCS) Pouvoir Calorifique Supérieur de l'hydrogène (J/Kg).

P : La puissance électrique (watt).

II.7.Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée le prototype expérimental conçu pour la production d'hydrogène vert dans la région de Ouargla, reconnue pour son fort ensoleillement et son potentiel élevé en énergies renouvelables. L'ensemble des composants du système a été décrit, notamment les panneaux photovoltaïques, l'électrolyseur alcalin, les électrodes, les dispositifs de mesure, les réservoirs, ainsi que les éléments auxiliaires, en plus du schéma global de fonctionnement.

Le prototype repose sur un couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur, sans recours aux batteries ni aux dispositifs électroniques complexes. Cette configuration vise à réduire les coûts et à simplifier l'exploitation, tout en assurant une production efficace dans des conditions réelles.

Une attention particulière a été accordée à la surveillance des paramètres clés du système : le rayonnement solaire, le courant électrique, la puissance absorbée, le volume d'hydrogène produit et le rendement énergétique du processus. Ces données ont été collectées toutes les 30 minutes, de 08h00 jusqu'au coucher du soleil, durant la période expérimentale allant du 18 au 27 mai 2025.

L'ensemble de ces éléments constitue une base solide pour l'analyse approfondie des performances du système, qui sera développée dans le chapitre suivant, dans l'objectif d'évaluer sa viabilité technique et énergétique dans un contexte saharien réel.

Chapitre IV : Évaluation économiques et environnementaux

Chapitre IV

IV.1. Introduction

Dans le cadre des efforts constants vers des pratiques durables et de la réduction de l'empreinte carbone, l'hydrogène représente une option essentielle pour façonner l'avenir des industries. La compréhension des complexités liées au prix de l'hydrogène est une condition préalable pour assurer une adoption efficace et économiquement viable de cette source d'énergie prometteuse [27].

Le coût de l'hydrogène varie en fonction de ses types (gris, bleu, vert), ainsi que selon le prix de l'électricité et de nombreuses variables qui influent sur le prix final. Dans le contexte de la transition vers une économie à faible émission de carbone, l'analyse de la faisabilité économique de ce projet est une chose importante qui nécessite une compréhension précise de ces variables.

IV.2. Coûts de production et d'installation

Les coûts de production de l'hydrogène sont donnés en fonction du coût de l'énergie électrique consommée par l'électrolyseur. Ces coûts prennent en compte les différents coûts liés à l'investissement (investissement initial, coût de maintenance et d'exploitation,...) et les coûts de production [28].

Comme le calcul du prix de l'hydrogène comprend plusieurs aspects, l'industrie a établi une méthode standard de se référer au coût de production de l'hydrogène, connu sous le nom de coût nivelé de l'hydrogène (**LCOH - Levelised Cost of Hydrogen**). Il sert de mesure cruciale qui englobe le coût total de la production d'hydrogène sur l'ensemble de son cycle de vie, ce qui en fait un outil fondamental pour la prise de décisions et les stratégies d'investissement.

Il offre un aperçu complet, aidant les entreprises à évaluer la viabilité et la compétitivité de l'hydrogène vert par rapport aux sources d'énergie traditionnelles telles que l'hydrogène gris ou noir [28].

$$\text{LCOH} = C_{\text{totale}} / m_{\text{H}_2} \quad (\text{IV. 1})$$

$$C_{\text{totale}} = (C_{\text{in inv}} + C_{\text{m\&e}} + C_{\text{rem}}) \quad (\text{IV.2})$$

LCOH: coût nivelé de l'hydrogène en **DZD/kg**

C_{total} : coût total du projet en **DZD**

$C_{\text{in inv}}$: coût initial d'investissement en **DZD**

$C_{\text{m\&e}}$: coût de maintenance et exploitation en **DZD**

C_{rem} : coût de remplacement en DZD

m_{H_2} : masse totale d'hydrogène produite en kg

IV.2.1. Coût initial d'investissement

Comprend toutes les dépenses nécessaires pour l'équipement et les installations de base requises pour le démarrage du projet de production d'hydrogène (panneaux solaires, électrolyseur, batteries, etc...)

$$C_{in\ inv} = C_{pv} + C_{el} + C_{autre} \quad (IV.3)$$

$C_{in\ inv}$: coût initial d'investissement

C_{pv} : coût des panneaux photovoltaïques

C_{el} : coût de l'électrolyseur

C_{autre} : coût des composants auxiliaires (les supports , les vis de fixation, les câbles ..).

$$C_{pv} = Cap_{pv} \times P_{max} \quad (IV.4)$$

$$C_{el} = C_{eld} + C_{cuv} + C_{coll} \quad (IV.5)$$

Cap_{pv} : capitale du système PV (DZD/W).

P_{max} : puissance maximale du système PV (W).

C_{eld} : coût des électrodes.

C_{cuv} : coût de la cuve.

C_{coll} : coût du collecteur.

IV.2.2. Coût de maintenance et exploitation

Le coût d'exploitation et de maintenance (M&E), représente l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement un système. les frais (M&E) sont essentiellement [29]:

- La surveillance périodique.
- L'entretien périodique des composants du système.

$$C_{m\&e} = C_{m.pv} + C_{m.el} \quad (IV.6)$$

$$C_{m.pv} = \varphi * C_{pv} \quad (IV.7)$$

$$C_{m.el} = \varphi * C_{el} \quad (IV.8)$$

$C_{m.pv}$: coût de maintenance du panneau photovoltaïque.

$C_{m.el}$: coût de maintenance de l'électrolyseur.

φ : Rapport des coûts de maintenance

IV.2.3. Coût de remplacement

$$C_{rem} = C_{rem.el} = C_{eld} \times n \quad (IV.9)$$

$C_{rem.el}$: coût de remplacement (Remplacement les électrodes chaque année pendant n ans).

n : durée de vie du système ($n = 10$ ans).

IV.3. Revenus et bénéfices du projet

IV.3.1. Prix de vente de l'hydrogène

$$P_{vente} = LCOH \times (1 + \text{Marge en } \%) \quad (IV.10)$$

P_{vente} : prix de vente de l'hydrogène.

Marge : Taux de bénéfice.

IV.3.2. Revenus totaux

Ils représentent les recettes potentielles générées par la production d'hydrogène. Ils permettent d'estimer les revenus totaux du projet et s'expriment dans la formule suivante :

$$\text{Revenu} = P_{vente} \times m_{H_2} \quad (IV.11)$$

P_{H_2} : masse totale d'hydrogène produite **Kg**

IV.3.3. Bénéfice net

$$B_{net} = \text{Revenu} - C_{totale} \quad (IV.12)$$

Lorsque le bénéfice net calculé est positif, cela indique que les revenus générés par la vente d'hydrogène couvrent l'ensemble des coûts d'investissement et d'exploitation, tout en générant un excédent financier. Par conséquent, le projet peut être considéré comme économiquement rentable au cours de la période étudiée.

IV.4. Estimation des données économiques du système

Le Tableau (IV.1) présente les données économiques des panneaux photovoltaïques utilisés dans l'étude. Chaque panneau possède une durée de vie de 25 ans et un coût d'investissement de 70 DZA/W, selon sa capacité (12 W, 15 W ou 150 W). Les frais de Maintenance et Exploitation (M&E) sont estimés à 8 %, et aucun remplacement n'est prévu sur la durée du projet. Ces paramètres permettent d'évaluer la rentabilité économique du système de production d'hydrogène vert.

Tableau IV.1 : Les données économiques du panneau photovoltaïque

Pv	Durée de vie	Capacité	Capital	M&E	Remplacement
Type 01	25 ans	150 W	70 DZD/W	8%	/
Type 02		12 W			
Type 03		15 W			

Le Tableau (IV.2) présente les données économiques de l'électrolyseur utilisé dans le système expérimental. La durée de vie de l'électrolyseur est estimée à 10 ans. Les électrodes, quant à elles, ont une durée de vie plus courte et doivent être remplacées une fois par an. Le coût de remplacement annuel des électrodes est évalué à $200 \text{ DZD} \times 10 = 2000 \text{ DZD}$. Les frais de Maintenance et Exploitation (M&E) sont estimés à 10 %, ce qui reflète un entretien plus soutenu par rapport aux panneaux photovoltaïques. Ces éléments sont pris en compte pour estimer le coût total d'exploitation du système sur toute la durée du projet, et permettent une évaluation économique plus réaliste de la production d'hydrogène vert.

Tableau IV.2 : Les données économiques de l'électrolyseur

électrolyseur	Durée de vie	M&E	Remplacement
électrode collecteurs cuve	1 an pour les électrode	10%	$200 \text{ DZD} \times 10$

IV.5. Analyse économique du système de production d'hydrogène

Après avoir réalisé les simulations et calculs techniques à l'aide du programme **MATLAB**, une analyse économique afin d'évaluer la viabilité financière du système de production d'hydrogène étudié. Le tableau suivant présente des résultats économiques complètes associée à la production d'hydrogène vert, basée sur trois expériences.

Tableau IV.3 : Les résultats de calcul économique.

Expériences	$C_{in\ inv}$ (Dzd)	$C_{m\&e}$ (Dzd)	C_{rem} (Dzd)	C_{totale} (Dzd)	LCOH (Dzd/kg)	P_{vente} (Dzd)	Revenu (Dzd)	B_{net} (Dzd)
Expérience 01 Cas 01	11950	9550	2000	23500	2539.8	3301.74	30549.6	7049.6
Expérience 01 Cas 02	11950	9550	2000	23500	2375.6	3088.3	30550	7050
Expérience 02	2290	1822	2000	6112	1979.3	2573.1	7945.6	1833.6
Expérience 03	2500	1990	2000	6490	2007.7	2610	8437	1947

La figure (IV.1) représente la variation de la masse d'hydrogène et du coût total de production selon trois expériences : On observe que les expériences Exp01_cas01 et Exp01_cas02 présentent les productions les plus élevées, mais aussi les coûts totaux les plus importants. À l'inverse, les expériences Exp02 et Exp03, bien que moins coûteuses, présentent une production plus faible. Donc ce graphe montre une relation directe entre le coût total de production et la quantité d'hydrogène produite. Elle souligne ainsi la nécessité d'un compromis entre performance technique et viabilité économique dans le choix du système de production.

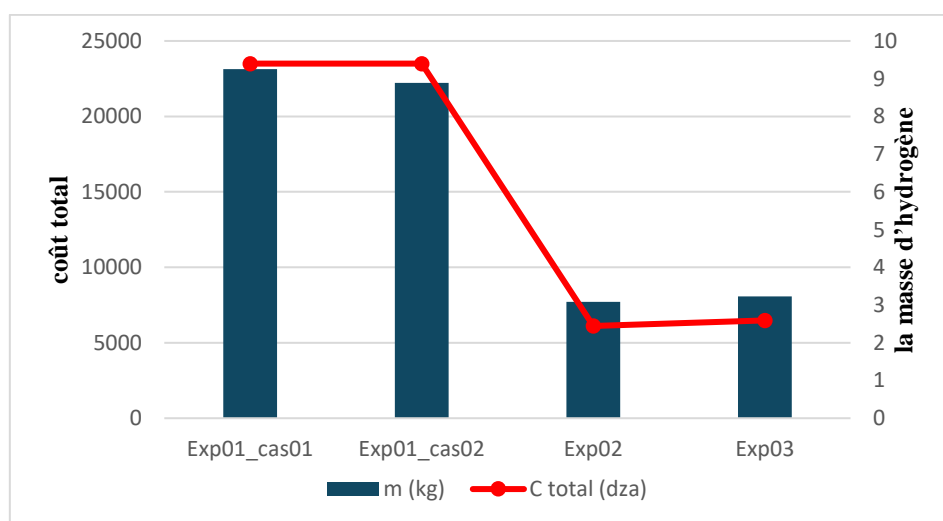


Figure IV.1 : Variation de la masse d'hydrogène et du coût total de production selon les différentes expériences.

La figure (IV.2) représente le évolution du coût nivelé de l'hydrogène (LCOH, exprimé en DZD/kg) à la masse totale d'hydrogène produite dans chaque expérience. On observe que les expériences Exp01_cas01 et Exp01_cas02, bien qu'ayant généré les productions les plus importantes, présentent également un coût LCOH relativement élevé. À l'inverse, les expériences Exp02 et Exp03, avec une production plus réduite, affichent un LCOH plus faible.

Cette variation indique que l'augmentation de la production n'est pas toujours un indicateur de performance économique. En réalité, c'est l'équilibre entre le volume de production, l'efficacité du système et le coût global qui constitue le facteur déterminant pour assurer la viabilité économique d'un système de production d'hydrogène.

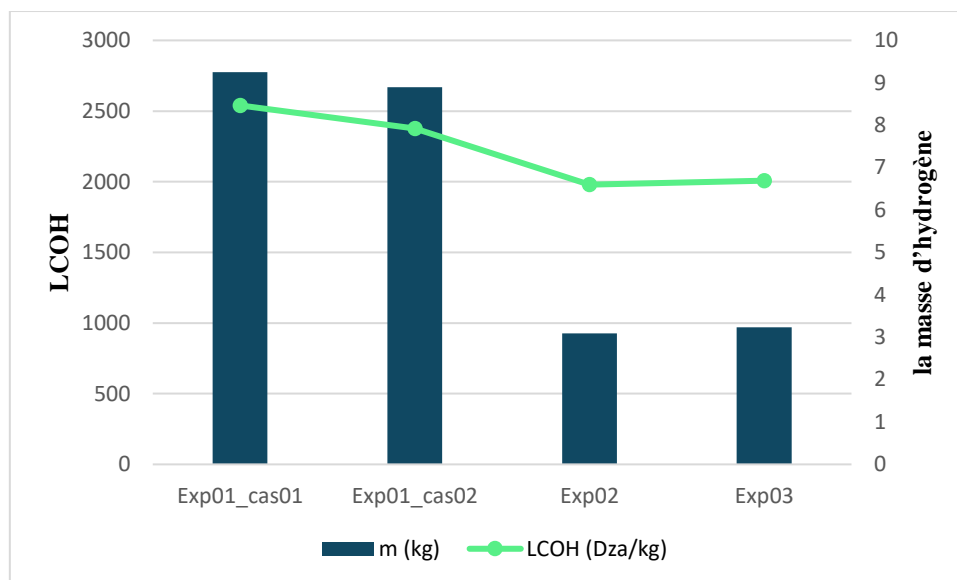


Figure IV.2 : Évolution du coût nivelé de l'hydrogène (LCOH) en fonction de la masse produite selon les différentes expériences.

La figure (IV.3) représente la comparaison entre le coût total et le bénéfice net pour chaque expérience. On remarque que le bénéfice net correspond à environ 30 % du coût total, ce qui confirme l'application d'une marge fixe. Ce graphique montre clairement que la réduction des coûts permet d'augmenter les bénéfices.

Des pistes comme la baisse des coûts fixes ou l'augmentation du prix de vente peuvent ainsi améliorer la rentabilité du système.

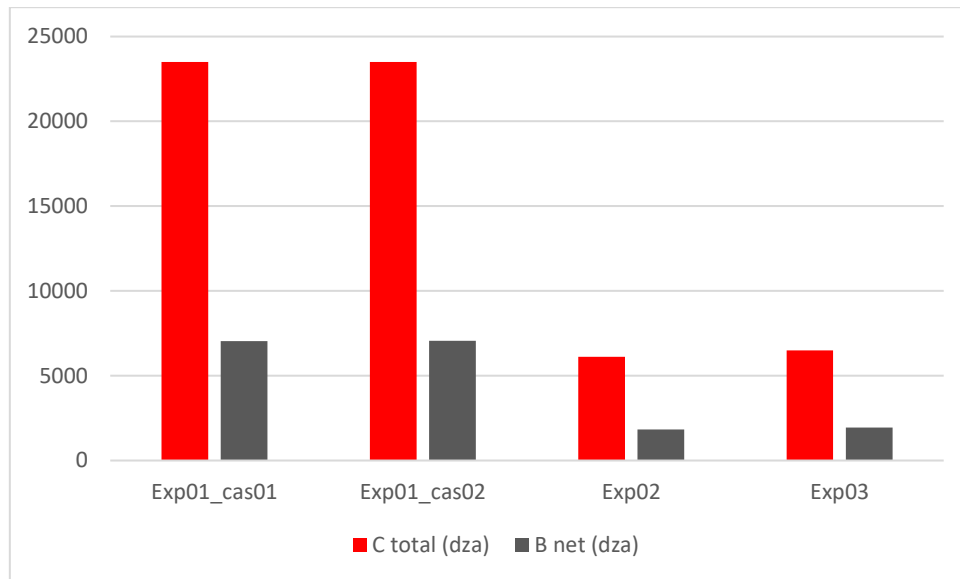


Figure IV.3 : Comparaison entre le coût total et le bénéfice net.

IV.6. Impacts environnementaux de la production d'hydrogène vert

- **Réduction des émissions de CO_2**

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant de transition énergétique propre suscite une attention croissante, tant dans l'industrie que dans la recherche universitaire. L'hydrogène a le potentiel de révolutionner notre façon de vivre dans de nombreux domaines, de la production d'acier et des transports au chauffage et à la production d'énergie. De plus, c'est une source d'énergie propre aux multiples usages, ce qui en fait une option attractive pour ceux qui recherchent des alternatives aux combustibles fossiles [30].

L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables comme le solaire, représente une solution concrète pour la décarbonation de plusieurs secteurs. Dans cette optique, notre étude expérimentale réalisée dans la région de Ouargla a permis de valider la faisabilité d'un système local et autonome de production d'hydrogène propre. Grâce à un prototype combinant des panneaux photovoltaïques à un électrolyseur, nous avons pu produire de l'hydrogène sans émission directe de CO_2 . Nos résultats ont montré qu'un panneau de 150 W permet de générer jusqu'à 30,112 L d'hydrogène, soit 2,710 g, avec un rendement compris entre 8,7 % et 9,4 %. Les panneaux de 12 W et 15 W ont respectivement produit 9,4 L (0,846 g) et 9,84 L (0,886 g), avec des rendements atteignant jusqu'à 50 %. Ces résultats confirment que, même à petite échelle, une production d'hydrogène solaire est non seulement possible, mais efficace énergétiquement.

Les données de la Figure (IV.4) renforcent cette conclusion en comparant les émissions de CO_2 selon le type d'hydrogène produit. L'hydrogène vert présente de loin le plus faible niveau d'émissions, bien en dessous de l'hydrogène gris, bleu ou jaune, dont la production s'accompagne d'émissions significatives liées aux combustibles fossiles, aux fuites de méthane ou aux processus de capture et stockage du carbone (CCUS).

En remplaçant partiellement ou totalement les sources fossiles par un tel système, notamment dans des applications locales ou décentralisées, il est possible de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre. Ce travail met en lumière le rôle que peut jouer une solution simple, accessible et adaptée aux conditions sahariennes, dans la transition vers une économie bas carbone.

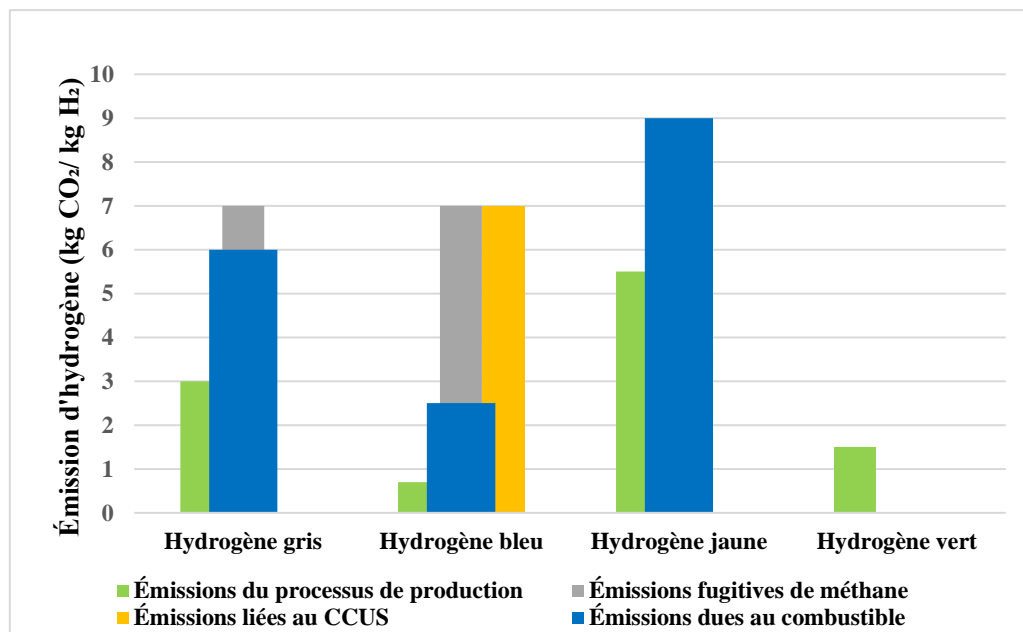


Figure IV.4 : Comparaison des émissions de CO_2 selon le type d'hydrogène produit [31].

IV.7. Intégration du projet de production d'hydrogène vert dans la transition énergétique

Bien que le prototype réalisé dans ce projet soit de petite échelle, il constitue une démonstration concrète du potentiel de la région de Ouargla pour s'engager activement dans la transition énergétique. En exploitant l'abondance du rayonnement solaire local et en mettant en œuvre un système autonome combinant panneaux photovoltaïques et électrolyseur, notre étude a prouvé la faisabilité technique de produire de l'hydrogène vert dans des conditions sahariennes réelles.

Les résultats obtenus, avec une production allant jusqu'à 30,112 L d'hydrogène (2,710 g) pour un panneau de 150 W, montrent que même à petite échelle, des quantités significatives peuvent être générées de manière propre et durable. Ce type d'initiative expérimentale pose les bases pour des projets plus larges, adaptables aux besoins énergétiques locaux, notamment dans les zones isolées ou hors réseau.

La région de Ouargla, historiquement ancrée dans l'industrie pétrolière, possède déjà des compétences techniques et des infrastructures énergétiques solides. Notre projet propose une voie de reconversion intelligente de ces ressources humaines et matérielles vers des filières durables comme l'hydrogène vert. Cette intégration régionale ouvre ainsi des perspectives de développement local, de valorisation des ressources naturelles et de création d'une économie énergétique bas carbone dans le sud algérien.

IV.8. Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer la faisabilité économique et environnementale de la production d'hydrogène vert. Malgré le coût élevé de l'investissement initial, les résultats ont montré que le projet peut être rentable, en particulier dans les zones ensoleillées comme Ouargla. Le calcul du coût nivelé de l'hydrogène (LCOH) constitue également un outil efficace pour fixer un prix de vente de l'hydrogène qui couvre non seulement les coûts, mais qui intègre également une marge de bénéfice raisonnable.

Sur le plan environnemental, elle permet une production sans émissions de CO_2 , contribuant ainsi à la protection du climat. Cette solution est particulièrement adaptée aux régions ensoleillées comme le sud algérien et représente une voie prometteuse pour un développement durable et une transition énergétique propre.

Enfin, l'intégration de ce projet dans la transition énergétique régionale représente une opportunité stratégique pour valoriser les ressources locales, encourager l'innovation technologique et favoriser un développement durable dans les régions du sud algérien.

Ce travail expérimental répond aux objectifs nationaux en matière de diversification énergétique, en intégrant l'hydrogène vert comme solution innovante et propre.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Face aux enjeux croissants liés au changement climatique, à la raréfaction des ressources fossiles et à l'augmentation continue de la demande énergétique mondiale, l'hydrogène vert se présente aujourd'hui comme une alternative crédible et durable. Il s'agit d'un vecteur énergétique propre, polyvalent, et dont la production peut être assurée à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire.

Ce travail s'est inscrit dans cette dynamique en explorant la faisabilité technique, environnementale et économique de la production d'hydrogène vert dans la région de Ouargla, l'une des zones les plus ensoleillées du territoire algérien. Après une revue approfondie des caractéristiques de l'hydrogène, de ses modes de production, de stockage et de ses applications potentielles, nous avons conçu et réalisé un prototype expérimental basé sur l'électrolyse de l'eau alimentée par des panneaux photovoltaïques.

Les résultats expérimentaux ont démontré la viabilité de ce système dans les conditions réelles de Ouargla. Différents types de panneaux solaires ont été testés afin d'optimiser le rendement et la quantité d'hydrogène produite. Il a été observé que le choix des composants, la méthode de connexion ainsi que les paramètres comme la luminosité, la température et l'électrolyte influencent fortement la performance du système.

D'un point de vue économique, l'analyse du coût nivelé de l'hydrogène (LCOH) a permis d'identifier les facteurs clés influençant la rentabilité d'un tel projet. Bien que l'investissement initial reste relativement élevé, notamment en raison du coût des panneaux solaires et de l'électrolyseur, les résultats obtenus montrent que le projet devient économiquement intéressant dans les régions à fort potentiel solaire comme Ouargla, en particulier à moyen et long terme.

Sur le plan environnemental, l'un des avantages majeurs de ce système est l'absence totale d'émissions de CO_2 lors de la production de l'hydrogène, ce qui en fait une solution compatible avec les objectifs de neutralité carbone et les engagements climatiques internationaux.

Ce projet contribue donc non seulement à la diversification du bouquet énergétique national, mais également à la réduction de l'empreinte carbone du secteur de l'énergie en Algérie.

En somme, ce travail a permis de :

Vérifier expérimentalement la faisabilité technique de la production d'hydrogène vert dans des conditions sahariennes.

Identifier les paramètres influents sur la performance du système.

Évaluer la viabilité économique et environnementale d'un tel projet à l'échelle locale.

Conclusion générale

Ces résultats ouvrent la voie à de nombreuses perspectives de recherche et de développement.

À ce titre, nous formulons les recommandations suivantes :

- Utiliser des électrodes de plus grande taille, conçues à partir de matériaux conducteurs et résistants à la corrosion (comme le nickel ou l'acier inoxydable), afin d'augmenter la quantité d'hydrogène produite et d'optimiser l'efficacité du processus d'électrolyse.
- Adapter le dimensionnement du panneau photovoltaïque à l'électrolyseur en calculant le nombre de panneaux en série et en parallèle pour correspondre à la tension et au courant requis, afin d'assurer un fonctionnement optimal du système.
- Intégrer un système de stockage (batteries ou hydrogène) pour compenser l'intermittence du solaire et garantir une alimentation continue de l'électrolyseur.
- Valoriser l'énergie solaire locale dans les régions du Sud afin de développer des filières énergétiques durables et renforcer l'économie locale par la création d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables.
- Renforcer l'intégration de l'hydrogène vert dans les stratégies nationales en encourageant les investissements et en accélérant la transition énergétique.

Enfin, ce travail représente une première étape vers une meilleure compréhension du potentiel de l'hydrogène vert en Algérie. Il constitue une base solide pour le développement futur de projets énergétiques durables dans les régions sahariennes, en alignement avec les objectifs nationaux de transition énergétique et de développement durable.



Références bibliographique

Références bibliographique

Références bibliographique

- [1] Pascal Mauberger.' L'Hydrogène, vecteur de la transition énergétique.www.mcphy.com/fr/
- [2] BOUAZIZ Nasreddine & ALLAM Abdelmoumen.Dimensionnement d'un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert. Mémoire de Master en génies mécaniques. Université Kasdi Merbah, Ouargla (2023) : p 03.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>
- [4] France Hydrogène. (2018). Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène (Fiche 1.2, Révision de février 2018). Afhyac. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie>
- [5] iFP energiesnouvelles. Tout savoir sur l'hydrogène. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr>
- [6] KHERIDLA Youcef .KHINECHE Kaddour.Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque . Mémoire de Master en Electrotechnique Industriel. Université Kasdi Merbah, Ouargla (2014): p 05.
- [7] Mme AZIZI Amina.Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride. Thèse Doctorat.Université Mokhtar Badji, Annaba(2019) :p 03,04.
- [8] H. Derbal, M. Belhamel et A. M'Raoui.L'hydrogène, vecteur énergétique solaire.Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 235.
- [9] Boudebouze Nour El-Houda.Etude des propriétés physiques des métaux pour le stockage d'hydrogène.Mémoire de Master en Physique de la Matière Condensée.Université de 08 Mai 1945-Guelma (2022) : p 08.
- [10] L'hydrogène aujourd'hui et demain. Rapport de l'Académie des sciences - 9 avril 2024.https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/doc_strategie_nationale_hydrogene_v.fr
- [11] Sekiou Yasmine .Dimensionnement d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque dans la région de Ouargla . Mémoire de Master en Génie chimique. Université Kasdi Merbah, Ouargla (2013) : p 06,07.
- [12] DANOUNE Mohammed Bilal .Étude d'un système d'énergies renouvelables à base d'hydrogène vert .Thèse Doctorat. Université Kasdi Merbah, Ouargla (2021) :p 27,28.

Références bibliographique

- [13] Xavier Vigor. Chimie et énergies nouvelles. Vision de l'hydrogène pour une énergie décarbonée. https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Energies_nouvelles
- [14] Zhang, F., et al., The survey of key technologies in hydrogen energy storage. International Journal of Hydrogen Energy, 2016.
- [15] M. Schmitt and P. Jonville, Le stockage de l'hydrogène et les problèmes qui s'y rattachent, Institut Battelle, Genève, Suisse, présenté à la conférence Énergie dans le monde : conséquences sur la production et l'utilisation d'énergie électrique, Biarritz, France, 30 septembre – 1er octobre 1975.
- [16] HYDROGEN EUROPE. Tech-Overview_Hydrogen Applications <https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/>
- [17] Stratégie Nationale de Développement de l'Hydrogène en Algérie . Septembre 2023. <https://www.energy.gov.dz>
- [18] Connaissance des Énergies. Stocker l'hydrogène dans du sel pour accélérer la transition énergétique 2025 <https://www.connaissancedesenergies.org>
- [19] AIE – Agence Internationale de l'Énergie. L'avenir de l'hydrogène : Saisir les opportunités d'aujourd'hui .2019. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [20] Dr. Daden abd el ghafour .Les sources d'énergie en Algérie (2025):page 66
- [21] C. Féraud, « Ouargla, sultane des oasis », Revue africaine, no. 30, p. 159, 1886.
- [22] N. Koull et M.T. Halilat. Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algérie)", Étude et Gestion des Sols, vol. 23, no. 1, pp. 9–19, 2016.
- [23] Zinedine.gueddal et amina. Belmahi. The Solar energy as a step to restructure the electrical energy sector in Alegria - An Analytical vision (2022-2010).
- [24] Energy Capital & Power. <https://energycapitalpower.com/algerias-strategic-energy>
- [25] Mr M'RAOUI Abdelhamid. Étude de la production d'hydrogène par des sources renouvelables. Thèse Doctorat. Université ABOU-BEKR BELKAID, TLEMCEM (2018).
- [26] Medaoui Younes et Kabouch Mohamed. Réalisation d'un générateur d'hydrogène. Mémoire de Master en ingénierie de production. Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen (2016 2017).

Références bibliographique

- [27] Stargate Hydrogen.hydrogen Price calculation <https://stargatehydrogen.com>
- [28] European hydrogen observatory.Levelised Cost of Hydrogen (LCOH) Calculator Manual, June 2024 <https://observatory.clean-hydrogen.europa>.
- [29] Chennouf Nasreddine. perspectives de developpement de la production industrielle de l'hydrogene dans le sud algerien a partir des energies renouvelables.Thèse Doctorat. Université Kasdi Merbah, Ouargla (2014): p 87
- [30] RSC Publishing – Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/gc/d3gc02410e>
- [31] A. Ajanovic, M. Sayer, and R. Haas, “The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen,” International Journal of Hydrogen Energy, Jul. 2022.

Résumé

Dans le cadre de la transition énergétique et de la recherche de solutions durables à faible émission de carbone, cette étude vise à mener une expérimentation sur la production d'hydrogène vert dans la région de Ouargla. Un prototype a été conçu, composé d'un panneau photovoltaïque alimentant un électrolyseur pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Des essais ont été réalisés avec trois panneaux différents. Le panneau de 150 W a généré jusqu'à 30,112 L d'hydrogène (2,710 g) avec un rendement de 8,7 % à 9,4 %. Les panneaux de 12 W et 15 W ont produit respectivement 9,4 L (0,846 g) et 9,84 L (0,886 g), avec des rendements entre 42–46 % et 44–50 %. Ces résultats révèlent un compromis entre quantité produite et efficacité selon la puissance utilisée. Une évaluation économique et environnementale a également été menée, soulignant la viabilité du projet et le fort potentiel de la région de Ouargla pour développer l'hydrogène vert et l'intégrer dans la stratégie énergétique nationale.

Mots clés : Hydrogène vert, prototype, électrolyse de l'eau, énergie solaire, Ouargla, transition énergétique.

ملخص

في إطار التحول الطاقوي والبحث عن حلول مستدامة منخفضة الانبعاثات الكربونية، تهدف هذه الدراسة إلى إجراء تجربة عملية حول إنتاج الهيدروجين الأخضر في منطقة ورقلة. تم تصميم نموذج أولي يتكوّن من لوح شمسي يزوّد محلاً كهربائياً بالطاقة من أجل إنتاج الهيدروجين عبر التحليل الكهربائي للماء. وقد أجريت اختبارات باستخدام ثلاثة أنواع مختلفة من الألواح الشمسية. حيث أنتج اللوح ذو قدرة 150 واط ما يصل إلى 30.112 لترًا من الهيدروجين (2.710 غرام) بكفاءة تتراوح بين 8.7% و9.4%. أما اللوحان بقدرة 12 واط و15 واط، فقد سُجّلت لديهما كميات إنتاج بلغت على التوالي 9.4 لترًا (0.846 غ) و9.84 لترًا (0.886 غ)، مع مردود يتراوح بين 42–46% و44–50%. تكشف هذه النتائج عن وجود توازن بين كمية الإنتاج وكفاءة النظام حسب قدرة اللوح المستخدم. كما تم إجراء تقييم اقتصادي وبيئي يؤكد قابلية المشروع للتطبيق، ويبرز الإمكانيات الكبيرة لمنطقة ورقلة في تطوير الهيدروجين الأخضر ودمجه في الإستراتيجية الوطنية للطاقة.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين الأخضر، النموذج الأولي، التحليل الكهربائي للماء، الطاقة الشمسية، ورقلة، التحول الطاقوي.

Abstract

As part of the energy transition and the search for sustainable low-carbon solutions, this study aims to conduct an experimental investigation into the production of green hydrogen in the Ouargla region. A prototype was designed, consisting of a photovoltaic panel powering an electrolyzer to produce hydrogen through water electrolysis. Tests were carried out using three different types of solar panels. The 150 W panel generated up to 30.112 liters of hydrogen (2.710 g) with an efficiency ranging from 8.7% to 9.4%. The 12 W and 15 W panels produced 9.4 L (0.846 g) and 9.84 L (0.886 g) respectively, with efficiencies ranging between 42–46% and 44–50%. These results highlight a trade-off between the quantity produced and system efficiency depending on the panel's power and operating conditions. An economic and environmental assessment was also conducted, confirming the project's viability and emphasizing the strong potential of the Ouargla region to develop green hydrogen and integrate it into the national energy strategy.

Keywords: Green hydrogen, prototype, water electrolysis, solar energy, Ouargla, energy transition.