

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Sciences de La Matière  
OPTION : Physique Énergétique et  
Energies Renouvelables



FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
N° : Ph/ENR/09/2024

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique  
Par : BOUSSAFI Salah et BENYOUB Nacera

**Installation de système de production  
d'hydrogène à l'aide d'un capteur  
photovoltaïque**

**Intitulé :**

**Soutenu devant le 12/06/2024 jury composé de :**

TAHROUR Farouk	MCA	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Président
MAHDI Khaled	MCA	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Rapporteur
SALMI Mohamed	Prof	Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Examineur
BAKHTI Yamna		Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	Incubateur d'entreprises
SAOUCHE Salime		Université Mohamed Boudiaf-M'Sila	RPE

**Année universitaire : 2023 /2024**

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la volonté et la patience pour nous avoir permis de mener à bien ce travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, Monsieur MAHDI Khaled, pour son soutien précieux et ses conseils éclairés tout au long du processus de rédaction de notre mémoire. Votre expertise, votre patience et votre engagement ont été d'une valeur inestimable, et Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à Monsieur SALMI Mohamed, Chef département de physique, pour son assistance. On 'adresse nos chaleureux remerciements à Monsieur TAHROUR Farouk, pour nos avoir fait l'honneur d'accepté de présider le jury, ainsi qu'à tout le personnel du département. Leur soutien et leur collaboration ont été inestimables.*

*Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers monsieur Youcef ingénieur de laboratoire de faculté des sciences.*

*Notre gratitude va à chacun d'entre vous pour votre contribution précieuse à notre mémoire. Votre soutien indéfectible a été un véritable moteur dans la réalisation de ce travail de recherche.*

*Que Dieu bénisse tous ceux qui ont été impliqués et nous ont aidés à atteindre ce stade.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*À mes chers parents, que Dieu les garde et les  
protège, que null dédicace*

*Je tiens également à adresser mes remerciements  
sincères à mes sœurs , ainsi qu'à  
mon frère., ainsi qu'à toute ma famille.*

*À ma cher copine et binôme B. Nacer, je te suis  
infiniment reconnaissant(e) d'avoir cru en moi et  
d'avoir été une part importante de cette étape de  
ma vie.*

*Je souhaite également exprimer ma gratitude à  
tous mes chers amis et à toute la promotion 2024.*

*À vous tous, mes proches et mes amis, je vous  
adresse mes plus sincères remerciements.*

*Avec une profonde gratitude,*

*B. Saleh*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à:*

*Mes chers parents, qui ont tout sacrifié pour que  
Je puisse arriver à ce stade-là, sans eux je n'aurais  
Jamais pu y arriver. Que dieu les garde pour moi.*

*Mes frères et ma sœur médecin qui m'ont soutenu  
Moralement tout au long de mon parcours*

*Universitaire. Et tout ma grande et petite famille*

*Ma chère copine et binôme Salah,*

*Mes amis et mes camarades de la promotion.*

*Avec une profonde gratitude,*

*B. Nacer*

## Sommaire

Symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

## Introduction générale

Introduction générale ..... 1

## I.Généralités sur l'hydrogène

I.1 Introduction ..... 4

I.2.L'hydrogène ..... 4

I.2.1 Historique ..... 4

I.2.2. Définition : ..... 6

I.2.3.L'hydrogène vert ..... 6

I.4. Hydrogène comme un vecteur d'énergie ..... 8

I.5.Techniques de production de l'hydrogène ..... 10

I.5.1.Le reformage à la vapeur : ..... 10

I.5. 2.L'oxydation partielle ..... 11

I.5.3. Reformage auto thermique ..... 11

I.6. Sources de Production de l'hydrogène ..... 13

I.6.1. Production de l'hydrogène à partir des combustibles fossiles ..... 13

I.6.1.1 Production de l'hydrogène à partir du gaz naturel ..... 13

I.6.1.2 Production de l'hydrogène à partir du charbon ..... 14

I.6.2 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau ..... 14

I.6.3. Production de l'hydrogène par nucléaire ..... 15

I.6.4.Production de l'hydrogène par énergie renouvelable ..... 16

I.6.4.1.Production de l'hydrogène à partir de la biomasse ..... 17

I.6.4.2. Production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire ..... 18

## II. Dimensionnement et réalisation

II.1. Introduction ..... 19

II.2.Présentation d'un système ..... 19

II.3.Conception et dimensionnement du prototype ..... 20

II.3.1. Dimensionnement et conception du générateur d'hydrogène ..... 20

II.3.2.Dimensionnement du système PV ..... 22

II.4.Réalisation du prototype ..... 24

II.4.1.partie mécanique ..... 24

II.5. Stockage de l'hydrogène ..... 26

II.5.1.Stockage de l'hydrogène liquide ..... 27

II .5.2.Stockage par compression ..... 28

II .5.3.Stockage par adsorption ..... 28

II.5.3.1.Stockage dans les structures en carbone ..... 28

II.5.3.2.Stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrures ..... 28

II.6.1.Pile à combustible H<sub>2</sub> ..... 29

## Chapitre III : Réalisation et perspectives

---

III. Modélisation de source photovoltaïque .....	32
III.1.Introduction : .....	32
III.2.Réalisation de prototype : .....	32
III.3.Production d'hydrogène : .....	38
III.3.1.Loi de Faraday .....	38
III.3.2.Courbe de production d'hydrogène : .....	39
III.3.3.Programme Fortran : .....	40
III.4. Types d'électrolyseurs : .....	41
III.5. Principe de fonctionnement: .....	43
III.5.1. Applications potentielles: .....	44
III.5.2. Exemple de systèmes de production: .....	44
III.6. Relation entre tension et production d'hydrogène: .....	45
III.7. Source d'énergie et carburant .....	46
III.8. Principe defonctionnement .....	47
Conclusion.....	49
Conclusion Générale	
Conclusion generale .....	50

<b>Symboles</b>	<b>unité</b>
$\Delta H$ :	Enthalpie de dissociation de l'eau kJ/mol
$R$ :	Constante molaire des gaz : 8,3144 J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$C_p$ :	Capacité thermique J/kg K
$T$ :	Température Thermodynamique K
$h\nu$ :	Energie de Photons J
$E_g$ :	Energie de bande gap J
$V_T$ :	tension thermique V
$V_{pv}$ :	tension de panneau
$I_D$ :	Courant de saturation de la diode mA
$A$ :	Facteur d'idéalité
$K$ :	Constant de Boltzmann ( $K = 1,38 \times 10^{-23}$ ) J s <sup>-1</sup>
$q$ :	Charge de l'électron C
$I_{ph}$ :	Photo courant créer par la cellule
$I_0$ :	Courant de diode
$R_{sh}$ :	Résistances shunt
$R_s$ :	Résistance série
$I_{cc}$ :	Le courant de court-circuit
$G$ :	Eclairement (W/m <sup>2</sup> )
$V_{co}$ :	Tension de circuit ouvert
$P_m$ :	Puissance maximale V
$I_m$ :	Courant maximal A
$V_m$ :	Tension maximale V
$FF$ :	Facteur de forme
$G_{PV}$ :	Générateur photovoltaïque
$F$ :	Constant de Faraday 96485 C/mol
$G_{ref}$ :	Eclairement de référence W/m <sup>2</sup>
$\alpha$ :	Coefficients de variation du courant
$T_{amb}$ :	Température ambiante K
$\beta$ :	Coefficients de variation de la tension
$U_{el}$ :	Somme de la surtension anodique et cathodique
$U_{ohm}$ :	Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur

---

$N_s$	: Nombre des cellules série d'électrolyseur photovoltaïque	
$n_p$	: Nombre de module parallèle dans le champ	
$N_p$	: Nombre des cellules parallèles d'électrolyseur	
$N_s$	: Nombre de module série dans le champ photovoltaïque	
$N_{H_2}$	: Taux de production d'hydrogène	
$\eta$	: Rendement	%
PV	: Photovoltaïque	
PEM	: Membrane Echangeuse De Protons	
IMET <sup>®</sup>	: Inorganic Membrane Electrolysis Technology	
IGCC	: Integrated Gâtification Combined Cycle	
PEMFC	: Piles à Combustible	
HTGR	: High Température Gaz	
VPC	: Véhicules à Pile à Combustible	
P-N	: Positif –Négatif	
NOCT	: Nominal Operating Cell Temperature	

**I. GENERALITES SUR L'HYDROGENE**

FIGURE I.1: CHRONOLOGIQUE DE L'HISTOIRE DE L'HYDROGENE [3].	5
FIGURE I. 2: SCHEMA ENERGETIQUE	8
FIGURE I.3: DENSITE MASSIQUE ENERGETIQUE DE DIFFERENTS VECTEURS	9
FIGURE I.4 . SYSTEME DE PRODUCTION D'HYDROGENE A BASE ENERGIE THERMIQUE SOLAIRE	11
FIGURE I.5: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ELECTROLYSEUR	12
FIGURE I.6: REACTEURS NUCLEAIRE POUR LA PRODUCTION DE L'HYDROGENE (A)REACTEUR A REFROIDISSEMENT AU SODIUM LIQUIDE (B) REACTEUR A GAZ A HAUTE TEMPERATURE	15
FIGURE I.7: LES TECHNIQUES DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE	17
FIGURE I.8: PROJET 'HYDROSOL', REACTEUR MONOLITHIQUE POUR LA PRODUCTION D'HYDROGENE VIA LA DISSOCIATION DE L'EAU PAR VOIE SOLAI	18

**II. DIMENSIONNEMENT ET REALISATION**

FIGURE II.1: CONNEXION DIRECTE DE PV ET ELECTROLYSEUR	22
FIGURE II.2: CONNEXION INDIRECTE DE PV ET ELECTROLYSEUR	22
FIGURE II.3: SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN GENERATEUR D'HYDROGENE	23
TABLEAU II.1 : CARACTERISTIQUES DES PANNEAUX CHOISIS	25
FIGURE II.4 : SCHEMA DE RACCORDEMENT DES PANNEAUX SOLAIRE	26
FIGURE II.5 : LE PROTOTYPE PROPOSE POUR LA REALISATION DE PROJET	28
FIGURE III.1: MONTAGE DU PROTOTYPE	30
FIGURE III.2: LA VARIATION DE RAYONNEMENT GLOBAL ET LA TEMPERATURE AMBIENTE POUR LA JOURNEE DE MESURE (27/05/2024) A M'SILA	35
FIGURE III.3: INSTALLATION DE PROTOTYPE DE PRODUCTION D'HYDROGENE AU LABORATOIRE DE PHYSIQUE ENERGETIQUE A L'UNIVERSITE DE M'SILA	35

---

FIGURE III.4: MONTAGE DES INSTRUMENTS DE MESURE DE NOTRE INSTALLATION.....	36
FIGURE III.5 : PRODUCTION DE L'HYDROGENE POUR UNE TENSION $U = 10$ VOLTES .....	37
FIGURE III.6 : PRODUCTION DE L'HYDROGENE POUR UNE TENSION $U = 15$ VOLTES .....	37
FIGURE III.7 : INFLUENCE DE LA TENSION DE GENERATEUR SUR LA PRODUCTION D'HYDROGENE POUR UN PANNEAU CONTIENT :36 MODULES EN BLEU ET 45 MODULES EN ROUGE .....	38
FIGURE III.8 : VARIATION DE DEBIT $M_{H_2}$ EN FONCTION DU TEMPS POUR LE PANNEAU DE 36 MODULES .....	38
FIGURE III.9 : VARIATION DE LA TENSION (BLEU) ET LE COURANT (ORANGE) EN FONCTION TEMPS.....	39

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène	6
Tableau II.1 : Caractéristiques des panneaux choisis	25

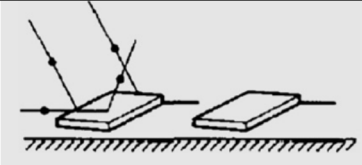
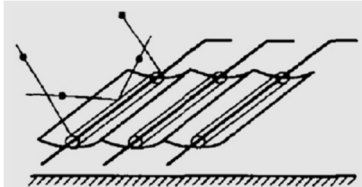
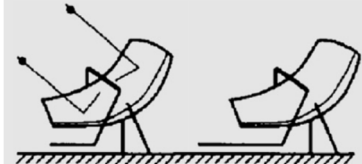
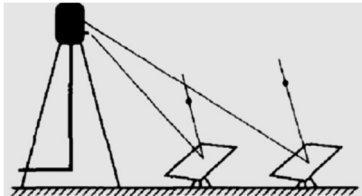

# **Introduction générale**

Hydrogène est sans aucun doute le futur carburant et vecteur d'énergie. Il est sans carbone et donc respectueux de l'environnement. Bien que l'hydrogène soit naturellement présent sur Terre à l'état combiné dans des composés organiques et inorganiques, par exemple sous forme d'hydrocarbures, d'eau et d'autres substances, il est rarement présent à l'état libre et moléculaire. Par conséquent, l'hydrogène élémentaire est produit artificiellement et donc son une production sûre et respectueuse de l'environnement est la plus importante. L'électrolyse de l'eau est l'une des nombreuses techniques permettant de produire de l'hydrogène. Une unité d'électrolyseur utilise de l'électricité et décompose l'eau en hydrogène et en oxygène. Alors que l'hydrogène peut être considéré comme une source d'énergie directe comme le carburant des automobiles, l'oxygène peut être considéré comme un sous-produit sûr. La production d'électricité peut se faire en utilisant des sources renouvelables, par exemple l'énergie solaire. L'énergie solaire est une source d'énergie abondante, disponible gratuitement et en grande quantité partout dans le monde et peut être utilisée pour la production d'électricité par deux voies différentes, à savoir le photovoltaïque et le solaire thermique via des systèmes de capteurs à concentration.

Certaines difficultés liées à la nature intermittente de l'énergie solaire, aux conditions nuageuses et sans ensoleillement sont résolues avec succès en utilisant un système de stockage. Le système de stockage dans le système de production d'hydrogène photovoltaïque est un parc de batteries alors que, comme dans le système thermique, il peut s'agir d'un réservoir de stockage d'eau chaude ou de matériaux à changement de phase. Le potentiel estimé de la capture directe de l'énergie solaire est énorme. Lorsque l'énergie solaire frappe l'atmosphère terrestre, environ 30 % de celle-ci est réfléchi. Après réflexion par l'atmosphère, La surface de la Terre reçoit environ 3,9 1 024 MJ d'énergie solaire incidente par an, soit près de 10 000 fois plus que la consommation énergétique mondiale actuelle. Ainsi, la récolte de moins de 1% de l'énergie photonique répondrait à tous les besoins énergétiques humains [1]. Le système photovoltaïque, comme indiqué ci-dessus, constitue une nouvelle approche de la production d'électricité car il utilise l'énergie solaire disponible gratuitement. Bien que la nature intermittente du rayonnement solaire limite dans une certaine mesure l'utilisation de cette technologie, l'énergie stockée dans un parc de batteries peut néanmoins être utilisée pendant les périodes sans ensoleillement. Les systèmes photovoltaïques peuvent non seulement être utilisés comme systèmes autonomes, mais également connectés au réseau pour fournir de l'électricité en continu tout au long de la journée. Le rendement de la cellule solaire peut aller de 12 à 15 % typiquement pour la cellule solaire au silicium. Cependant, il atteint 25 à 30 % pour les cellules solaires GaAs. Le coût du premier est inférieur à celui du second, qui

est principalement utilisé pour les applications spatiales. L'efficacité du système photovoltaïque peut également être calculée en multipliant l'efficacité de ses différents composants comme une cellule solaire, un module, une batterie, etc. D'un point de vue sanitaire, les avantages potentiels des applications de l'énergie solaire semblent très souhaitables. Les deux inconvénients de la technologie photovoltaïque peuvent être un faible rendement de conversion et un coût élevé des cellules solaires, mais ils peuvent être surmontés par des recherches intenses dans ce domaine. En revanche, la technologie solaire thermique est à son stade de maturité. En fonction de la température souhaitée, différents types de capteurs solaires peuvent être utilisés. Le tableau 1 donne

**Tableau 1** Différents types de capteurs solaires [2].

	Capteur plan	$C = 1$ $T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$ $P < 1 \text{ MW(th)}$
	Capteur à tubes sous vide	$C = 3$ $T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$ $P < 1 \text{ MW(th)}$
	Capteur solaire à concentration	$C = 40-80$ $T < 350 \text{ }^\circ\text{C}$ $P < 50 \text{ \&MW(e)}$
	Héliostats avec la tour	$C = 200-700$ $T < 1500^\circ\text{C}$ $P < 150 \text{ \&MW(e)}$
	Parabolique dish	$C = 1000-2500$ $T < 2500 \text{ }^\circ\text{C}$ $P < 100 \text{ kW (th)/Einh.}$

Des informations sur les différents capteurs solaires, leurs températures, leurs facteurs de concentration et leurs capacités de puissance. Le collecteur à plaques plates est le plus simple sur lequel le rayonnement solaire arrive sur une surface plane transparente qui transmet ce

rayonnement à une surface absorbante/collectrice de taille égale généralement constituée de métaux Cu ou Al. Les métaux Cu ou Al sont préférés en raison de la conductivité thermique élevée (Cu) et du coût (Al) relativement raisonnable du matériau. Le point à noter ici est que le flux solaire incident est directement absorbé par la surface du récepteur. Plus la surface du récepteur est grande, plus l'énergie thermique disponible sera grande. Le facteur de concentration d'un FPC est de 1 et une puissance thermique allant jusqu'à 1 MW peut être générée pour une plage de température allant jusqu'à 200°C en connectant des capteurs plans en série. Les autres collecteurs présentés sont des collecteurs concentrés. Leur facteur de concentration, leur puissance et leur température de fonctionnement sont plus élevés. L'application de l'énergie solaire à la production d'hydrogène est abordée dans les parties suivantes de mémoires. Les différentes méthodes de production d'hydrogène sont également brièvement abordées.

Cette étude comporte les chapitres suivants :

- Dans la première partie nous allons présenter une étude bibliographique sur la production d'hydrogène solaire. La modélisation des éléments de la chaîne et de couplage direct (générateur-électrolyseur) suivis d'un aperçu sur les méthodes d'adaptation de couplage direct (générateur-électrolyseur).
- Le deuxième chapitre discute sur la consommation énergétique dans le bâtiment d'une façon générale : mur Trombe, cheminée, ...
- Le troisième chapitre on va présenter les équations mathématiques décrivant le Fluent et les méthodes de résolutions numériques, ainsi une description de la méthode des ordonnées discrètes qui sa fait partie du Fluent.
- Le quatrième chapitre regroupe les résultats essentiels de cette étude : de pression, température, le champ de vitesse et les lignes de courant. sont bien présentés et commentés ainsi déterminer le pourcentage de l'amélioration de deuxième système par rapport le premier.
- Enfin nous terminons le manuscrit par une conclusion générale.

# **Chapitre I : Généralités sur l'hydrogène**

## **I.1 Introduction**

L'hydrogène gazeux est considéré comme le carburant du futur, un vecteur d'énergie important et la meilleure alternative à ces sources épuisées, coûteuses et impures. Récemment, ses multiples utilisations ont émergé, notamment dans le domaine des transports et de l'espace. Il existe également de nombreuses sources de production et d'extraction, et la plus importante de ces sources, que nous allons étudier, est peut-être sa production par électrolyse de l'eau. Cette importance vient du fait qu'il est possible que l'approvisionnement en électricité provienne d'une source d'énergie renouvelable, en s'appuyant sur un système chargé de convertir l'énergie solaire en énergie électrique représentée par des cellules solaires [1].

Dans ce chapitre, nous discuterons des propriétés générales de l'hydrogène et de sa production.

## **I.2. Hydrogène**

### **I.2.1 Historique :**

Jules Verne, le romancier, a été cité par plusieurs scientifiques dans des discussions sur l'hydrogène. Ils semblent admirer son idée d'un moteur à hydrogène, comme mentionné dans son roman *L'île mystérieuse*. Dans le roman, il décrit l'eau et comment elle a la capacité de créer un apport incessant de chaleur et de lumière en utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène, à la fois séparément et ensemble. Une vision futuriste autrefois écrite comme une fiction est maintenant devenue réalité [2].

Vu la découverte de la molécule de dihydrogène avec l'isolement par l'explorateur britannique Henry Cavendish d'une substance gazeuse qui, lorsqu'elle est brûlée dans l'air, produit de l'eau. L'hydrogène a été confondu avec d'autres gaz jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontre en 1766 que l'hydrogène était produit par l'action de l'acide sulfurique sur les métaux. Cavendish a ensuite montré que l'hydrogène était une substance indépendante qui se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau [3].

Le chimiste français Antoine-Laurent Lavoisier a ensuite rebaptisé cet "air inflammable" en "hydrogène" en 1781. En fin de compte, la composition de la molécule d'eau a fait surface grâce aux efforts de Louis-Joseph Gay-Lussac, un Français, et Alexander von Humboldt, un Allemand, en 1804. Leurs découvertes ont révélé que la molécule était composée de deux atomes d'hydrogène pour chaque atome d'oxygène.

La découverte par William R. Grove d'une méthode qui utilise le dihydrogène pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau en 1839 a ouvert la voie aux piles à combustible.

Ces cellules ont été utilisées dès les années 1960 dans les engins spatiaux de la NASA, notamment les capsules Apollo et Gemini. Une représentation des occasions critiques liées à l'hydrogène peut être trouvée dans une frise [3]



**Figure I.1:** Chronologique de L'histoire de L'hydrogène [3].

### I.2.2. Définition

Le nom hydrogène vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie « générateur d'eau », c'est l'élément le plus abondant dans l'univers (Il compose 75% de la masse de toute la matière.). L'hydrogène est un gaz diatomique, tient la première place dans la classification de Mendeleïev, il possède la plus simple structure atomique (un proton dans son noyau et un électron dans son atome). L'hydrogène a longtemps été décrit comme le "carburant du futur". Et avec l'élan mondial pour parvenir à la décarbonations, associé à l'introduction de nouveaux objectifs et législations, et aux progrès réalisés dans le domaine de la technologie de production d'hydrogène, nous sommes en mesure de réaliser cet avenir aujourd'hui [4].

### I.2.3. Hydrogène vert

L'hydrogène vert est principalement de l'hydrogène produit à partir de l'électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables. Le vecteur énergétique qui en résulte peut-être utilisé dans de nombreuses applications énergétiques. Il peut également être utilisé sous forme d'hydrogène ou

transformé en d'autres dérivés pour une utilisation dans les domaines de l'industrie, de l'énergie ou des transports, ce qui favorise la décarbonation de secteurs difficiles tels que l'industrie lourde, le transport maritime longue distance, les transports et l'aviation [4].

### I.3 Propriétés de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz non toxique et très énergétique qui peut générer de la chaleur et faire fonctionner des moteurs par combustion directe, tels que les moteurs à combustion interne. Lorsqu'il est utilisé dans des piles à combustible, il peut même produire de l'électricité, ne laissant que de l'eau comme résidu. Cependant, l'hydrogène ne se trouve pas dans la nature à l'état pur, mais plutôt combiné avec d'autres éléments, notamment dans l'eau et les hydrocarbures. Par conséquent, il doit être produit. L'hydrogène n'est pas considéré comme une source d'énergie, mais plutôt comme un vecteur d'énergie, tout comme l'électricité. L'hydrogène est un élément incolore et inodore de symbole H, avec un numéro atomique de 1. Le tableau suivant fournit des données physico-chimiques de base sur l'hydrogène et des comparaisons avec le gaz naturel [5].

**Tableau I.1** : les données de base physico-chimiques de l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel) [5].

Propriété	Valeur numérique
Masse atomique	1,0079 g/mol
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	3,00 kWh/Nm <sup>3</sup> 33,33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	3,55 kWh/Nm <sup>3</sup> 39,41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1,34 kg/m <sup>3</sup>
Densité gazeuse à 273K	0,08988 kg/Nm <sup>3</sup>
Densité liquide à 20.3K	70,79 kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique (Cp)	14266 J/kg. K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg. K
Conductivité thermique du gaz	0,1897 W/ (m.K)
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3,92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2,1
Constante du gaz	4 124.5 J/kg. K
Température de solidification	14,01K

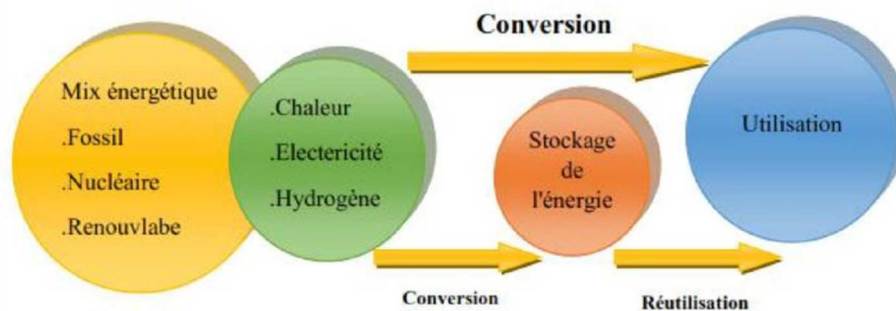
Température d'ébullition	20,268K
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm <sup>2</sup> /s (gaz naturel 0,16)
Pression critique	12,8 atm

#### I.4. Hydrogène comme un vecteur d'énergie

L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique car il doit être généré avant d'être utilisé (Figure I.2). Chaque année, environ 30 millions de tonnes d'hydrogène sont produites dans le monde, dont la moitié est principalement utilisée pour produire du NH<sub>3</sub>.

Aujourd'hui, il est utilisé dans le raffinage, la chimie ou l'industrie. L'hydrogène est souvent présenté comme le vecteur énergétique d'avenir pour le secteur des transports. Pour pouvoir offrir une bonne performance environnementale, les filières hydrogène restent freinées par les coûts très élevés du développement de masse.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, représentant à lui seul 92 % des atomes et environ 75 % de la masse totale de l'univers. Cependant, sur Terre, il n'apparaît qu'à 0,22% dans la croûte terrestre, tandis que l'oxygène représente 47% et le silicium 27%. Dans l'atmosphère terrestre, l'hydrogène se forme sous forme de dihydrogène, ne représente que 0,55 ppm des gaz atmosphériques. Il est également intéressant de noter que l'hydrogène constitue environ 63 % des atomes qui composent le corps humain [6].



**Figure I. 2 :** schéma énergétique [6].

Divers procédés peuvent être utilisés, notamment chimiques, biologiques, thermochimiques, électrolytiques et photolytiques. Chaque technologie se trouve à un stade de développement différent et chacune offre des opportunités, des avantages et des défis uniques en termes de disponibilité locale des matières premières, de maturité de la technologie, d'applications et de

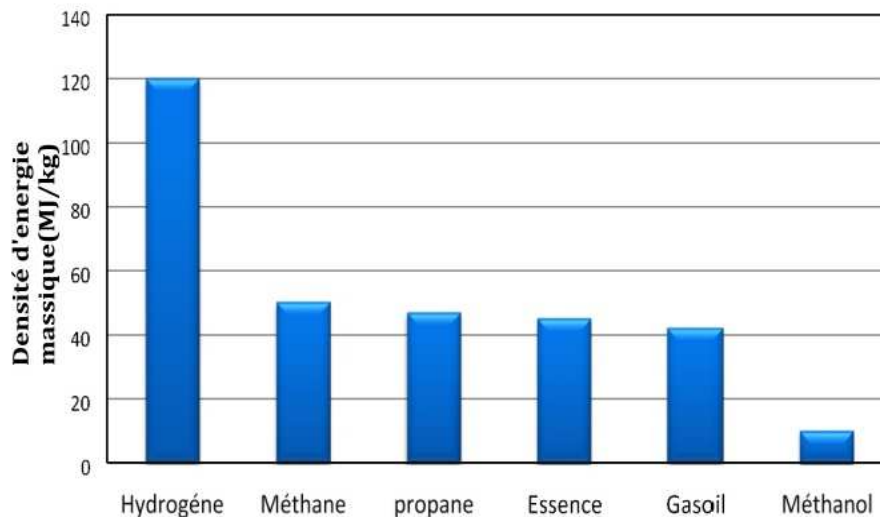
demandes du marché, de questions politiques et de coûts. Les deux affecteront la sélection et le calendrier des diverses options de production d'hydrogène [6]. L'hydrogène peut être produit à partir de diverses matières premières. Il s'agit notamment des ressources fossiles, telles que le gaz naturel et le charbon, ainsi que des ressources renouvelables. Cependant, la production d'hydrogène à partir de l'eau reste coûteuse.

Désormais, l'électrolyse est associée à une future utilisation des énergies renouvelables. Cela pourrait être intéressant au vu de la non-simultanéité de la production par ces procédés avec les besoins des industriels et des individus. Une autre possibilité réside dans l'utilisation de l'électricité produite par des centrales nucléaires, et plus particulièrement lors des heures creuses. L'hydrogène permettrait ainsi le stockage de l'électricité sous forme chimique, et une réutilisation ultérieure lorsque les besoins se font sentir. En outre, le rendement de l'électrolyse est en pratique de l'ordre de 65%, bien que, théoriquement, il soit possible d'atteindre 80 ou 85%.

En outre, l'hydrogène possède une propriété remarquable : sa combustion avec l'oxygène ne produit que de l'eau, comme l'indique l'équation 1.



En plus de ne pas avoir d'odeur, d'être incolore et non corrosif, le dihydrogène est également un carburant très puissant. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 3, il possède la densité



**Figure I.3:** Densité massique énergétique de différents vecteurs [6].

Énergétique la plus élevée par kilogramme, comparé à d'autres combustibles, tels que le gaz naturel. Par exemple, 1 kg d'hydrogène libère lors de sa combustion près de 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence, soit 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg [6].

En revanche, dans les conditions de température et de pression ambiantes, l'hydrogène possède une masse volumique très faible, ce qui lui fait occuper à masse égale, un volume bien plus grand que l'essence. L'un des enjeux principaux liés à l'utilisation de l'hydrogène réside donc dans son stockage [6].

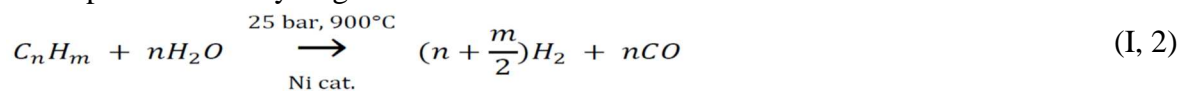
### I.5. Techniques de production de l'hydrogène : [6]

L'eau est la principale source d'hydrogène sur Terre, et diverses techniques sont employées pour sa production :

#### I.5.1. Reformage à la vapeur :

La méthode la plus couramment utilisée pour produire de l'hydrogène consiste en une réaction endothermique entre un hydrocarbure et de l'eau, catalysée par du nickel. Cette réaction nécessite un apport de chaleur. (I, 2)

Le gaz de synthèse est un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone, qui est produit lors de la première réaction. Ensuite, pour augmenter la concentration en hydrogène, une deuxième réaction appelée "réaction de conversion à l'eau" est effectuée. Cette réaction transforme une partie du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone et en hydrogène, ce qui permet d'obtenir un gaz de synthèse plus riche en hydrogène.



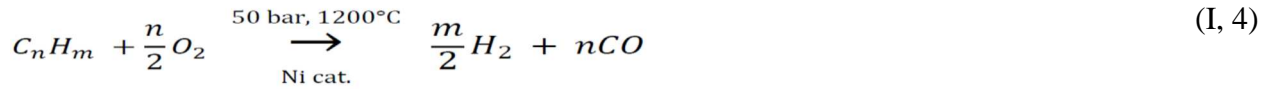
Le gaz de synthèse est un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone, qui est produit lors de la première réaction. Ensuite, pour augmenter la concentration en hydrogène, une deuxième réaction appelée "réaction de conversion à l'eau" est effectuée. Cette réaction transforme une partie du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone et en hydrogène, ce qui permet d'obtenir un gaz de synthèse plus riche en hydrogène.



Cette étape de production est légèrement exothermique mais la chaleur dégagée n'est pas suffisante pour entretenir la réaction de reformage.

### I.5.2. L'oxydation partielle

Cette seconde méthode de production d'hydrogène fait intervenir une réaction exothermique entre un hydrocarbure et l'oxygène.

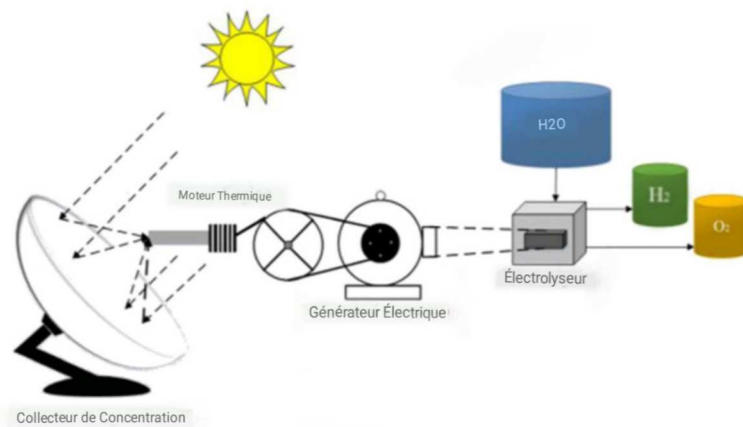


Comme pour le reformage à la vapeur, la conversion du gaz de synthèse est réalisée.

Si le taux de soufre de l'hydrocarbure est faible, la réaction peut se réaliser à plus faible température (850°C). Cette technique reste cependant beaucoup moins répandue que le reformage à la vapeur du fait de son coût important

### I.5.3. Reformage auto thermique :

Il s'agit de la combinaison des deux précédentes techniques exposées. Le reformage est endothermique alors que l'oxydation est exothermique. Les deux procédés sont couplés avec un ajustement de la composition du mélange vapeur - oxygène pour obtenir une réaction auto-entretenu. La production d'hydrogène à partir d'hydrocarbure soit la plus exploitée (95% de la production d'hydrogène proviennent des hydrocarbures) [6].

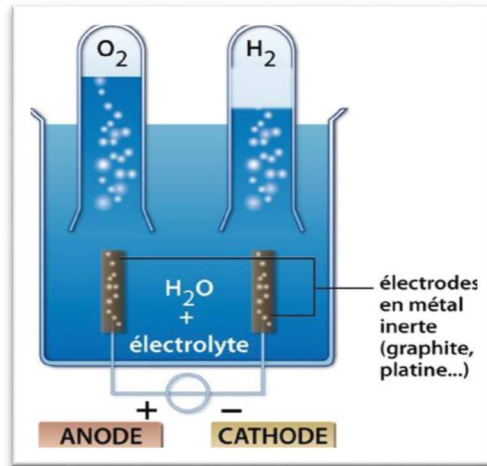


**Figure 1.4.** Système de production d'hydrogène à base énergie thermique solaire

### I.5.4. Électrolyse de l'eau :

Une méthode plus propre pour produire du dihydrogène sans utiliser d'hydrocarbures consiste à utiliser l'eau comme matière première et à appliquer un courant électrique. Cette méthode a été découverte à la fin du XVIIIe siècle et a été industrialisée pour la première fois en 1900. Depuis lors, des améliorations ont été avancées et les premiers électrolyseurs performants ont vu le jour en 1939, avec une capacité de production de 10 000 Nm<sup>3</sup>/h. Le principe de fonctionnement de ces électrolyseurs est illustré dans la Figure 4.

Plusieurs technologies d'électrolyseurs sont disponibles. L'électrolyseur alcalin utilise généralement la potasse concentrée (KOH) comme électrolyte à des températures comprises entre 80 et 100°C et à des pressions proches de l'ambiante. L'électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) utilise des membranes polymères conductrices de protons à des températures d'environ 70-80°C. Enfin, l'électrolyseur haute température utilise une membrane céramique conductrice d'ions  $O_2^-$  à des températures d'environ 800°C [6].



**Figure I.5:** Principe de fonctionnement d'un électrolyseur [6].

## I.6. Sources de Production de l'hydrogène

L'hydrogène n'existe pas dans la nature dans son état élémentaire, mais il doit être produit à partir de sources comme l'eau ou le gaz naturel ...etc. Idéalement, l'énergie fournie au système pour la production d'une quantité donnée d'hydrogène doit être égale à l'énergie qu'est capable de restituer cette quantité. Malheureusement, des pertes énergétiques sont toujours associées aux procédés d'élaboration de l'hydrogène. Il existe plusieurs types de technologies pour la production d'hydrogène [7].

### I.6.1. Production de l'hydrogène à partir des combustibles fossiles

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel et le charbon. Étant donné que le  $CO_2$  est produit en tant que sous-produit, il doit être capturé à assurer un processus zéro émission durable. La faisabilité des processus varie par rapport à une installation de production centralisée ou distribuée [8].

#### I.6.1.1 Production de l'hydrogène à partir du gaz naturel

Il existe trois procédés chimiques différents qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de gaz naturel : le méthane de reformage à la vapeur, oxydation partielle et le reformage auto thermique. Le processus de reformage à la vapeur est une technologie de pointe d'aujourd'hui

(environ 95% de l'hydrogène produit aujourd'hui dans les Etats-Unis se fait via le méthane de reformage à la vapeur). Il convertit le méthane et la vapeur d'eau en hydrogène et en monoxyde de carbone dans une réaction endothermique.



La chaleur nécessaire est généralement fournie par la combustion d'une partie du méthane de gaz d'alimentation. Une température de 700 à 850 ° C, et sous une pression de 3 à 25 bars, sont requises pour la réaction de se produire. Le CO produit peut-être en outre converti en CO<sub>2</sub> et d'hydrogène par la réaction de conversion eau-gaz :



Dans le processus d'oxydation partielle de gaz naturel, de l'hydrogène est produit par la combustion partielle du méthane (propane et du méthanol peut être utilisé en variante) avec de l'oxygène :



La réaction étant exothermique, aucun chauffage externe du réacteur est nécessaire et une conception plus compacte possible. Le CO produit est en outre converti en un atome d'hydrogène tel que décrit précédemment [7].

### **I.6.1.2 Production de l'hydrogène à partir du charbon :**

Bien que le charbon soit considéré comme un combustible polluant en raison de ses fortes émissions de gaz à effet de serre, il peut être utilisé pour produire de l'hydrogène propre. Le charbon peut alors devenir une source majeure d'hydrogène propre, le développement de technologies de charbon propre peut conduire à une efficacité de conversion énergétique élevée et à de faibles émissions par rapport à une centrale électrique au charbon conventionnelle [7].

### **I.6.2 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau :**

Jusque dans les années 1950, l'électrolyse de l'eau était utilisée pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène. Aujourd'hui, l'électrolyse fournit une proportion importante de l'hydrogène mondial, qui est fourni pour les applications qui nécessitent de petites quantités d'hydrogène de haute pureté. Du point de vue de la réaction électrochimique, c'est la réaction inverse de ce qui se passe dans la batterie. La cellule électrolytique se compose de deux électrodes, une cathode et une anode, ainsi que d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte est soit une membrane polymère échangeuse de protons soit une membrane céramique conductrice d'ions oxygène. Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions sont les suivantes :

A l'anode, des électrons sont formés suite à l'oxydation de l'eau en oxygène et en protons (oxydation) :



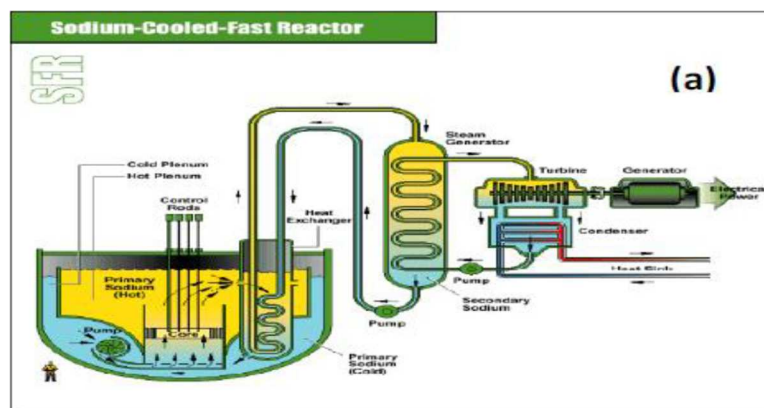
A la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction) :



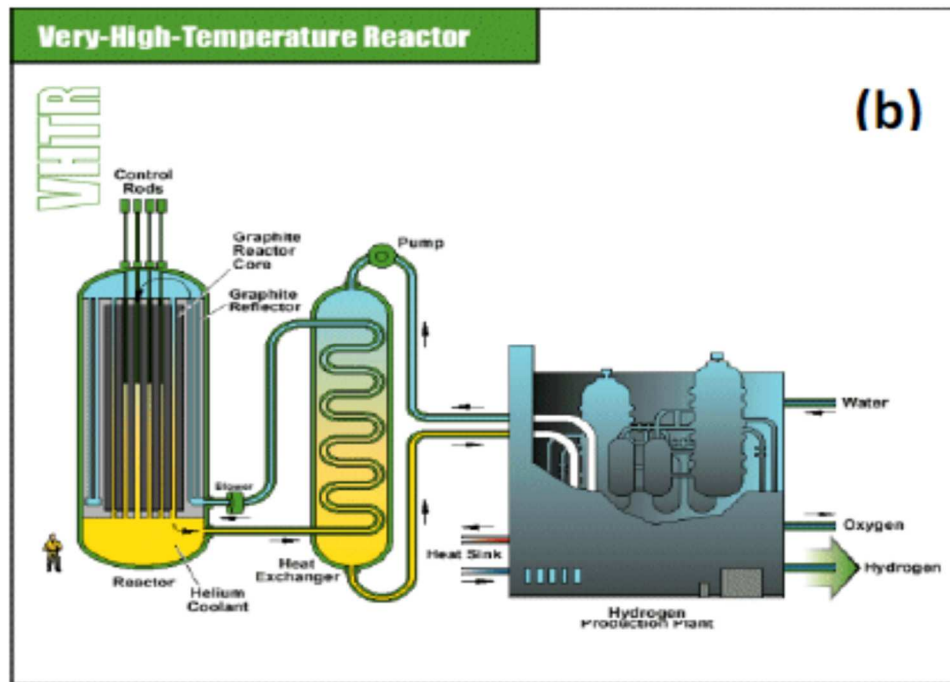
Ainsi, grâce à du courant, l'eau est dissociée en hydrogène et en oxygène. Etant donné que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285kJ/mole, il faut nécessairement un apport d'énergie électrique [7].

### I.6.3. Production de l'hydrogène par nucléaire :

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4<sup>ème</sup> génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 %. Aujourd'hui, une dizaine de pays travaillent sur cette innovation technologique : la France, les USA, le Japon, le Royaume-Uni, six nouvelles technologies de réacteur sont à l'étude : un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique, un réacteur à neutrons rapides à refroidissement avec au choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide (Figure 5 (a)). Un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus (Intel, 2010). Le CEA a choisi de retenir en particulier le réacteur à gaz à haut température (1100°C), noté VHTR (Figure 5(b)). Le haut niveau de température permet la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. S'agissant du Japon et des USA, ils se tournent plutôt vers le réacteur à refroidissement au sodium liquide. Néanmoins, cette technologie ne serait commercialement disponible que vers 2030-2040 [7].



**Figure I.6:** Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène (a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide



**Figure I.6:** (b) Réacteur à gaz à haute température [7].

#### I.6.4. Production de l'hydrogène par énergie renouvelable

De nombreux auteurs ont convenu que ni combustibles fossiles, ou nucléaire ne peut pas satisfaire les besoins en électricité existants et ne peut pas fournir de l'énergie de la neutralité climatique suffisante pour voies probables pour la production d'hydrogène avenir à long terme. La biomasse, hydraulique et géothermique même leur matière première peut être estimée par la précision, mais ils ont un potentiel limité et ils ne sont pas toujours neutres pour le climat. Le seul moyen restant pour produire de l'hydrogène est alors les énergies intermittentes, en particulier les énergies solaire et éolienne. Contrairement à ces méthodes de production, les énergies renouvelables sont une source d'énergie souhaitée pour la production d'hydrogène en raison de leur diversité, régionaliste, l'abondance et le potentiel de durabilité. L'électricité produite à partir de sources renouvelables peut être transformé en hydrogène en utilisant le procédé d'électrolyse. En fait, environ 55 kWh d'électricité sont nécessaires pour libérer 1kg de l'hydrogène à partir de 9 kg d'eau par électrolyse. Electrolyse entraînée par l'énergie renouvelable peut être une option pour une production d'hydrogène durable. En fait, l'électricité produite par les systèmes d'énergie renouvelable est transférée au système d'électrolyseurs pour la production de l'hydrogène par électrolyse en faisant passer l'électricité à travers deux électrodes dans l'eau. Un avantage de l'électrolyse de l'eau est que de nos jours ; il est compatible avec une grande variété de technologies d'énergies renouvelables disponibles à savoir, solaire, hydraulique, éolienne, géothermique [7].

#### **I.6.4.1. Production de l'hydrogène à partir de la biomasse**

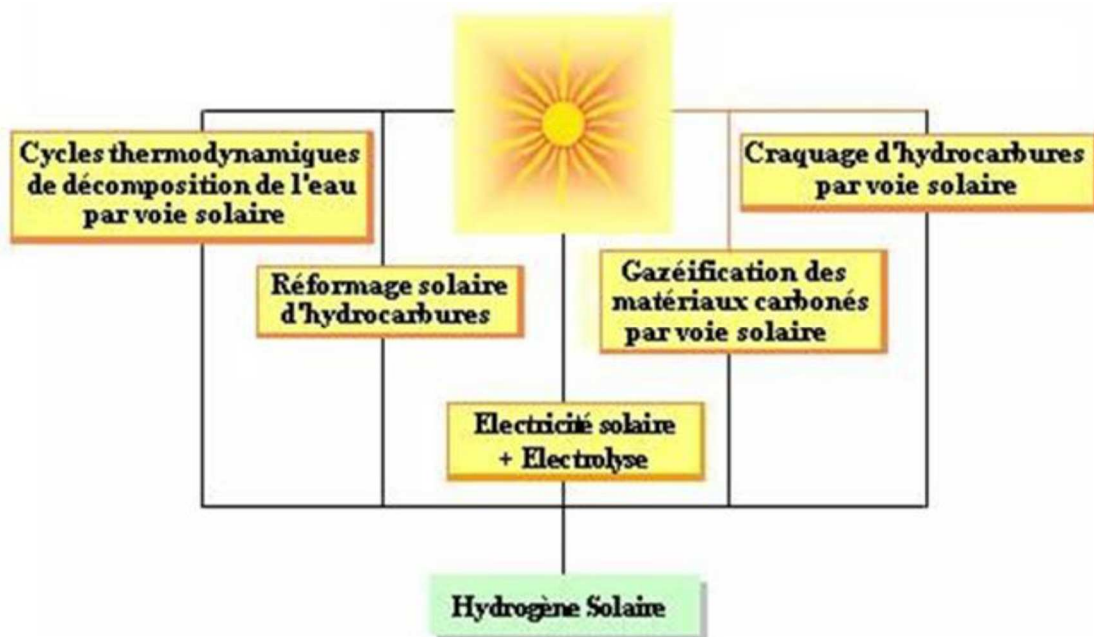
L'hydrogène produit à partir de non-intermittent tel que la biomasse offre la possibilité d'hydrogène renouvelable. Il permet une route durable pour la production. L'utilisation de la biomasse à la place des combustibles fossiles réduit la quantité nette de CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère. Gazéification de la biomasse peut offrir un grand potentiel grâce à l'utilisation de matières premières renouvelables provenant de déchets agricoles, les cultures énergétiques et / ou de résidus forestiers. Parce que les ressources de la biomasse consomment du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère dans le cadre de leur processus de croissance naturel, la production d'hydrogène à partir de la gazéification de biomasse est neutre en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Afin de convertir la biomasse en hydrogène, un contenant de l'hydrogène du gaz de synthèse est normalement produit suivant un processus similaire à la gazéification du charbon, comme la gazéification à la vapeur, la gazéification à flux entraîné et des concepts plus avancés tels que la gazéification en eau supercritique, l'application de thermochimique cycles, ou la conversion d'intermédiaires comme l'éthanol. Gazéification et la pyrolyse sont des technologies à moyen terme les plus prometteuses pour atteindre la commercialisation. Gazéification de la biomasse est un domaine [7] partagé entre la production d'hydrogène et la production de biocarburants. D'autres technologies utilisant la biomasse humide sont également à l'étude en raison des besoins énergétiques grands pour le processus de séchage. Les techniques de production varient en fonction des ressources disponibles, le lieu et les conditions climatiques, mais les principaux problèmes sont la qualité inégale et un mauvais contrôle de la qualité des matières premières de biomasse. Il est donc nécessaire de rationaliser la préparation de combustible pour produire plus cohérentes, les carburants de meilleure qualité. Les grands systèmes ont tendance à être adapté pour moins cher et inférieur carburants de qualité, tandis que les petites plantes ont besoin d'une meilleure qualité de carburant et une meilleure homogénéité de carburant [8].

#### **I.6.4.2. Production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire**

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour extraire de l'hydrogène, mais l'utilisation de l'énergie solaire est actuellement à l'étude à travers plusieurs projets dans le monde. La production d'hydrogène à grande échelle peut être réalisée à l'aide de l'énergie solaire thermique, qui est considérée comme la solution la plus intéressante. Cependant, le développement futur de cette méthode dépendra de facteurs techniques, économiques et politiques. Les techniques de production d'hydrogène solaire ont récemment atteint un niveau de maturité et d'efficacité grâce à l'émergence de nouvelles technologies et de nouvelles générations de centrales solaires

thermodynamiques (Fig I.6). Ces technologies permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à des températures allant de 200°C à 2000°C, avec un rendement supérieur à 70 %. Cette chaleur primaire est ensuite convertie en vecteur énergétique d'hydrogène.

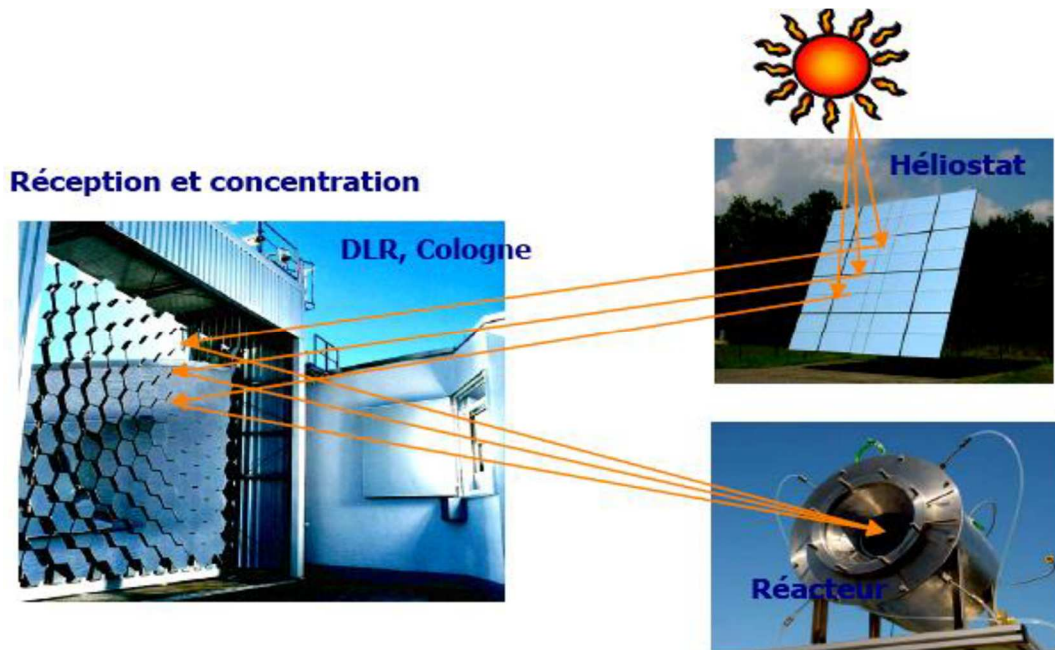
Les concentrateurs solaires sont une alternative intéressante pour les pays disposant de ressources importantes en énergie solaire comme l'Algérie. La question de leur utilisation en Afrique du Nord pour la production d'hydrogène et d'électricité remonte à la fin des années 1970, lorsque l'Algérie a tenté d'acheter la centrale Thémis. Cependant, ces négociations ont échoué pour différentes raisons [9].



**Figure I.7:** Les techniques de production d'hydrogène solaire

Dans différentes parties du monde, il existe aujourd'hui près de 2000 MWe de centrales solaires thermodynamiques. Avec l'aide de la coopération internationale et de la recherche de pays comme l'Espagne et les États-Unis, des projets plus importants sont de retour sur le radar pour plusieurs pays. Cette tournure des événements a de nouveau suscité l'intérêt (comme le montre la figure I.7). Les pays du Maghreb disposent d'un vaste potentiel d'utilisation des ressources solaires en conjonction avec les dernières technologies de centrales solaires. En tenant compte de la chaleur solaire utilisable nécessaire pour réguler les réactions chimiques qui conduisent à la synthèse d'hydrogène, un bilan simplifié révèle que les installations solaires à concentration peuvent produire un rendement annuel de 141 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an pour le fractionnement de l'eau, 803 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an pour le reformage à la vapeur, et 1122 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an pour le craquage du méthane sous une exposition solaire de 2200 kWh/ m<sup>2</sup>/an. Pour illustrer ces chiffres, on note qu'une surface de

collecteurs comprise entre 445 et 3550 kWh/m<sup>2</sup> est suffisante pour assurer la production mondiale actuelle d'hydrogène qui est de l'ordre de 500 milliards de m<sup>3</sup> par an. Le recours aux unités de filières solaires thermiques, offre de nouvelles opportunités aux régions du monde fortement ensoleillé, comme les pays du Maghreb, et qui peuvent ainsi devenir d'importants producteurs « d'hydrogène énergie » [9].



**Figure I.8:** Projet 'HYDROSOL', Réacteur monolithique pour la production d'hydrogène via la dissociation de l'eau par voie solaire [9]

**Chapitre II :**  
**Dimensionnement et**  
**Réalisation**

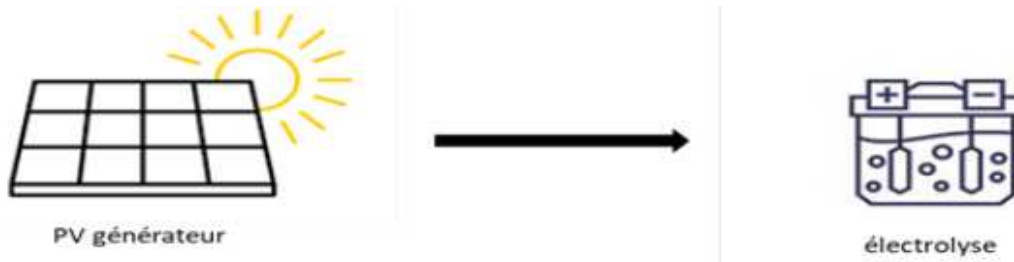
### II.1. Introduction :

Dans notre travail, nous avons réalisé un prototype d'électrolyseur d'eau, basé sur plaquettes d'inox et une solution aqueuse de l'hydroxyde de potassium ou l'hydroxyde de sodium (NaOH) comme électrolyte, L'objectif principal de l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène est de convertir l'eau ( $H_2O$ ) en ses composants élémentaires, de l'hydrogène ( $H_2$ ) et de l'oxygène ( $O_2$ ), en utilisant l'électricité. Cette réaction est rendue possible par l'utilisation d'un électrolyseur, un dispositif qui divise l'eau en hydrogène et en oxygène par électrolyse.

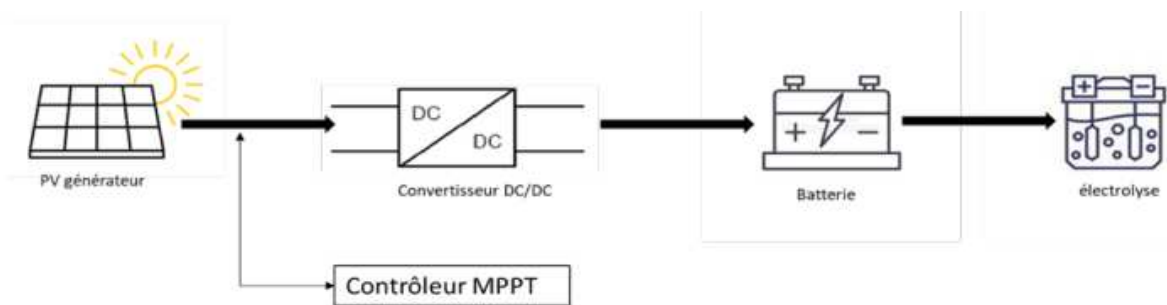
### II.2. Présentation d'un système

Le principe du système est illustré dans les figures (2.1) et (2.2). Le système utilisé est constitué d'un générateur PV (panneau solaire) et un électrolyseur d'eau de type alcalin et un réservoir de stockage. Le système PV-électrolyseur est une configuration qui utilise l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter un électrolyseur afin de produire de l'hydrogène. Cette approche offre une solution durable et respectueuse de l'environnement pour la production d'hydrogène, une source d'énergie propre et polyvalente. Il existe deux façons de connecter le générateur PV à l'électrolyseur, chacune avec ses avantages et inconvénients :

La connexion directe entre les panneaux photovoltaïques et l'électrolyseur (figure 2.1) présente des avantages en termes de fiabilité et de réduction des risques de défaillance par rapport à une connexion indirecte impliquant plus de composants. Cette approche peut également offrir une meilleure efficacité, à condition que les courbes I-V des panneaux photovoltaïques soient correctement adaptées à celles de l'électrolyseur ; mais cela est vraie uniquement dans certaines conditions d'irradiation. Cependant, il y a des inconvénients à prendre en compte. Par exemple, avec cette configuration, il est difficile de contrôler le transfert de puissance entre les panneaux photovoltaïques et l'électrolyseur. De plus, l'efficacité sera réduite car la puissance maximale des panneaux photovoltaïques dépend des conditions météorologiques et de la température des cellules



**Figure II.1:** Connexion directe de PV et électrolyseur



**Figure II.2:** Connexion indirecte de PV et électrolyseur

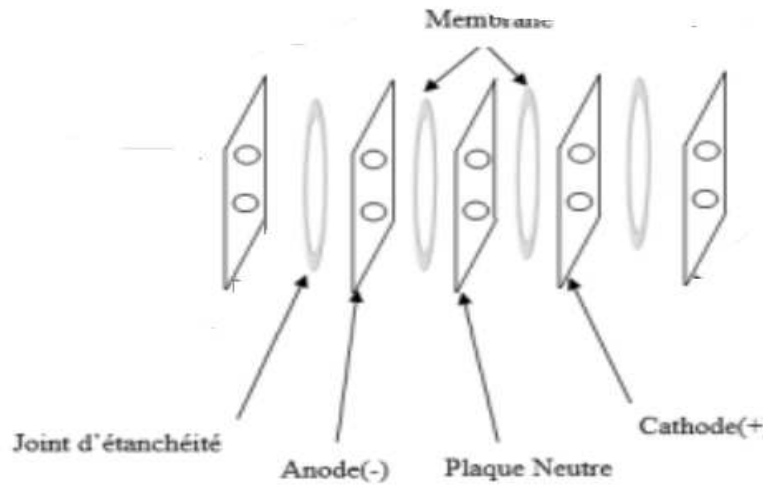
Dans le système de connexion indirecte (voir figure 2.2) avec stockage intermédiaire, l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques est d'abord convertie en courant continu (DC) à l'aide d'un convertisseur DC-DC. Ce convertisseur permet d'adapter la tension et le courant de sortie des panneaux photovoltaïques pour les rendre compatibles avec la batterie. est convertie et stockée dans une batterie, ensuite utilisée pour alimenter l'électrolyseur au moment opportun. Cette approche offre une flexibilité dans la gestion de l'énergie solaire, en permettant l'utilisation de l'électricité générée pendant les périodes ensoleillées pour alimenter l'électrolyseur même lorsque le soleil ne brille pas. Ainsi, l'énergie solaire peut être utilisée de manière plus efficace et continue, même en l'absence de rayonnement solaire direct [11].

### II.3. Conception et dimensionnement du prototype

Dans cette partie, nous allons dimensionner les différentes parties du système.

#### II.3.1. Dimensionnement et conception du générateur d'hydrogène

Le schéma illustré dans la figure II.3 de notre générateur d'hydrogène submergé comprend les éléments suivants : deux électrodes, une anode et une cathode, ainsi que quatre plaques neutres, des joints d'étanchéité et des plaques d'extrémités



**Figure II.3:** Schéma synoptique d'un générateur d'Hydrogène

### 1.Électrodes

Les électrodes sont des composants essentiels dans l'électrolyse. Elles sont responsables de l'introduction du courant électrique dans le système et des réactions électrochimiques qui se produisent à l'intérieur de la cellule électrolytique. Les électrodes sont des plaques en acier inoxydable avec dimension de largeur de 7,5cm et longueur de 9,5cm.

### 2. Plaques neutres

Nous utilisons également quatre plaques neutres avec les mêmes dimensions que les électrodes. L'ajout de ces plaques neutres présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il augmente la surface de production des gaz, ce qui favorise une production plus efficace d'hydrogène. De plus, cela permet de réduire la tension entre les plaques du générateur, ce qui aide à prévenir la surchauffé de l'eau et la formation de vapeur d'eau indésirable.

### 3. Choix de matériaux

L'acier inoxydable est largement reconnu pour sa résistance à la corrosion, ce qui est particulièrement important dans un environnement électrolytique où des réactions chimiques se produisent. Cela assure la durabilité et la performance optimale des électrodes et des plaques neutres sur une longue période. En outre, l'acier inoxydable offre une bonne conductivité électrique, ce qui est essentiel pour un transfert efficace du courant électrique lors du processus d'électrolyse. Cela favorise une conversion efficace de l'eau en hydrogène et en oxygène.

### 4. Joint d'étanchéité

Les joints en caoutchouc assurant l'étanchéité entre les plaques. Ils créent des chambres fermées individuelles en agissant comme une barrière entre chaque plaque. Les joints en caoutchouc sont

spécifiquement conçus pour garantir une isolation adéquate entre les plaques, empêchant ainsi toute fuite d'eau ou de gaz. Cela contribue à assurer l'efficacité et la sécurité du processus d'électrolyse dans notre générateur d'hydrogène. Ces joints en caoutchouc sont dimensionnés pour correspondre aux dimensions des plaques du générateur. Leur taille extérieure, avec une largeur de 7,5 cm et une longueur de 9,5 cm, permet de créer des chambres fermées de taille appropriée. De même, leur taille intérieure correspondante garantit un ajustement précis entre les plaques, assurant ainsi l'étanchéité.

### 5. Joints d'extrémité

En utilisant des joints d'extrémité en plexiglas, nous assurons la protection et l'intégrité du générateur d'hydrogène, tout en permettant une observation directe de son fonctionnement. Cela contribue à la fiabilité et à la sécurité du système global de génération d'hydrogène

### 6. Alimentation de générateur d'hydrogène

L'alimentation du générateur d'hydrogène nécessite à la fois une alimentation électrique et un électrolyte pour la conductivité du courant entre les électrodes

- Alimentation en eau

Lorsqu'il s'agit d'alimenter le générateur d'hydrogène en eau, plusieurs sources d'eau peuvent être utilisées, notamment l'eau usée et d'autres sources d'eau.

- Alimentation électrique

Lors des tests effectués sur le générateur d'hydrogène, il a été observé que la tension maximale générée était d'environ 12 à 13 volts (V), avec un courant 3A.

#### II.3.2. Dimensionnement du système PV

D'après les résultats obtenus lors des tests, la tension maximale de l'électrolyseur est d'environ 12 volts (V) avec un courant de 3 ampères (A).

Nous avons choisi le panneau solaire disponible avec les caractéristiques suivantes:

Pour atteindre les valeurs nécessaires pour alimenter l'électrolyseur nous avons placé trois (03) panneaux en série, en parallèle avec d'autres 3 panneaux en série (voir figure II.4).

-Pour charger une batterie de 12V et 7Ah avec des panneaux solaires de 12V et 278mA (0,278A) : La surface d'une cellule est égale à  $S = 0.170 \text{ m} \times 0.220 \text{ m} = 0.0374 \text{ m}^2$ .

Pour un éclairement standard  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , on aura une puissance d'entrée pour une cellule égale à

$$P_e = 1000 \text{ W/m}^2 \times 0.0374 \text{ m}^2 = 37.4 \text{ W}.$$

Or, selon le datasheet de la cellule, la puissance crête est égale à  $P_c = 5 \text{ W}$ , ce qui donne un rendement de la cellule

$$\eta = 5\text{W}/37.4\text{W} = 0.13 \text{ (13\%)}$$

**Tableau II.: 1** Caractéristiques des panneaux choisis

Type	CNC160X100-18
Dimensions	160 × 100 × 3 mm
V <sub>co</sub>	19V
I <sub>cc</sub> Tension de sortie	0-12V
Courant nominal	278 mA
Puissance	5W

Nous prenons un éclairage moyen pendant une journée moyennement ensoleillée (de 8 heures) égal à  $E = 600 \text{ W/m}^2$ . Cela donne la puissance électrique moyenne produite par une cellule égale à

$$P_m = 600 \text{ W/m}^2 \times 0,0374 \text{ m}^2 \times 0,13 = 2.92 \text{ W}$$

Cette même cellule produira donc une énergie électrique par jour égale à

$$P_j = P_m \times 8 = 2,92 \text{ W} \times 8 = 10,50 \text{ Wh}$$

Prenons une tension moyenne de fonctionnement pendant une journée d'une cellule égale à 18 V (la valeur moyenne n'est pas très loin de 22 V du V<sub>co</sub>). Le courant moyen de la cellule est égal à

$$I_m = 2,92 \text{ W} / 18 \text{ V} = 0,162 \text{ A} = 162 \text{ mA}$$

La tension de chaque branche est  $V_b = 18 \text{ V} \times 3 = 54 \text{ V}$ .

Pour le courant totale nous aurons donc un courant total de 324 mA avec une puissance moyenne totale (pour l'ensemble des 6 cellules) égale à

$$P_t = 54 \text{ V} \times 0.324 \text{ A} = 17.5 \text{ W}$$

Pour une batterie de 12 V et une capacité de 7 Ah, l'énergie contenue dans celle-ci (à 100 % de sa capacité) est égale à

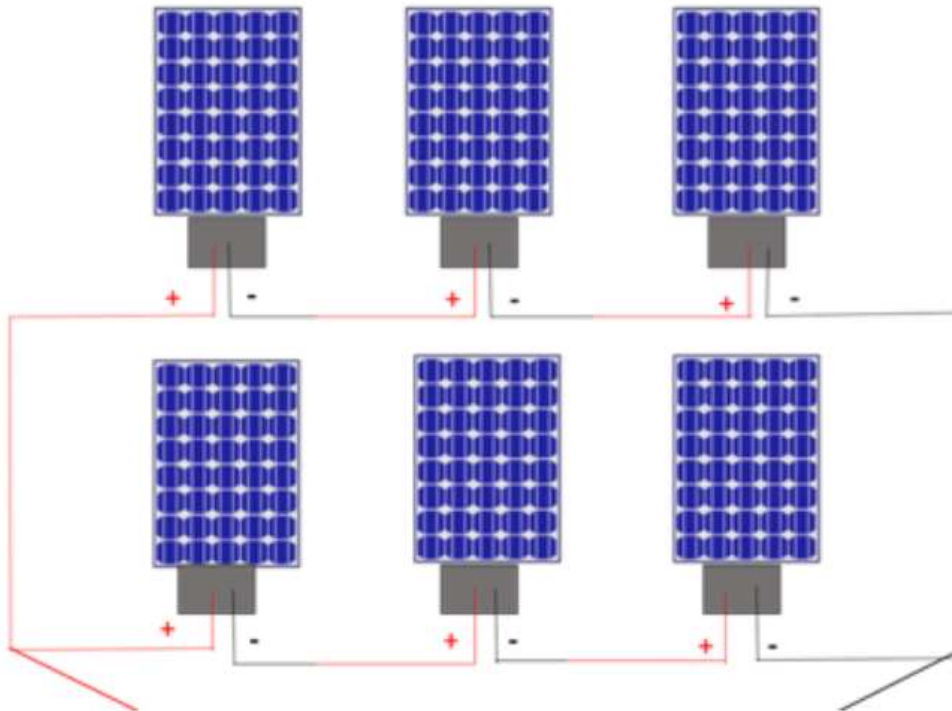
$$C = 12 \text{ V} \times 7 \text{ Ah} = 84 \text{ Wh}$$

Cependant, nous devons prendre en compte une profondeur de décharge de 20 %, ce qui signifie que seulement 80 % la capacité de la batterie est utilisée par l'électrolyseur :

$$C_{ef} = C \times 0.8 = 84 \text{ Wh} \times 0,8 = 67,2 \text{ Wh}$$

C'est cette énergie que les cellules solaires doivent fournir à la batterie pour la charger complètement. L'ensemble des six cellules peut fournir une énergie moyenne pendant 8 heures égale à

$$E_m = P_t \times 8 = 17,5 \text{ W} \times 8 = 140 \text{ Wh.}$$



**Figure II.4 :** Schéma de raccordement des panneaux solaire

## II.4. Réalisation du prototype

### II.4.1. Partie mécanique

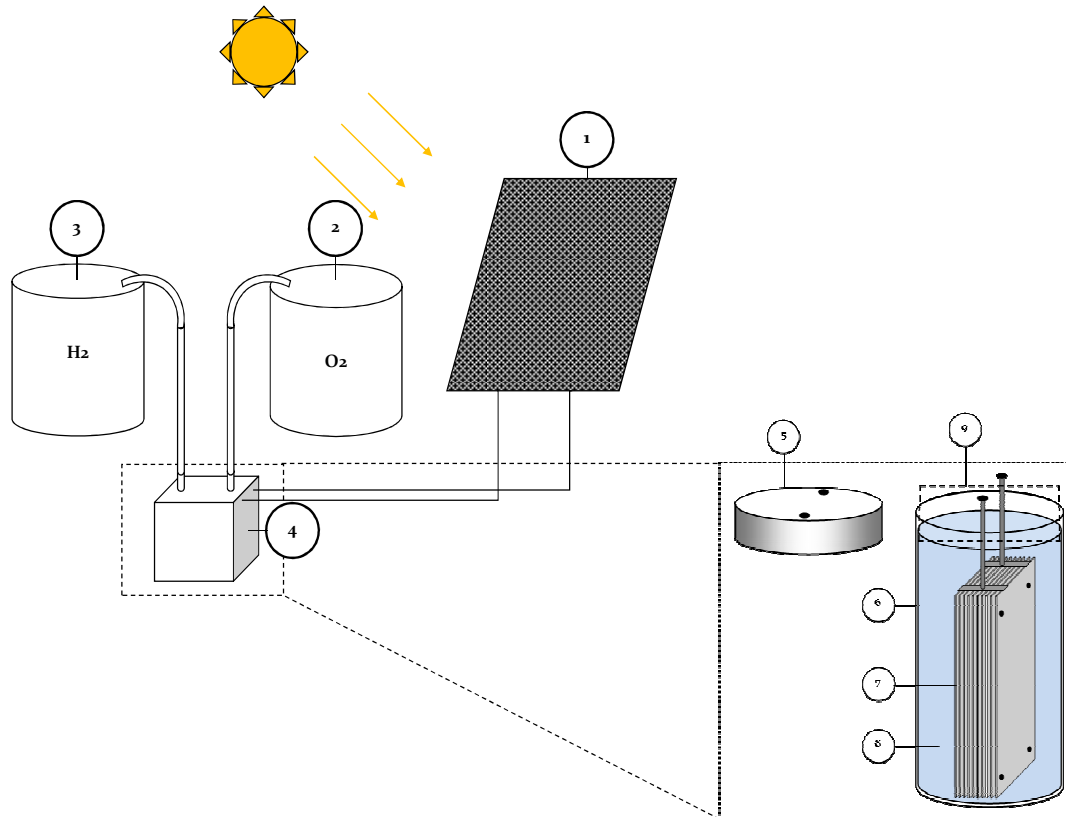
Pour réaliser notre prototype, nous avons besoin de plusieurs équipements pour mener à bien le processus de production d'hydrogène.

Voici une liste des différents équipements nécessaires :

- Plaques en inox épaisseur 0.5 mm,
- Tiges filetées en inox,
- 6 Écrous en inox,
- Une planque plexiglas en épaisseur 8 mm,
- Joints en caoutchouc,
- Câbles électriques,
- Réservoir,
- Scie à ruban,

## ➤ Perceuse.

Le prototype proposé pour la réalisation de projet



**Figure II.: 5** Le prototype proposé pour la réalisation de projet

1. Panneau Photovoltaïque,
2. Réservoir d'Oxygène O<sub>2</sub>,
3. Réservoir d'Hydrogène H<sub>2</sub>,
4. Cellule d'électrolyseur,
5. Couvercle,
6. Récipient,
7. Plaque métallique,
8. Electrolyte,
9. Tube d'évacuation H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>

### II.5. Stockage de l'hydrogène

Il a déjà été souligné le rôle déterminant que joue le stockage dans la viabilité d'un système d'énergie. A ce propos, plusieurs références montrent bien que cela constitue le point décisif de choix d'un système d'énergie basé sur l'hydrogène.

Les techniques de stockage utilisées dans le cas des gaz naturels et industriels, peuvent être envisagées pour celui de l'hydrogène. Ces techniques consistent d'une part, en la liquéfaction de l'hydrogène en vue d'un stockage dans des réservoirs cryogéniques et, d'autre part en la compression de l'hydrogène en vue d'un stockage à haute pression. Une autre solution consiste à utiliser le phénomène d'adsorption de matériaux poreux carbonés ou d'hydrures métalliques pour contenir l'hydrogène.

### **II.5.1. Stockage de l'hydrogène liquide**

La liquéfaction utilise l'importante variation de densité entre les états gazeux et liquide (à température adéquate pour une pression du liquide proche de la pression atmosphérique). Parmi les cycles de liquéfaction de l'hydrogène les plus simples, nous pouvons citer celui de Linde ou la détente Joule-Thompson.

La liquéfaction par le cycle de Linde exige un refroidissement préalable au moyen d'azote liquide ou bien l'utilisation d'une turbine pour refroidir la vapeur à haute pression.

Le cycle de Claude ainsi que celui de Haylandt sont aussi utilisés ; ils utilisent des échangeurs de chaleur supplémentaires et davantage de compresseurs et de turbines pour diminuer le travail de liquéfaction. A cause de la très basse température de liquéfaction de l'hydrogène (20 K sous la pression atmosphérique), le stockage de l'hydrogène liquide est peu économique (à titre d'exemple, le prix de l'hydrogène liquide envisagé comme combustible de transport est deux fois supérieur à celui de l'hydrogène produit à l'état gazeux). Les raisons sont d'une part, le coût élevé de l'énergie consommée pour la liquéfaction (il faut fournir 3,228 kWh/kg pour liquéfier l'hydrogène contre 0,207 kWh/kg pour la liquéfaction de l'azote par exemple) ; d'autre part, le coût important des réservoirs aptes à contenir l'hydrogène pour de longues périodes. Ce coût découle du fait que le stockage de l'hydrogène liquéfié nécessite des réservoirs cryogéniques performants, éventuellement munis d'une paroi remplie d'azote liquide. Ces réservoirs ont une forme généralement sphérique afin de minimiser le rapport surface sur volume et réduire du même coup le transfert de chaleur. Cependant, une isolation thermique optimale est insuffisante car une génération interne de chaleur peut avoir lieu dans le réservoir : Lorsque l'hydrogène est liquéfié, la température passe rapidement de 300 K à 20 K, corrélativement, la conversion de l'ortho hydrogène en para-hydrogène nécessite, en l'absence de catalyseur, un temps plus long (plusieurs jours) avant d'atteindre l'équilibre. De fait, la conversion se poursuit après entrepôt de l'hydrogène dans le réservoir et équivaut à une génération interne de chaleur entraînant l'évaporation d'une quantité importante de liquide (plus de la moitié de la quantité initiale). Pour éviter ces pertes on

dispose dans le liquéfacteur un catalyseur performant (du charbon actif ou de l'oxyde ferrique) qui absorbe la chaleur dégagée lors du refroidissement, en général par l'azote liquide. Cette étape supplémentaire dans la préparation de l'hydrogène liquide se répercute sur le coût global du stockage par liquéfaction.

### **II .5.2. Stockage par compression:**

Le stockage par compression est le procédé par lequel le gaz est conservé, pressurisé dans des réservoirs plus ou moins robustes. Ce procédé est plus aisé à mettre en œuvre que le stockage par liquéfaction, toutefois la densité de l'hydrogène obtenue reste très inférieure de celle de l'hydrogène liquide. Ainsi, à une pression de 1 bar, la masse volumique de l'hydrogène liquide à 20 K est de  $71,1 \text{ kg/m}^3$  ; pour l'hydrogène à 293 K, elle est de  $0,0827 \text{ kg/m}^3$  à 1 bar, de  $14,49 \text{ kg/m}^3$  à 200 bars et  $23,66 \text{ kg/m}^3$  à 350 bars. Par conséquent, pour avoir une énergie disponible par  $\text{m}^3$  importante, il est nécessaire d'augmenter les pressions de stockage et par conséquent le travail de compression. Cependant, des pressions de stockage élevées entraînent davantage de contraintes appliquées au réservoir. Incidemment, la résistance du réservoir implique une augmentation de son poids à vide, ce qui limite le poids supplémentaire d'hydrogène à stocker. La situation a radicalement changé avec la technologie des structures en fibre bobinée (verre, aramide, carbone) et résine (thermodurcissable ou thermoplastique) qui permettent de travailler à des pressions beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risques de rupture explosive indépendamment des agressions externes sévères. C'est ainsi que 35MPa est pratiquement devenu le standard actuel mais les recherches et les développements visent à mettre sur le marché des capacités certifiées pour une pression de service de 70MPa. On notera que ce niveau de pression correspond du point de vue de la masse à un optimum lié aux caractéristiques de compressibilité de l'hydrogène. Si l'état liquide s'impose indiscutablement quand le besoin de chiffre en tonnes voire dizaines de tonnes, le stockage à l'état gazeux sous pression présente de nombreux avantages quand les quantités mises en jeu ne dépassent pas quelques kilogrammes ou dizaines de kilogrammes. Cela fait du stockage par compression un procédé réservé à des quantités relativement modérées d'hydrogène.

### **II .5.3. Stockage par adsorption**

Certains matériaux poreux ont la propriété d'adsorber les gaz de manière efficace. Ces matériaux peuvent être des structures en charbon ou des hydrures métalliques.

### II.5.3.1. Stockage dans les structures en carbone

Ces structures sont constituées par des microcristaux de graphite dont l'enchevêtrement forme un réseau de pores ayant des diamètres de l'ordre du nanomètre. Lorsqu'elles sont cumulées, les surfaces latérales des pores représentent une surface considérable de plusieurs centaines à plusieurs milliers de m<sup>2</sup> par gramme de charbon actif. C'est sur cette surface que peuvent venir s'adsorber les molécules d'hydrogène se diffusant à travers le réseau de pores constitué.

### II.5.3.2. Stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrures

Quelques métaux et alliages ont la propriété de fixer réversiblement de l'hydrogène, en formant des hydrures solides, par réaction exothermique. Des variations de températures et de pression permettent de déplacer l'équilibre. Quelques hydrides métalliques sont disponibles commercialement et constituent une bonne solution pour le stockage de l'hydrogène quand le facteur poids n'est pas un problème. Les plus prometteurs semblent être :

- Mg<sub>2</sub>Ni, permettant une bonne capacité de stockage (1 kWh/kg), mais nécessitant une température de 265 °C pour assurer une pression d'hydrogène de 1 bar.
- Fe-Ti (0.5 kWh/kg), assurant une pression d'hydrogène de plusieurs bars à la température ambiante.

Pour les véhicules, le problème de l'hydride métallique est son poids élevé compte tenu de la quantité d'hydrogène stocké. Le problème du poids n'a pas encore été résolu en dépit des efforts importants de recherche. Les chercheurs ont donc essayé de réfléchir dans d'autres directions en tentant d'utiliser des alliages et en recherchant des méthodes d'obtention de concentrations en hydrogène plus élevées.

## II.6. Utilisations de l'hydrogène

La viabilité d'un système d'énergie à hydrogène solaire repose pour une certaine part sur les perspectives d'utilisation de l'hydrogène solaire, une fois produit et stocké, i.e. la faisabilité d'une conversion rentable et non polluante de son énergie chimique en énergie utilisable. Les machines concernées par cette conversion sont les piles à combustibles ainsi que les moteurs thermiques à hydrogène. Nous présentons ci-après un aperçu sur ces machines.

### II.6.1. Pile à combustible H<sub>2</sub>

Les piles à combustibles font actuellement l'objet de programmes importants de Recherche & 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.

### **II .6.2. Moteurs thermiques à hydrogène**

Du seul point de vue de la thermodynamique, tous les moteurs alternatifs (cycles Diesel, Otto ou à allumage commandé) ainsi que les turbines à vapeur et à gaz peuvent être convertis à l'hydrogène. Au niveau des véhicules automobiles, des moteurs thermiques bio-carburants ont été développés, utilisant aussi bien l'hydrogène que l'essence comme combustible. L'hydrogène utilisé est stockée sous forme liquide à bord du véhicule et alimente le moteur. Des prototypes de moteur à hydrogène de type V8 et V12 ont récemment été développés et présentés ; ceux-ci peuvent fournir une puissance utile supérieure à 135 kW pour une vitesse de pointe du véhicule de 215 km/h. L'autonomie est de 300 km pour 120 l d'hydrogène liquide embarqué, ce qui correspond à 8 kg de ce carburant. Dans le domaine aéronautique, l'utilisation de l'hydrogène dans les turbines à gaz date déjà de près d'un demi-siècle. Plusieurs modèles de turboréacteurs ont été modifiés, puis essayés au sol pour valider ces modifications, et ce, afin d'en mesurer les performances. Les travaux américains (Lewis Flight Propulsion Laboratory) menés depuis 1955 montrent qu'il est possible de trouver rapidement des solutions d'adaptation satisfaisantes.

### **Conclusion**

Les problèmes écologiques liés aux énergies fossiles et nucléaires ainsi que la limitation des ressources, compromettent le développement économique à venir de notre planète ; une situation pour laquelle, la demande croissante en énergie notamment des pays en voie de développement, joue un rôle aggravant. Le système d'énergie basé sur l'hydrogène d'origine solaire a été proposé comme solution à ces problèmes. L'hydrogène produit à partir de l'énergie solaire, sous forme directe ou indirecte, n'aura à priori aucune incidence sur l'environnement ; comme combustible solaire l'hydrogène permettra de stopper l'effet de serre et favoriser une restitution de la qualité de l'atmosphère, sérieusement entamée par les rejets polluants, dont principalement le CO<sub>2</sub>. Les différents procédés de production d'hydrogène par voie solaire ont été examinés. L'hydrogène est produit principalement à l'aide de procédés thermochimiques, électrolytiques et photo électrochimiques. Les cycles thermochimiques de l'eau semblent offrir des perspectives particulièrement intéressantes. Par ailleurs, le système d'électrolyse à haute température peut être retenu au vu des rendements prometteurs affichés. Sur le plan de l'utilisation de l'hydrogène, l'aperçu qui a été donné sur les piles à combustible ainsi que les moteurs thermiques adaptés à l'hydrogène a bien montré qu'il est techniquement possible de substituer efficacement l'hydrogène

aux hydrocarbures dans les installations de production d'énergie électrique, mécanique ou thermique. Un des principaux obstacles identifié dans la mise en œuvre d'une économie à hydrogène provient en fait de la capacité à stocker l'hydrogène d'une manière viable. De ce point de vue l'adsorption dans les nanotubes de carbone est apparue comme une voie féconde, qu'il s'agirait toutefois de bien maîtriser. Finalement et compte tenu de ces différents aspects. Il devrait y avoir plusieurs manières de transiter vers une économie à hydrogène solaire. La plus réaliste consisterait à utiliser les ressources fossiles et nucléaires dans une première étape, pour produire massivement l'hydrogène et l'imposer comme carburant. Il serait dès lors possible de basculer vers un système d'énergie à hydrogène solaire entièrement non polluant et durable. Dans un cas plus défavorable et de notre point de vue, une autre approche pourrait conduire à adopter le système d'énergie à hydrogène solaire comme un système d'appoint, conséquent. Dans le cadre d'une solution combinant une politique mondiale d'économie d'énergie efficace et une promotion des énergies renouvelables.

## **Chapitre III :**

# **Réalisation et perspectives**

### III.1. Introduction

Le site d'implantation de notre installation d'expérimentation est à l'université de M'Sila, cette installation est dédiée à l'étude et la caractérisation de système de système PV-électrolyseur-réservoir pour étudier un système de production d'hydrogène. L'objectif de notre travail est créés un prototype de production d'hydrogène a petite dimension couplée avec un panneau PV. Dans cette partie, nous représenterons les différentes étapes de réalisation d'un électrolyseur conçue conformément au modèle théorique étudié au chapitre précédent. Notre expérience a été réalisée au Bloc B de pôle universitaire de M'Sila.

### III.2. Réalisation de prototype :

#### III.2.1 Électrolyseur

La figure (III.1) présente l'électrolyseur réalisé dans le cadre de cette étude expérimentale. Il est Constitué par deux 20 rondelles métalliques identiques montées sur une tige filètes de 10 cm de longueurs. Cette dernière repose sur le couvercle d'un récipient cylindrique, ce récipient contenant de l'électrolyte octogonal, lui-même repose sur une monture inclinée de 35°.

#### III.2.2 Panneaux solaires

Le panneau solaire est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet Photo-électrique. Dans ce travail, un seul panneau photovoltaïque a été utilisé. Il a été placé à un angle d'inclinaison spécifique de 30 Vers le sud, comme angle idéal pour cette zone, le module solaire est un générateur de courant continu. Il se compose d'un groupe de cellules solaires connectées électriquement les unes aux autres. C'est une unité de base Pour les installations solaires, notamment dans les centrales solaires.

#### III.2.3 Multimètre

Un appareil de mesure intégré qui contient un certain nombre d'appareils de mesure dans un seul appareil. Cet appareil peut être de conception analogique ou numérique. Cet appareil complet contient les appareils suivants sous sa forme de base :

- Ampèremètre pour mesurer le courant électrique,
- Voltmètre pour mesurer la tension électrique,
- Ohmmètre pour mesurer la résistance électrique,
- Mesurer les températures.

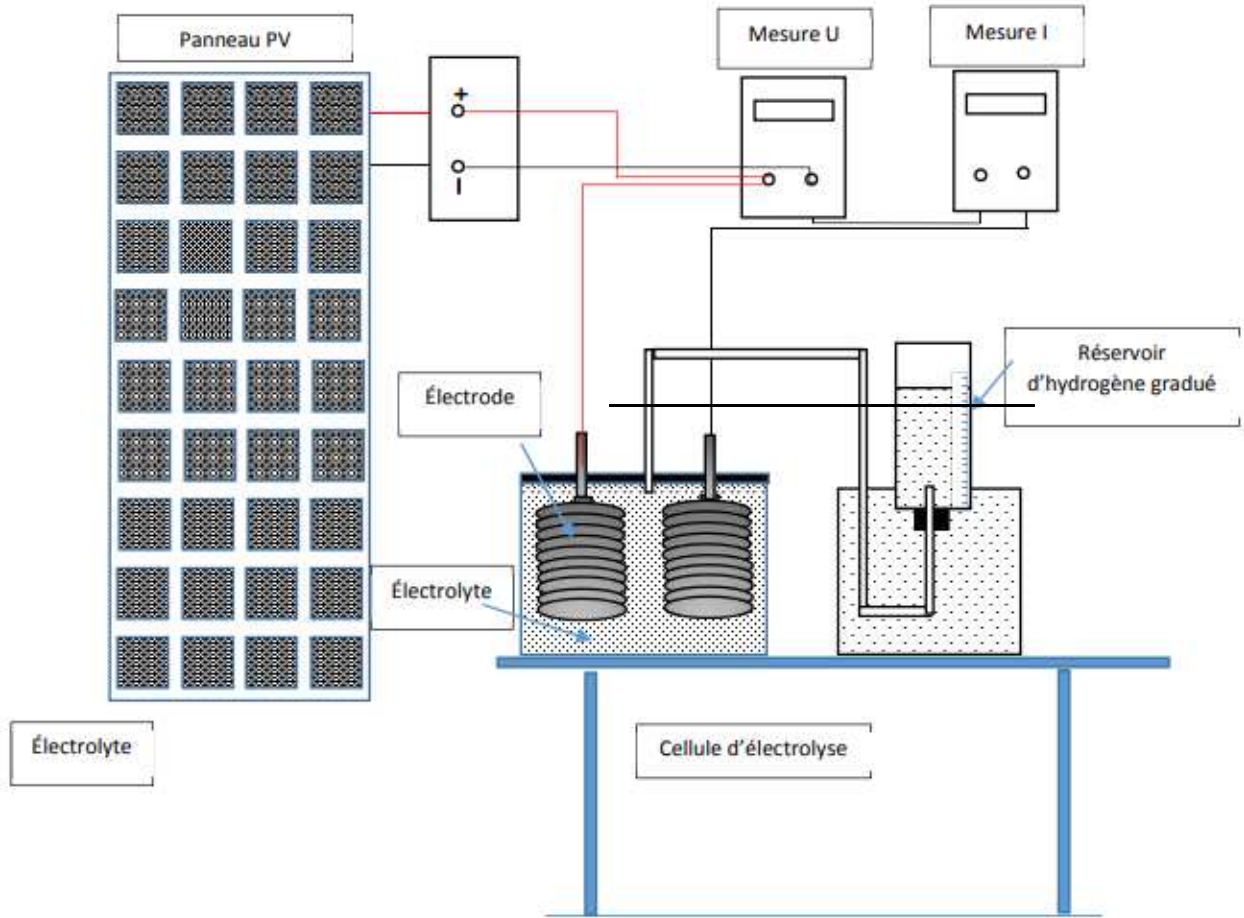


Figure III.1: Montage du prototype

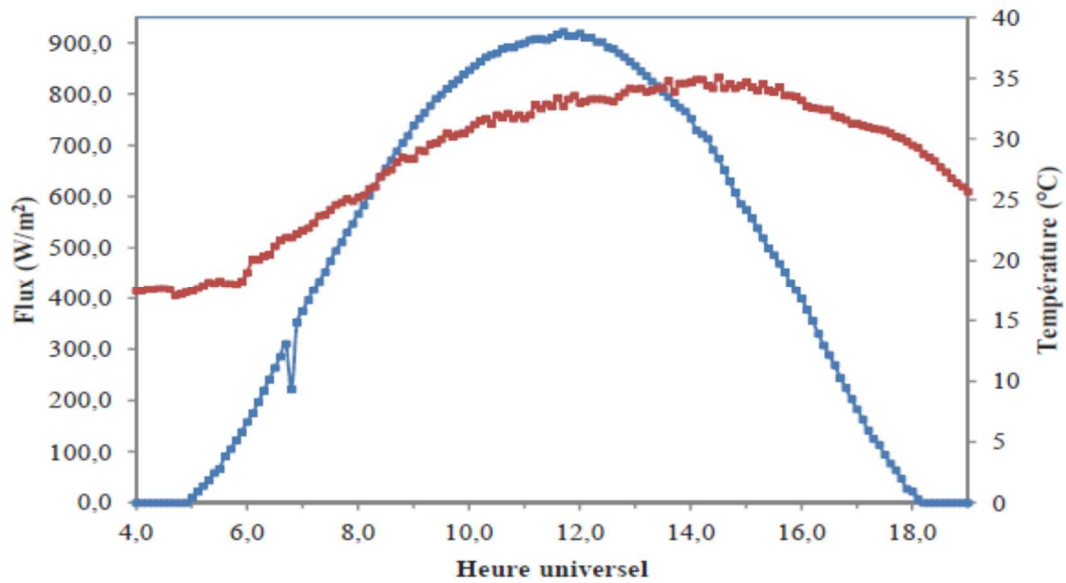


Figure III.2: La variation de rayonnement global et la température ambiante pour la journée de mesure (27/05/2024) au Bloc B (SM) de pôle universitaire de M'Sila.



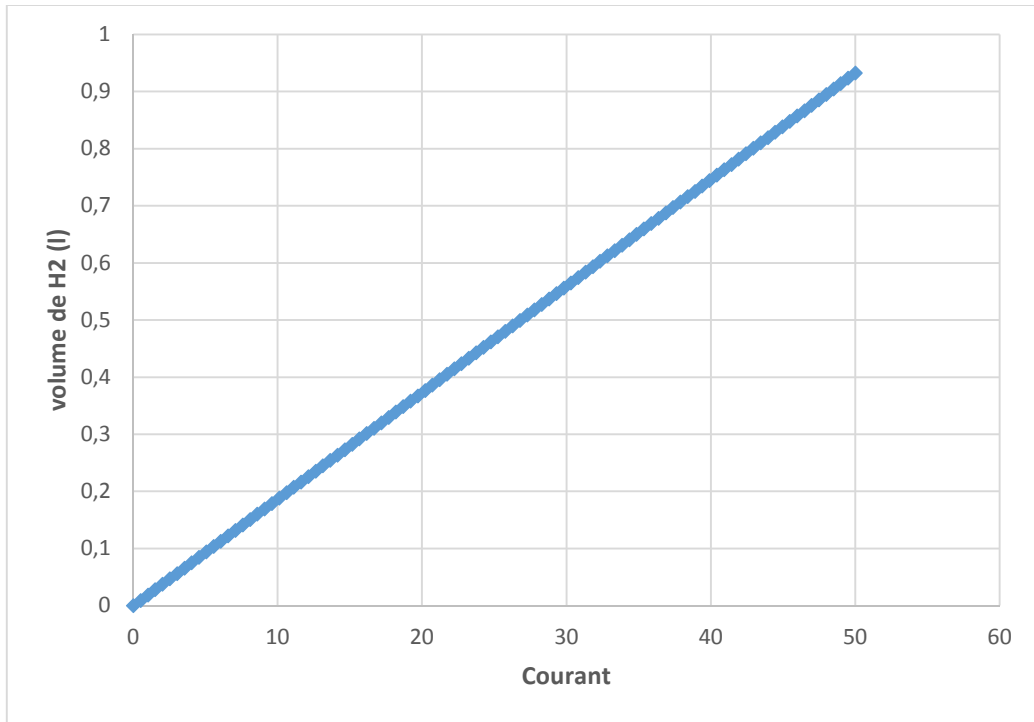
**Figure III.3:** Installation de prototype de production d'hydrogène au Bloc B (SM) de pôle universitaire de M'Sila.

Au début de l'électrolyse trois facteurs influent sur la vitesse de transfert des espèces entre l'électrolyte et l'interface qui devient lente :

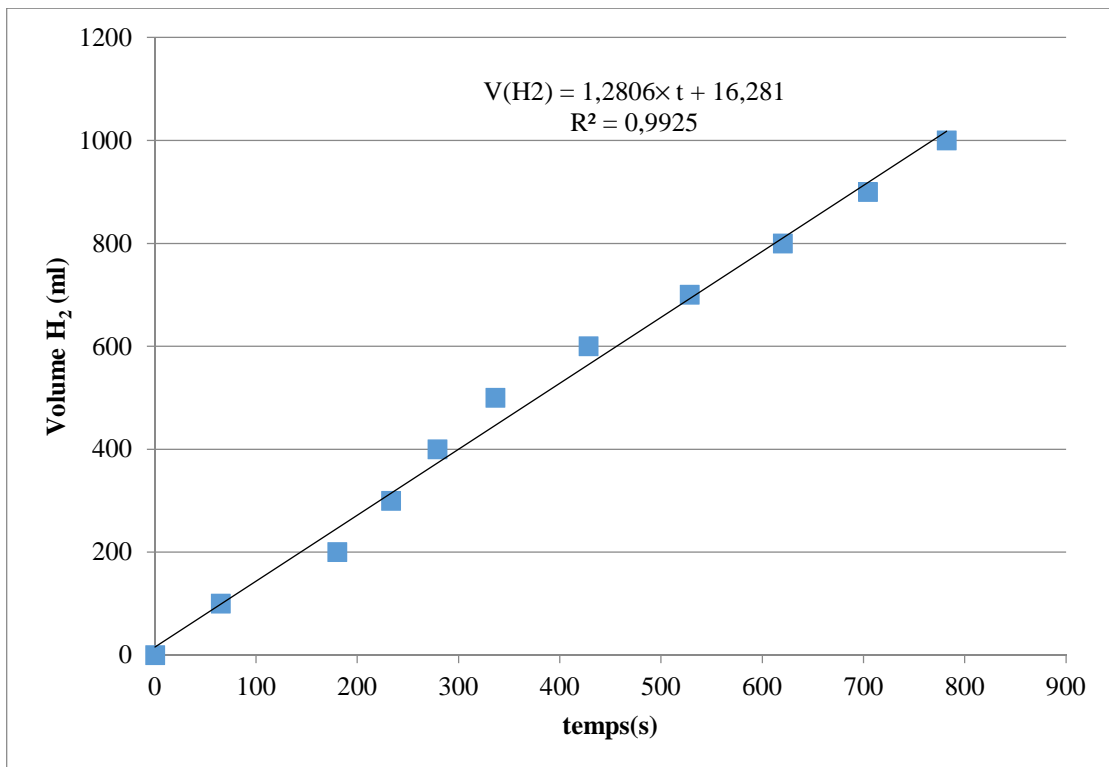
- La migration qui est une force due à la différence de potentiel entre les électrodes ( $F = qE$ ),
- La diffusion : une force due au gradient de la concentration (loi de Fick :  $J_i^d = -D_i \vec{\nabla} C_i$  ou  $D_i$  (en  $\text{Cm}^2/\text{S}$ ) ;  $\vec{\nabla} C_i$  gradient de concentration et  $J_i^d$  est la densité de flux),
- La convection : transport hydrodynamique qui dépend de la viscosité du milieu. [13 ,14]



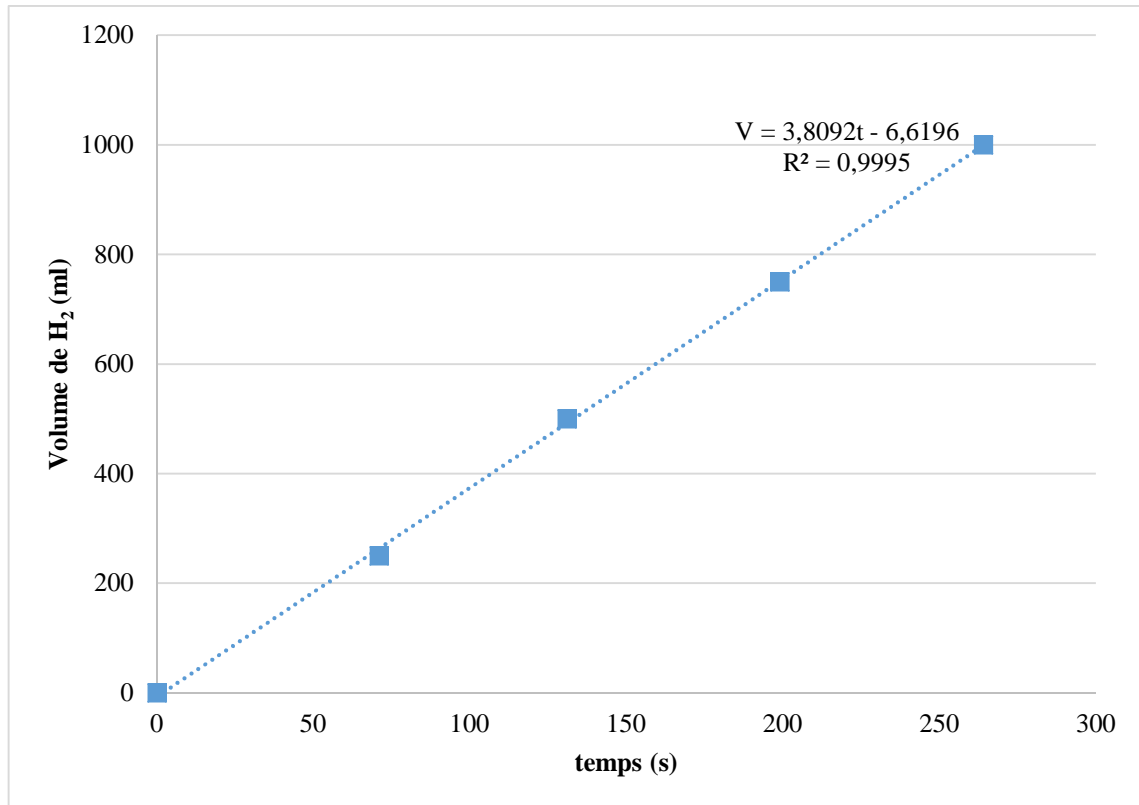
**Figure III.4:** Montage des instruments de mesure de notre installation



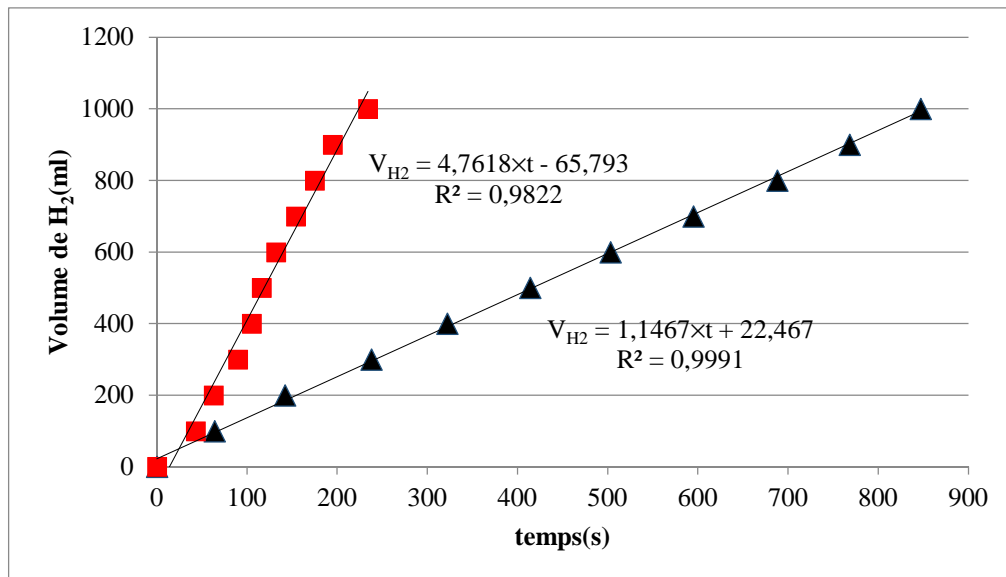
**Figure III.5 :** Production de l'hydrogène en fonction de courant



**Figure III.6 :** Production de l'hydrogène pour une tension U = 10 volts



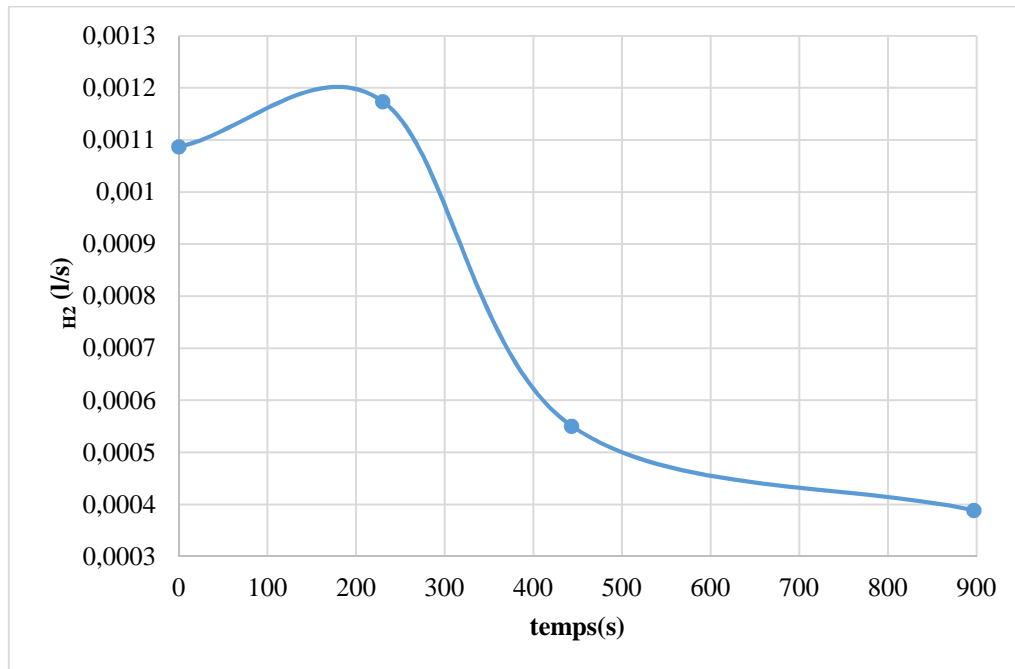
**Figure III.7 :** Production de l'hydrogène pour une tension  $U = 15$  volts



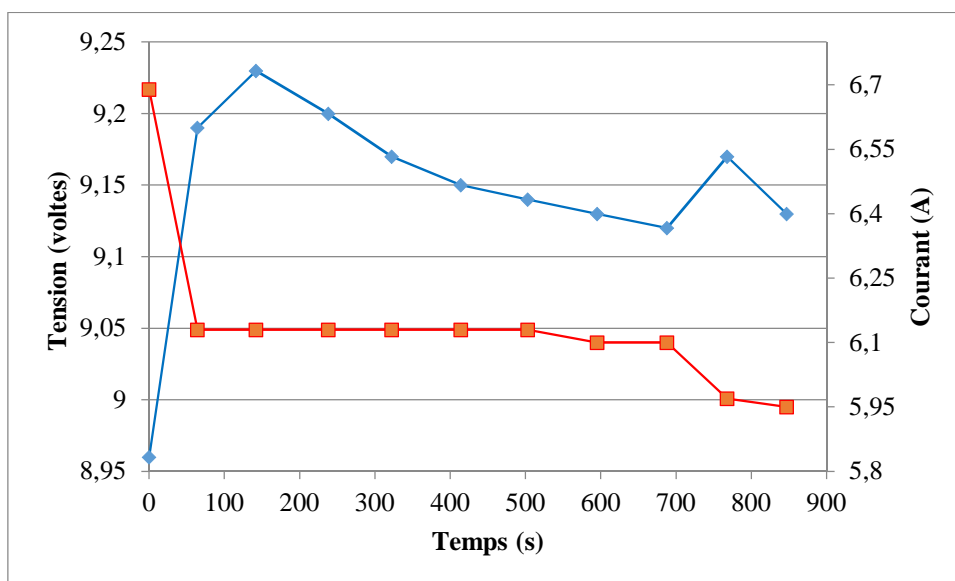
**Figure III.8 :** Influence de la tension de générateur sur la production d'hydrogène pour un panneau contient :36 modules en bleu et 45 modules en rouge

Les figures **Figure III.5** comportent les courbes de la variation de volume d'hydrogène produit en fonction du temps pour des tensions appliquées allant jusqu'à Figure III.8 en utilisant un électrolyte composé de l'eau distillé et de 10g de KOH. Nous remarquons que le volume d'hydrogène produit est proportionnel à la tension appliquée mais il débute avec une vitesse lente

puis il suit un régime stationnaire spécifique à chaque tension appliquée. On remarque également que la vitesse de la production d'hydrogène augmente considérablement avec l'augmentation de la tension appliquée entre les électrodes.



**Figure III.9 :** Variation de débit  $m_{H_2}$  en fonction du temps pour le panneau de 36 modules. La figure III.9 comporte la courbe de la variation du débit d'hydrogène produit en fonction de la tension appliquée pour diverses salinités (10 g/l de KOH) qui nous permet de remarquer que le comportement de cette variation reste le même pour toutes les salinités et qui suit une forme exponentielle avec un débit initial et une faible influence de la salinité sur le débit d'hydrogène produit.



**Figure III.10 :** Variation de la tension (bleu) et le courant (orange) en fonction temps

### III.3. Production d'hydrogène

L'hydrogène joue un rôle crucial dans la transition vers une économie à faible émission de carbone en tant que vecteur énergétique propre et polyvalent. Ses applications couvrent une large gamme de secteurs, de la production d'énergie et des transports à l'industrie chimique et métallurgique, en passant par le stockage d'énergie et les applications spatiales. Sa capacité à stocker et à fournir de l'énergie propre fait de l'hydrogène un élément clé de la décarbonation et de la lutte contre le changement climatique. La courbe de production d'hydrogène en fonction du courant dans un électrolyseur suit généralement une relation linéaire, en raison de la loi de Faraday de l'électrolyse. Cette loi stipule que la quantité de substance produite ou consommée à une électrode pendant une électrolyse est proportionnelle à la quantité d'électricité (courant) qui circule dans la cellule électrolytique.

#### Conclusion

L'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs thermiques présente une opportunité de transition vers une énergie plus propre tout en utilisant les technologies de combustion interne existantes. Cependant, des défis importants liés au stockage, à la sécurité et aux émissions de NO<sub>x</sub> doivent être surmontés pour que cette technologie soit largement adoptée. La recherche et le développement continu dans ce domaine sont essentiels pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la viabilité économique des moteurs thermiques à hydrogène. Dépendant de la tension électrique et du compromis effectué par le producteur avec le taux de production d'hydrogène, les rendements des électrolyseurs actuels s'étalent de 62% à 89% selon les technologies et les conditions, notamment celles de l'eau en entrée<sup>17</sup>. Ainsi, 4 à 5 kWh et 1 litre d'eau sont consommés par norme-mètre cube produit dans les électrolyseurs industriels<sup>18</sup>. Finalement, la production d'un kilogramme d'hydrogène, permettant un déplacement de 100 kilomètres pour tout véhicule léger à pile à combustible, nécessite de 44 à 55 kWh d'électricité et 11 litres d'eau. L'électrolyse constitue le procédé de production d'hydrogène décarboné le plus mature technologiquement. Toutefois, il ne contribue actuellement qu'à 1% de la production volontaire d'hydrogène du fait d'un manque d'investissements et de coûts dissuasifs.

**Conclusion**

**Générale**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la méthode de production d'hydrogène à partir de couplage direct entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur composé par des électrodes en acier. L'électrolyseur est considéré comme une technologie d'avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les piles à combustibles de technologie PEM, et de la réduction des coûts associée. Cette technologie reste encore peu employée au regard de la production mondiale d'hydrogène. Tout cela justifie la poursuite des travaux de recherche. L'objectif global de notre travail est l'étude d'un système photovoltaïque en vue de produire le maximum de l'hydrogène par électrolyse de l'eau sans pollution est avec des moyen locaux, la production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques, avec l'utilisation des données climatiques de la région de M'sila. Dans ce travail nous avons présenté une partie de modélisation des éléments constituant le système de production d'hydrogène solaire tels que le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur et ensuite la simulation de couplage direct PV-Electrolyseur pour un éclairage donné par les services météorologiques ainsi la température et la vitesse du vent. Aussi pour plusieurs mesures effectuées sur la cellule d'électrolyseur. Nous avons obtenu des résultats permettent de voir dans le premier cas de couplage direct entre le générateur du courant sur l'électrolyseur, le volume d'hydrogène produit est changé avec la valeur de la tension à chaque augmentation de la tension (5, 10 et 15 volts) la production de l'hydrogène devenir plus importante. Pour augmenter le volume d'hydrogène et améliorer le degré d'adaptions entre les éléments du système nous avons testé par l'utilisation de deux panneaux PV le premier dispose 36 modules et l'autre 45. Les résultats obtenus montrent un rapprochement considérable entre les points de puissances maximales du GPV et celle des points de fonctionnements de système et une nette amélioration des performances de système ce qui signifie une augmentation de volume d'hydrogène produit par le système. Comme perspective nous pensons à l'étude de système complet de production d'énergie électrique. Car l'outil de modélisation que nous avons développé permet de simuler le couplage direct GPV-Electrolyseur cet outil pourra être développé pour simuler le fonctionnement complet du système (GPV-Electrolyseur et pile à combustible).

# Références

- [1] A. H. Abdol Rahim, A. S. Tijani, W. A. N. W. Mohamed, S. Hanapi, and K. I. Sainan, "An Overview of Hydrogen Production from Renewable Energy Source for Remote Area Application," presented at the 3rd International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials, Melaka International Trade Center (MITC), Malaysia, 2013.
- [2] S. Siracusano, V. Baglio, N. Briguglio, G. Brunaccini, A. Di Blasi, A. Stassi, R. Ornelas, E. Trifoni, V. Antonucci, and A. S. Aricò, "An electrochemical study of a PEM stack for water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 1939-1946, 2012.
- [3]. Chennouf, N. (2014). "Perspectives de développement de la production industrielle de l'hydrogène dans le sud algérien à partir des énergies renouvelables" (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA)
- [4]. Fatima, K. O. R. B. A. A. (2019). " Etude de l'influence de la température d'hydrogène sur la tension de la pile à combustible" (PAC) (Doctoral dissertation, Université Mohamed El Bachir L'Ibrahim –Bordj Bou Arreridj).
- [5] AFH2. "Les données de base physico -chimiques sur l'hydrogène. Mémento de l'hydrogène", fiche 1.2, Avril 2011, 3p.
- [6]. Denis, J. B. (2016). "Étude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène dans le système Ti-V-Fe" (Doctoral dissertation, Paris Est)
- [7]. Bouziane, A. S., & Ouled Haddar, D. " Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes énergétiques hydrogène" (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,). Fiche 1.2, Avril 2011, 3p.
- [8] N. Hajjaji. "Analyse de cycle de vie exégetique de systèmes de production d'hydrogène". Thèse de Doctorat : Génie chimique procédés. Université de Nancy, 2011, 395p.
- [9]. Harouadi, F., Mahmah, B., Belhamel, M., Chader, S., M'raoui, A., & Etievant, C. (2007). "Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro-maghrébin Partie I: Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité. *Journal of Renewable Energies*", 10(2), 181-190.
- [10]. RAHMOUNI, S. " Etude prospective de la transition énergétique et l'impact environnemental en Algérie " (Doctoral dissertation, 2019). Université Kasdi Merbah Ouargla
- [11] A. Kalloe, "Development of control strategy of dc-dc converter for optimal operation of pv powered electrolyser, " December 2021.
- [12] T. U. Townsend, " A method for estimating the long term performance of direct-coupled

---

photovoltaic systems ". MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 1989.

[13] Sellami, M. Hassen, and K. Loudiyi. "Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2017): 13311335.

[14] Boualati, Yamina, and Salah Saouli. "Experimental study of hydrogen production using solar energy in Ouargla (South East Algeria)." *Journal of Solar Energy Engineering* 140.3 (2018).



## Installation de système de production d'hydrogène à l'aide d'un capteur photovoltaïque

### Résumé

Hydrogène est une option de carburant durable et l'une des solutions potentielles aux problèmes énergétiques et environnementaux actuels. Sa production respectueuse de l'environnement est cruciale pour un meilleur environnement et un développement durable. Cette note traite d'une façon de produire de l'hydrogène en utilisant l'énergie solaire. Une étude pilote a été menée pour évaluer les performances de la production d'hydrogène solaire photovoltaïque. Il a été constaté que la production d'hydrogène photovoltaïque est la méthode la plus respectueuse de l'environnement, mais son seul inconvénient est qu'elle a un rendement inférieur à celui de la production d'hydrogène solaire thermique. En revanche, la méthode solaire thermique nécessite un entretien de ses pièces mécaniques, tandis que la méthode photovoltaïque ne comprend aucune pièce mobile, ce qui signifie qu'elle ne nécessite aucun entretien. La production photovoltaïque d'hydrogène est associée à l'efficacité énergétique de l'énergie photovoltaïque.

**Mots clés :** production d'hydrogène, énergie solaire, panneaux solaires, électrolyse de l'eau, pile à hydrogène

### Installation of a hydrogen production system with help a photovoltaic panel

#### Abstract

Hydrogen is a sustainable fuel option and one of the potential solutions to current energy and environmental problems. Its environmentally friendly production is crucial for a better environment and sustainable development. This note discusses one way to produce hydrogen using solar energy. A pilot study was carried out to evaluate the performance of photovoltaic solar hydrogen production. Photovoltaic hydrogen production has been found to be the most environmentally friendly method, but its only drawback is that it has a lower efficiency than solar thermal hydrogen production. On the other hand, the solar thermal method requires maintenance of its mechanical parts, while the photovoltaic method does not include any moving parts, which means that it does not require any maintenance. Photovoltaic hydrogen production is associated with the energy efficiency of photovoltaic energy.

**Keywords:** Hydrogen production, solar energy, solar panels, water electrolysis, hydrogen cell

### تركيب نظام إنتاج الهيدروجين بمساعدة لوحة كهروضوئية

#### ملخص

يعد الهيدروجين خيارًا مستدامًا للوقود وأحد الحلول المحتملة لمشاكل الطاقة والبيئة الحالية. إن إنتاجه الصديق للبيئة أمر بالغ الأهمية من أجل بيئة أفضل وتنمية مستدامة. تتناول هذه المذكرة إحدى طرق إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية، حيث أجريت دراسة تجريبية لتقييم أداء إنتاج الهيدروجين الشمسي الكهروضوئي. لقد توصلنا إلى أن إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء باستخدام الألواح الشمسية هو الطريقة الأكثر صديقة للبيئة، ولكن عيبه الوحيد هو أنه يتمتع بكفاءة أقل من إنتاج الهيدروجين الحراري الشمسي. ومن ناحية أخرى، فإن الطريقة الشمسية الحرارية تتطلب صيانة أجزائها الميكانيكية، في حين أن الخلية الهيدروجينية لا تشمل أي أجزاء متحركة، مما يعني أنها لا تحتاج إلى أي صيانة. يرتبط إنتاج الهيدروجين الكهروضوئي بكفاءة استخدام الطاقة الكهروضوئية.

**الكلمات المفتاحية:** إنتاج الهيدروجين الطاقة الشمسية، الألواح الشمسية، التحليل الكهربائي للماء، الخلية الهيدروجينية