



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



THESE

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité: Énergétique

Présentée par :

Mansouri Abdelbasset , Guemmoula Abdeldjalil

Production et exploitation de l'hydrogène vert en Algérie

Soutenue le : 13/06/2023

Devant le jury :

S.Rahmouni	MCB	Présidente	Université de Ouargla
S.Kina	MAA	Examineur	Université de Ouargla
T.Guermit	MCA	Encadreur	Université de Ouargla

ANNÉE ACADÉMIQUE : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant qui nous a donné le courage, la patience et la volonté d'atteindre la fin de notre voyage. . Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadrant, M. GUERMIT TAHAR, pour ses indications et conseils précieux et sa disponibilité en écrivant ce souvenir. Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury, le Dr Somaya Rahmouni, président du comité, et le Dr Muhammad Salih Kaina, discutant du comité, pour l'intérêt qu'ils portent à nos recherches en acceptant d'examiner ce travail et d'enrichir avec leurs suggestions. Ma sincère gratitude à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à Faire le travail.

DEDICACES :

Je dédie ce mémoire à : - Mes parents : Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, qu'elle reçoit à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi. Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité. A toute ma famille, mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Production et exploitation de l'hydrogène vert en Algérie

Résumé :

L'hydrogène est le carburant et le vecteur énergétique du futur. Par l'hydrogène vert, nous entendons par l'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables, dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la production l'hydrogène par l'énergie solaire.

L'Algérie avec un emplacement très approprié pour l'utilisation de l'énergie solaire, car il a une durée de rayonnement et une quantité d'énergie très importantes, ce qui fait de l'Algérie un endroit approprié pour la production d'hydrogène par l'énergie solaire. Dans ce travail, nous avons utilisé un programme de calcul en MATLAB pour donner l'estimation de la production d'hydrogène vert et son coût dans certaines wilayas du sud algérien en utilisant l'électrolyse de l'eau. Après résultats trouves ont été analysés et discutés.

Abstract :

Hydrogen is the fuel and energy carrier of the future. By green hydrogen we mean hydrogen produced from renewable energy sources, in this study we focused on hydrogen production by solar energy.

Algeria has a very suitable location for the use of solar energy, because of its very large radiation duration and amount of energy, which makes Algeria a suitable place for hydrogen production through solar energy. In this work, we used a calculation program in MATLAB to give an estimate of green hydrogen production and its cost in some states of southern Algeria using water electrolysis. After finding the results, they were analyzed and discussed.

ملخص:

الهيدروجين هو ناقل الوقود والطاقة في المستقبل. نعني بالهيدروجين الأخضر الهيدروجين المنتج من مصادر الطاقة المتجددة، في هذه الدراسة ركزنا على إنتاج الهيدروجين بواسطة الطاقة الشمسية.

تتمتع الجزائر بموقع مناسب جداً لاستخدام الطاقة الشمسية، لما لها من مدة إشعاع كبيرة جداً وكمية من الطاقة، مما يجعل الجزائر مكاناً مناسباً لإنتاج الهيدروجين عن طريق الطاقة الشمسية. في هذا العمل، استخدمنا برنامج حساب في MATLAB لإعطاء تقدير لإنتاج الهيدروجين الأخضر وتكلفته في بعض ولايات جنوب الجزائر باستخدام التحليل الكهربائي للماء. بعد العثور على النتائج تم تحليلها ومناقشتها.

Sommaire

Symboles	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
Introduction générale	01

Chapitre I : Généralités sur L'hydrogène

I.1 Introduction	03
I.2.L'hydrogène	03
I.2.1 Historique	03
I.2.2. Définition	04
I.2.3.L'hydrogène vert	04
I.3 Propriétés de l'hydrogène	04
I.4.L'hydrogène énergie	06
I.5.Techniques de production de l'hydrogène	08
I.5.1.Le reformage à la vapeur	08
I.5. 2.L'oxydation partielle	09
I.5.3. Reformage auto thermique	09
I.5.4.L'électrolyse de l'eau	09
I.6. Sources de Production de l'hydrogène	10
I.6.1. Production de l'hydrogène à partir des combustibles fossiles	10
I.6.1.1 Production de l'hydrogène à partir du gaz naturel	10
I.6.1.2 Production de l'hydrogène à partir du charbon	11
I.6.2.Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau	11
I.6.3. Production de l'hydrogène par nucléaire	12
I.6.4.Production de l'hydrogène par énergie renouvelable	13
I.6.4.1.Production de l'hydrogène à partir de la biomasse	14
I.6.4.2 Production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire	15
I.7 Potentiel de production d'hydrogène vert	17

I.8.Stockage de l'hydrogène	18
I.8.1.Stockage gazeux	18
I.8.2.Stockage liquide	19
I.8.3.Stockage solide	19
I.9.Domains d'utilisation de l'hydrogène	20
I.9.1.Utilisation chimique	20
I.9.2.Utilisation énergétique	20
I.10.Transport de l'hydrogène	21
I.10.1. Pipeline	21
I.10.2.Rail	21
I.10.3.Navire	22
I.10.4.Camion	22
I.11 Conclusion	23

Chapitre II : Les Modes de production de L'hydrogène

II.1. Introduction	24
II.2. Modes de production de l'hydrogène	24
II.3.Production à partir des énergies fossiles	25
II.3.1. Production à partir du gaz naturel	26
II.3.2. Production à partir du charbon	28
II.4 Production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire	28
II.4.1 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau	30
II.4.1.1 Introduction	30
II.4.1.2 Principe général de l'électrolyse de l'eau	31
II.4.1.3 Qualité de l'eau d'alimentation	31
II.4.1.4 Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau	31
II.4.1.4.1 Thermodynamique	31
II.4.1.5 Les différentes technologies d'électrolyseurs	32
II.4.1.5.1 Électrolyseurs alcalins	32

II.4.1.6. Électrolyse à haute température	34
II.4.1.7. Électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM)	34
II.5. Production par la Biomasse	35
II.5.1. Gazéification de la biomasse	36
II.5.2. Production Photo-biologique (bio photolyse)	37
II.6 Production par l'énergie nucléaire	37
II.7. Rendement Production d'hydrogène	38
II.8. Conclusion	38

Chapitre III : L'hydrogène vert en Algérie

III.1 Introduction	40
III.2. Exploitation de l'hydrogène vert en Algérie	40
III.2.1 Transport	40
III.2.2 Stockage d'énergie	40
III.2.3 Secteur indus	40
III.2.4 Alimentation électrique hors réseau	40
III.3 Système solaire photovoltaïque :	41
III.3.1. Introduction	41
III.3.2. Rayonnement solaire	42
III.3.3. Durée in solution	42
III.3.3.1. Générateur Photovoltaïques	43
III.3.4 Électrolyseur	44
III.4 Estimation de la production de l'hydrogène Algérie	45
III.5 Cout Estimation de la production de l'hydrogène Algérie	46
III.6 Résultats	49
III.7. Résultats et discussion	50
III.8. Conclusion	54
Conclusion générale	55
Références	56

Symboles :

ΔH : enthalpie de dissociation de l'eau kJ/mol

PV : Photovoltaïque

PEM : membrane échangeuse de protons

R : constante molaire des gaz (= $8,314\ 4\ \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

T (K) : température thermodynamique,

IMET® : (Inorganic Membrane Electrolysis Technology)

IGCC : Integrated Gâtification Combined Cycle

C_p : Capacité thermique J/kg K

PEMFC : piles à combustible

HTGR : High Température Gaz

VPC : véhicules à pile à combustible

Listes des figures :

Chapitre I : Généralités sur L'hydrogène	
Figure I.1 : Chronologique de L'histoire de L'hydrogène	02
Figure. I.2 : schéma énergétique	04
Figure I.3 : Densité massique énergétique de différents vecteurs	06
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur	08
Figure I.5 : Réacteur à refroidissement (a,b)	11
Figure I.6 : Filières de synthèse de l'hydrogène par voie solaire	14
Figure I.7 : Projet 'HYDROSOL', Réacteur monolithique	15
Figure I.8 : Potentiel d'hydrogène solaire	15
Chapitre II : Les Modes de production de L'hydrogène	
Figure II.1 : Principales méthodes de la production d'hydrogène	23
Figure II.2 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde	24
Figure II.3 les voies les plus connues pour la production de l'hydrogène	25
Figure II.4 : Production d'hydrogène par l'énergie solaire	29
Figure II.5 : Principe de l'électrolyse alcaline	32
Figure II.6 : Schéma d'une cellule d'électrolyse PEM	33
Figure II.7 : Principe de production photo-biologique d'hydrogène	36
Chapitre III : hydrogène vert en Algérie	
Figure .III.1 Rayonnement horizontal et normal quotidien en juillet	41

Figure III.2 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	43
Figure III.3 : production d'hydrogène vert annuel pour différents wilayas	49
Figure III.4 : cout de la production d'hydrogène vert annuel	49
Figure III.5 : Production d'hydrogène vert et flux solaire en termes wilayas	50
Figure III.6 : Production d'hydrogène vert et cout en termes wilayas	51
Figure III.7 : Production mensuelle d'hydrogène vert en termes wilayas	52

Liste des tableaux :

Chapitre I : Généralités sur L'hydrogène	
Tableau I.1 : les données de base physico-chimiques de l'hydrogène	05
Tableau I.2 : Les différents types de réservoirs gazeux	19
Chapitre II : Les Modes de production de L'hydrogène	
Tableau II.1 : Comparaison des technologies pour la production H ₂ à partir du gaz naturel	27
Tableau II.2 : Principales caractéristiques des électrolytes	35
Chapitre III : hydrogène vert en Algérie	
Tableau III.1 : Panneau photovoltaïque Polycristallin 330Wc VICTRON	44
Tableau III.2 : Caractéristiques Électrolyseur PEM	45
Tableau III.3 : cout de production d'hydrogène vert par Wilaya	49
Tableau III. 4 : Production d'hydrogène vert des différents Wilaya par mois	49

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est bien placée pour jouer un rôle de premier plan dans le domaine de l'hydrogène en raison de son vaste potentiel solaire, de son vaste réseau électrique et de ses infrastructures de transport de gaz naturel. Ce pays a alloué un budget important pour l'exploitation de l'hydrogène vert, en ligne avec ses plans de développement des ressources et d'exportation d'hydrocarbures.

L'hydrogène vert attire l'attention mondiale en tant que source d'énergie propre et durable. L'Algérie, riche en ressources naturelles, a l'opportunité de devenir un acteur majeur dans la production et l'exploitation de l'hydrogène vert.

L'hydrogène vert est produit en utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne pour séparer l'hydrogène de l'eau par électrolyse. Contrairement à l'hydrogène gris, qui est produit à partir de combustibles fossiles et génère des émissions de carbone, l'hydrogène vert est neutre en carbone et joue un rôle essentiel dans la transition vers une économie bas carbone [1].

L'Algérie dispose d'un énorme potentiel en matière d'énergie solaire et éolienne, Exploiter ces ressources renouvelables pour produire de l'hydrogène vert permettrait à l'Algérie de diversifier son mix énergétique, de réduire sa dépendance aux énergies fossiles et de contribuer à la lutte contre le changement climatique.

L'hydrogène vert offre également des opportunités économiques en répondant à la demande croissante d'énergie propre à l'échelle mondiale. Il peut être utilisé dans les secteurs des transports, de l'industrie et du logement, créant de nouveaux emplois, de nouvelles industries et attirant des investissements étrangers.

Pour tirer pleinement parti du potentiel de l'hydrogène vert, l'Algérie devra investir dans des infrastructures appropriées, notamment un électrolyseur et des installations de stockage d'hydrogène.

Dans cette étude, nous étudierons la production d'hydrogène vert dans certaines parties du sud algérien en utilisant l'énergie solaire et le procédé d'électrolyse de l'eau, qui ont été abordés dans notre recherche [2].

Pour évaluer la proportion de production d'hydrogène solaire et son coût en Algérie, l'utilisation de logiciels de simulation tels que MATLAB peut être très utile. MATLAB est un logiciel de calcul scientifique largement utilisé, offrant des fonctionnalités avancées pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes.

Introduction générale

À l'aide de MATLAB, nous avons construit un modèle mathématique du système de production d'hydrogène solaire, en tenant compte de variables telles que l'intensité du rayonnement solaire, la température ambiante, l'efficacité de l'électrolyseur et d'autres paramètres pertinents. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour simuler le fonctionnement du système dans diverses conditions et améliorer ses performances.

Ce travail a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre : aborde les concepts généraux de l'hydrogène, ses principales propriétés, ses types et ses diverses sources, ainsi que la production, le stockage et les domaines d'utilisation de l'hydrogène.

Le deuxième chapitre : présente les méthodes de production d'hydrogène, en mettant en évidence le processus spécifique de l'électrolyse de l'eau et le principe de fonctionnement de ce processus.

Le troisième chapitre : présente les résultats, Nous avons utilisé un programme en MATLAB pour présenter l'estimation et le coût de la production d'hydrogène vert dans la région sud de l'Algérie.

Et on termine avec une conclusion générale regroupant les différents aspects étudiés.

Chapitre I : Généralités sur l'hydrogène

I.1 Introduction :

Aujourd'hui l'hydrogène est utilisé dans le raffinage, la chimie ou l'industrie. Il est souvent présenté comme un vecteur énergétique d'avenir pour le secteur des transports. Mais, il a des propriétés physiques peu adaptées à cet usage et n'existant pas à l'état pur, l'hydrogène reste pour l'instant en équilibre entretenu. Capable de fournir de bonnes performances environnementales, et dans ce chapitre, nous discuterons des propriétés générales de l'hydrogène et de sa production.

I.2.L'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.

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].

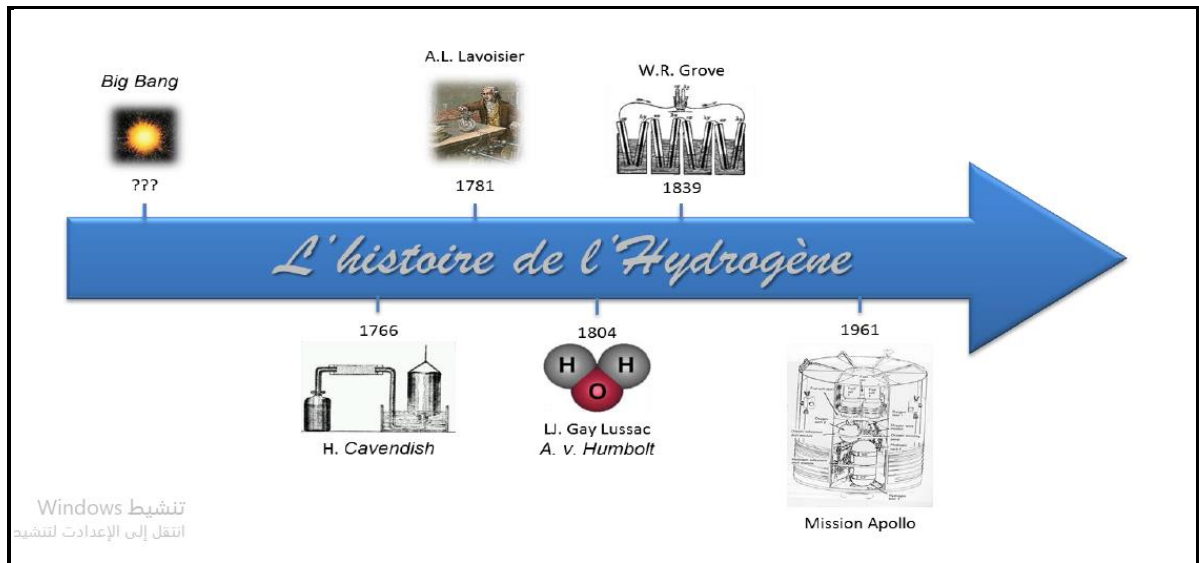


Figure I.1: Chronologique de L'histoire de L'hydrogène [3].

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 décarbonation, 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.L'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
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10800kJ/Nm ³ 119930kJ/kg(gaz naturel) 150020kJ/kg 3.00kWh/Nm ³ 33.33kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12770kJ/Nm ³ 141860kJ/kg 3.55kWh/Nm ³ 39.41kWh/kg
Densité gazeuse à20, 3K	1.34kg/m ³
Densité gazeuseà273K	0.08988kg/Nm ³ (gaz naturel) 0.6512kg/Nm
Densitéliquideà20.3K	70.79kg/m ³
Chaleur spécifique(C_p)	14266 J/kg.K (293K)
Chaleur spécifique(C_v)	10300J/kg.K
Conductivité thermique du gaz	0.1897W/(m.K)
Chaleur d'évaporation	445.4kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112J/g(3.92kWh/kg)
Electronégativité(Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Constante du gaz	4124.5J/kg.K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à1013 mbar abs.)	20.268K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol%)	4-75(gaz naturel5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65(gaz naturel6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (μJ)	20(gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m³degaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)

Suppression de détonation (mélange stœchiométrique)	14.7bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260cm/s (7foisle gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0km/s(gaz naturel1.8km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53%(gaz naturel 9.48%)

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 FigureI.2. Chaque année, environ 30 millions de tonnes d'hydrogène sont produites dans le monde, dont la moitié est principalement utilisée pour produire du NH3.

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 freinée 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].

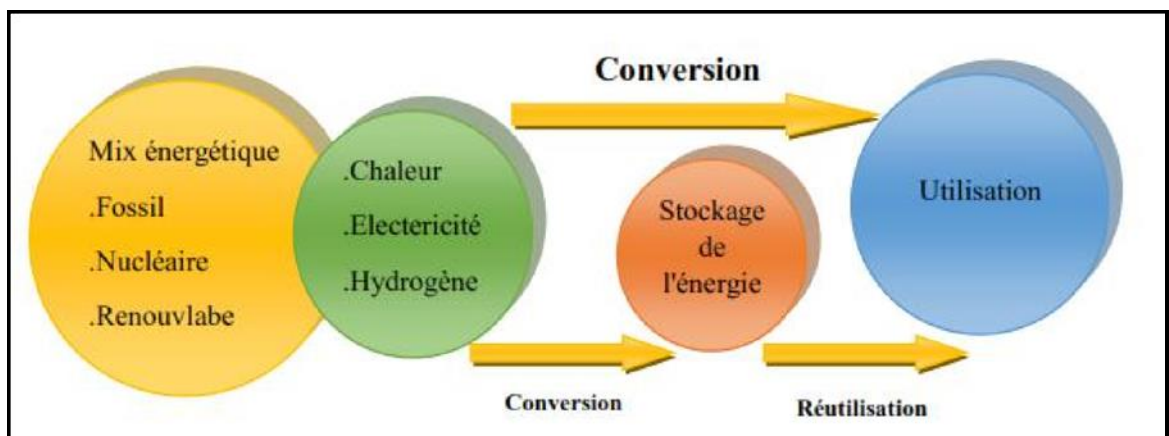


Figure I. 2: schema energetique [6].

Divers procédés peuvent être utilisés, notamment chimiques, biologiques, thermochimiques, électrolytiques et photo lytiques. 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 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].

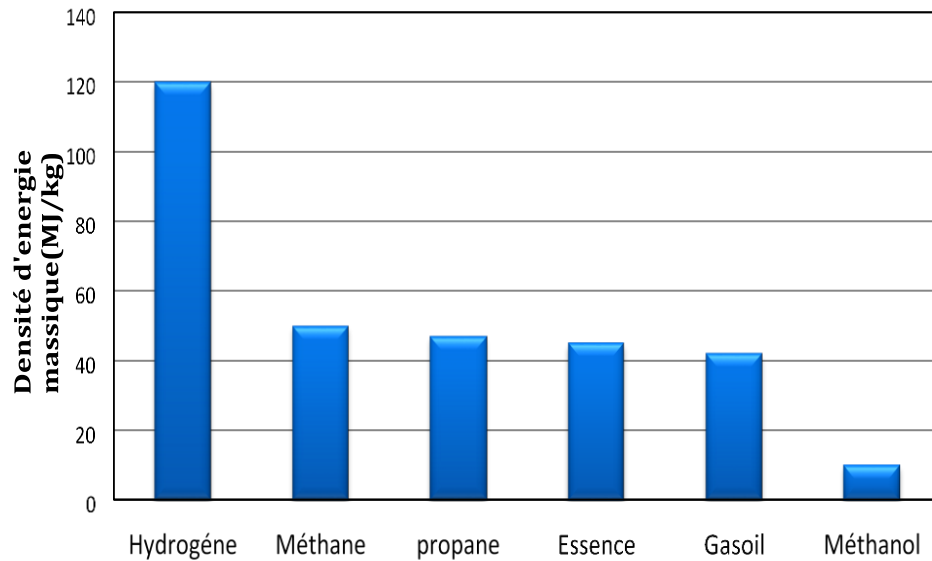


Figure I.3: Densité massique énergétique de différents vecteurs [6].

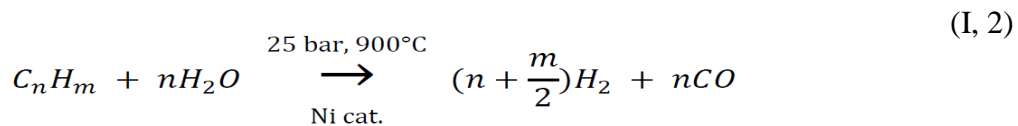
En revanche, dans les conditions de température et de pression ambiantes, l'hydrogène possède une masse volumique très faible, ce qui lui fait occuper à masse égale, un volume bien plus grand que l'essence. L'un des enjeux principaux liés à l'utilisation de l'hydrogène réside donc dans son stockage [6].

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

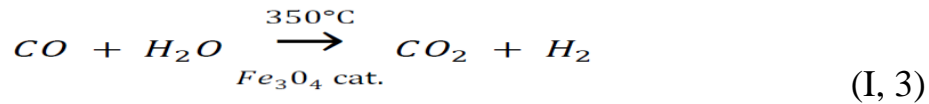
L'eau est la principale source d'hydrogène sur Terre, et diverses techniques sont employées pour sa production :

I.5.1. Le 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.



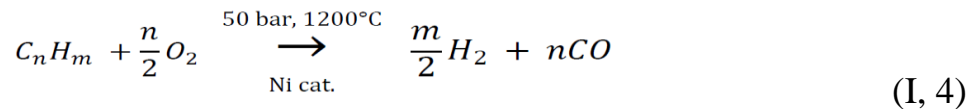
Le gaz de synthèse est un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone, qui est produit lors de la première réaction. Ensuite, pour augmenter la concentration en hydrogène, une deuxième réaction appelée "réaction de conversion à l'eau" est effectuée. Cette réaction transforme une partie du monoxyde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

I.5.4.L'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 Nm³/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].

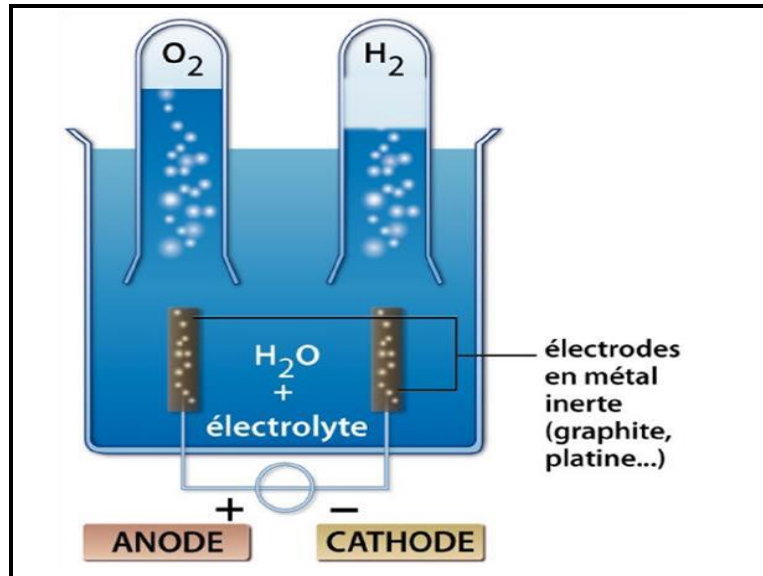


Figure I.4: Principe de fonctionnement d'un électrolyseur [6].

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].

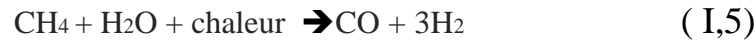
I.6.1. Production de l'hydrogène à partir des combustibles fossiles :

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].

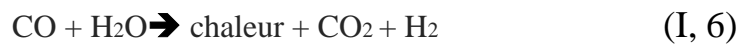
I.6.1.1 Production de l'hydrogène à partir du gaz naturel :

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.

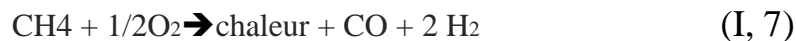
Le processus de reformage à la vapeur est une technologie de pointe d'aujourd'hui (environ 95% de l'hydrogène produit aujourd'hui dans les Etats-Unis se fait via le méthane de reformage à la vapeur). Il convertit le méthane et la vapeur d'eau en hydrogène et en monoxyde de carbone dans une réaction endothermique.



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 CO₂ 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 :

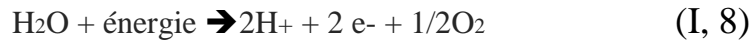
Bien que le charbon soit considéré comme un combustible polluant en raison de ses fortes émissions de gaz à effet de serre, il peut être utilisé pour produire de l'hydrogène propre. Le charbon peut alors devenir une source majeure d'hydrogène propre, le développement de technologies de charbon propre 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^{ème} 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].

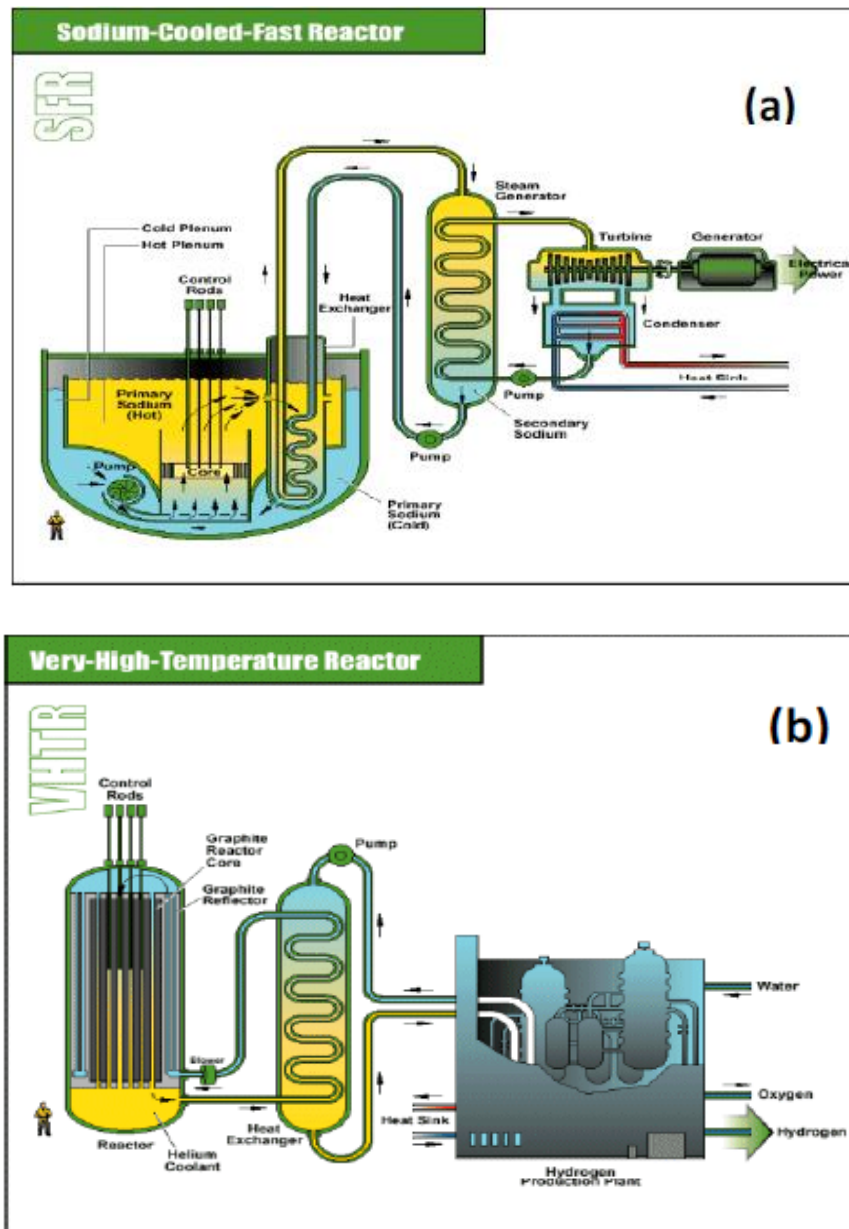


Figure I.5: Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène (a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (b) Réacteur à gaz à haute température [7].

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 CO₂ 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 CO₂ 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 adaptés pour moins cher et inférieurs 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. 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].

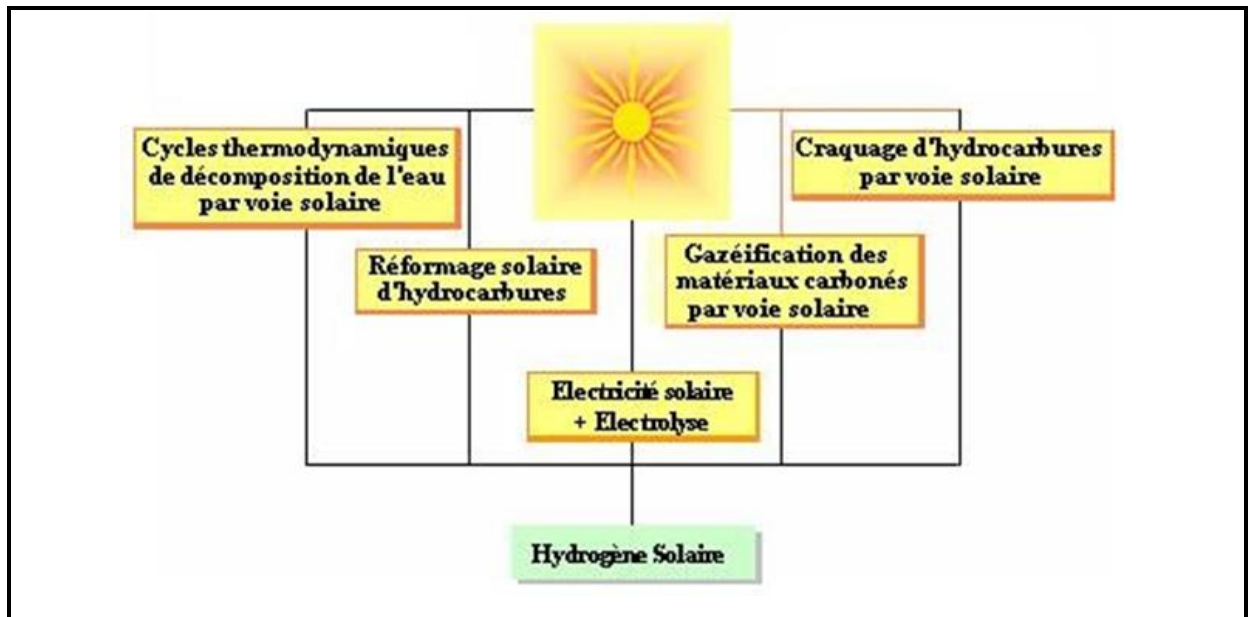


Figure I.6: Filières de synthèse de l'hydrogène par voie solaire [9].

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 m³ de H₂/m²/an pour le fractionnement de l'eau, 803 m³ de H₂/m²/an pour le reformage à la vapeur, et 1122 m³ de H₂/m²/an pour le craquage du méthane sous une exposition solaire de 2200 kWh/ m²/an. Pour illustrer ces chiffres, on note qu'une surface de collecteurs comprise entre 445 et 3550 km² est suffisante pour assurer la production mondiale actuelle d'hydrogène qui est de l'ordre de 500 milliards de m³ par an.

Le recours aux unités de filières solaires thermiques, offre de nouvelles opportunités aux régions du monde fortement ensoleillées, comme les pays du Maghreb, et qui peuvent ainsi devenir d'importants producteurs «d'hydrogène énergie» [9].

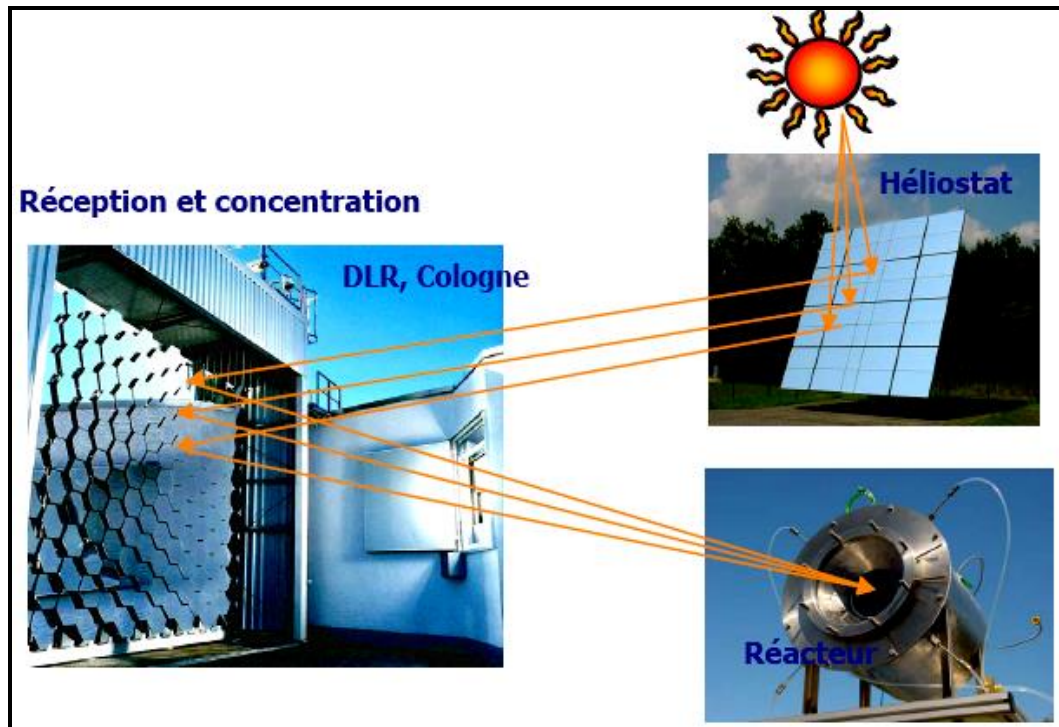


Figure I.7: Projet 'HYDROSOL', Réacteur monolithique pour la production d'hydrogène via la dissociation de l'eau par voie solaire [9].

I.7 Potentiel de production d'hydrogène vert :

La figure suivante représente la carte du potentiel d'hydrogène produit à partir de l'énergie solaire en utilisant les panneaux photovoltaïques monocristallins considérés. Pour tous les résultats, l'unité de potentiel est des tonnes d' H_2 par km^2 par an. Figure .8

Le potentiel de production d'électricité solaire et de l'hydrogène solaire sont directement proportionnel ; La région qui a le potentiel de production d'électricité le plus élevé donc la production d'hydrogène la plus estimée. A l'échelle nationale, le potentiel de la production d'hydrogène solaire est estimé à $0.24 \text{ Mt}/km^2$ annuellement, dont la production varié entre 4437 et 6327 tonnes/ km^2 . En fait, l'estimation de l'hydrogène solaire dans le pays présente pas de différences importantes entre toutes les régions. En outre, le plus grand potentiel de production d'hydrogène solaire sur l'ensemble du territoire est situé dans le sud de l'Algérie [10].

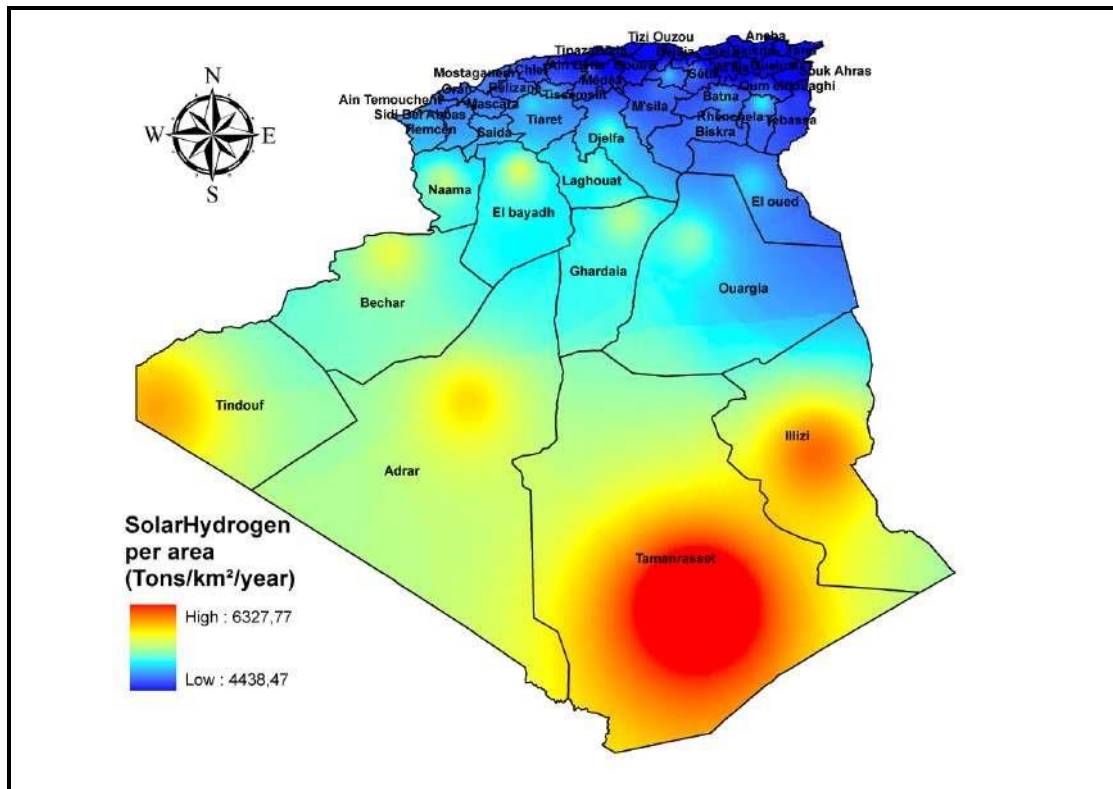


Figure I.8: Potentiel d'hydrogène solaire [10].




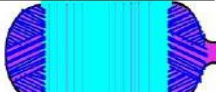




I.8. Stockage de l'hydrogène : [7]

I.8.1. Stockage gazeux :

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse est la méthode la plus commune. Pour augmenter sa densité d'énergie volumétrique, le gaz d'hydrogène est comprimé sous haute pression allant jusqu'à 700 bars. Ceci impose d'une part, une perte d'énergie de 20% lors de la compression et de sévères exigences en terme de sécurité, et d'autre part, des pénalités en terme de coût liées à la quantité et le prix du matériau composite à utiliser pour le renforcement de la structure du réservoir de stockage. Par conséquent, les recherches se concentrent sur le développement de matériaux composites moins chers sans compromettre les capacités volumétrique et gravimétrique du réservoir. Deux approches sont suivies pour améliorer les performances de cette technique : l'adaptation de la forme du réservoir généralement cylindrique afin d'exploiter au

Maximum l'espace restreint dans le véhicule, et la compression de l'hydrogène à 77 K, température de l'azote liquide, permettant ainsi de stocker plus de gaz dans le même volume.

Tableau I. 2 : Les différents types de réservoirs gazeux [7].

TYPE	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à hydrogène. Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium dans le cas de type III).

I.8.2. Stockage liquide :

L'hydrogène est transformé de son état gazeux à l'état liquide en le refroidissant à une température de 20 K sous pression atmosphérique. Bien que la capacité volumétrique de l'hydrogène à cet état soit supérieure à celle à l'état gazeux (70 kg/m³ comparée à 39 kg/ m³ pour le stockage à 700 bars), stocker l'hydrogène à cette basse température résulte en des pertes thermiques inévitables et une évaporation journalière de l'hydrogène stocké, ramenée à 1% par jour pour un système super-isolé. L'inconvénient majeur du stockage liquide est l'énergie requise pour la liquéfaction d'hydrogène, représentant 30% de son pouvoir calorifique inférieur, ce qui pénalise gravement le rendement global de ce mode de stockage.

I.8.3. Stockage solide :

Le stockage de l'hydrogène sous une forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique réversible

de l'hydrogène avec les Atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les allante.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux [7].

I.9. Domaines d'utilisation de l'hydrogène :

I.9.1. Utilisation chimique :

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il se combine avec l'azote en présence d'un catalyseur pour former de l'ammoniac, avec le soufre pour former du sulfure d'hydrogène, avec le chlore pour former du chlorure d'hydrogène et avec l'oxygène pour former de l'eau. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène a lieu à température ambiante et seulement en présence d'un catalyseur, tel que le platine finement divisé. Lorsque l'on enflamme un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène, il se produit une explosion.

L'hydrogène se combine également avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. L'hydrogène agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre : le gaz entraîne l'oxygène et laisse le métal à l'état libre. L'hydrogène réagit avec les composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants.

I.9.2. Utilisation énergétique :

Il est extrêmement simple : il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de température, de 70°C à 100°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des

électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé [11].

I.10. Transport de l'hydrogène :

La réussite économique de l'hydrogène dépend en grande partie de l'émergence de systèmes de transport efficaces. Le transport joue un rôle essentiel dans la création d'un marché de l'hydrogène dans différentes régions. Il permettra de transporter l'hydrogène à l'intérieur des régions et entre les différentes régions. Le choix du mode de livraison le plus louable (camions à gaz comprimé, camions liquides cryogéniques ou gazoducs) dépendra des caractéristiques géographiques et des marchés locaux, tels que la densité de population, la taille et le nombre de stations de ravitaillement et la pénétration du marché des véhicules à pile à combustible. Selon de nombreux experts, les principaux facteurs influençant le choix du mode de transport de l'hydrogène sont l'application, la quantité à transporter, la densité de la demande et la distance entre le site de production et les points de livraison. Les méthodes de distribution possibles incluent : [7].

I.10.1. Pipeline :

Il est possible de fournir de l'hydrogène par un réseau de pipelines reliant plusieurs fournisseurs et consommateurs, soit sous forme liquide, soit sous forme gazeuse. Les systèmes de canalisation d'hydrogène liquide sont techniquement réalisables, mais leur mise en place nécessite des investissements en capital très élevés et des exigences matérielles minimales, ce qui les rend peu viables pour la distribution d'hydrogène liquide dans les stations-service à court terme. En revanche, les systèmes de pipelines gazeux comprimés requièrent un investissement en capital moindre que les réseaux de pipelines liquides.

Cependant, pour un petit nombre de stations-service, la construction d'un pipeline ne serait pas économiquement viable. La mise en place d'un pipeline nécessite une demande stable et des infrastructures à grande échelle pour atteindre des coûts de transmission faibles. Si le pipeline est destiné à une application à petite échelle, les coûts de construction du pipeline augmentent considérablement, entraînant une augmentation des prix des carburants. Par conséquent, il est important d'effectuer une analyse détaillée des coûts avant de décider d'installer un pipeline.

I.10.2. Rail :

Distribution de l'hydrogène peut également être effectuée par des voies ferrées. Réservoirs cryogéniques cylindriques tels que ceux utilisés pour le camionnage sont adoptées pour le transport ferroviaire. Ils ont de plus grandes capacités et peuvent transporter jusqu'à 9.100 kg

d'hydrogène, avec des taux évaporation estimée à 0,2% par jour .Toutefois, en raison de l'écart entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-service et les coûts élevés de transport liés avec le train, il est peu probable que cela deviendra une option pour la distribution de l'hydrogène.

I.10.3.Navire :

À l'aide de récipients liquides, le transport intercontinental d'hydrogène aura lieu. Pour ce faire, des navires conçus avec des réservoirs et des équipements portuaires adaptés sont nécessaires. En raison de sa taille et de sa couverture, il n'est pas financièrement raisonnable de transporter de l'hydrogène gazeux par bateau. Dans le cadre du programme de recherche Global Energie Network, il y a eu des évaluations approfondies des possibilités de vastes projets d'huile d'hydrogène. .

I.10.4.Camion :

De nos jours, le moyen le plus particulièrement pour transporter l'hydrogène est par camion. Le gaz peut être transporté sous forme comprimée en utilisant des bouteilles hautes pression, des remorques à tubes, ou sous forme liquide dans des réservoirs cryogéniques. Lorsqu'il est transporté sous forme de gaz, l'hydrogène doit être comprimé à une pression très élevée pour maximiser la capacité de stockage du réservoir. Les remorques à tubes, composées de plusieurs cylindres en acier montés sur un cadre de protection, peuvent contenir de 63 à 460 kg d'hydrogène en fonction du nombre de tubes. Les pressions de fonctionnement sont :

De 20 à 60 M Pa. Pour transporter de l'hydrogène liquide, des réservoirs isolés à double paroi spécialement conçus sont utilisés pour éviter l'ébullition du liquide. Dans certains cas, des écrans thermiques d'azote sont également utilisés pour refroidir la paroi extérieure de la cuve d'hydrogène liquide et minimiser les transferts de chaleur supplémentaires. Les camions-citernes peuvent transporter entre 360 et 4 300 kg d'hydrogène liquide, avec des taux d'évaporation de l'ordre de 0,3% à 0,6% par jour. Toutefois, le principal défi lié au transport d'hydrogène liquide réside dans les exigences d'isolation spécialisées, ainsi que dans les pertes de pompage et de ré-refroidissement du liquide d'hydrogène tout au long du trajet [7].

I.11 Conclusion :

L'hydrogène est le plus léger des gaz, le plus abondant des éléments de l'univers, le plus calorifique des combustibles. Mais le problème majeur est, de le produire puis de le distribuer et de le stocker. En particulier, de comparer des scénarios de production d'hydrogène, dans le but de déterminer lequel est le plus éco-efficace.

On vient de présenter les propriétés de l'hydrogène et les principaux procédés de sa production par les énergies fossiles et renouvelables, et particulièrement la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau et les différentes utilisations de ce gaz. On s'intéresse aux applications de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique du futur.

Chapitre II : Les modes de production de l'hydrogène

II.1. Introduction :

L'hydrogène est un vecteur énergétique prometteur en tant que source d'énergie propre, et différentes méthodes de production ont été développées pour répondre à la demande croissante. Les méthodes courantes incluent le reformage du gaz naturel, mais cela génère des émissions de dioxyde de carbone. Une approche plus respectueuse de l'environnement consiste à produire de l'hydrogène à partir de sources d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire et éolienne, par électrolyse de l'eau. La gazéification de la biomasse est une autre méthode utilisant des matières premières renouvelables. Des méthodes expérimentales impliquent l'utilisation de microorganismes ou de bactéries pour produire de l'hydrogène à partir de matières organiques. L'étude et le développement de ces méthodes visent à améliorer l'efficacité, la durabilité et la rentabilité de la production d'hydrogène, dans le but d'atteindre une production verte et de soutenir la transition vers une économie bas-carbone, réduisant ainsi notre dépendance aux combustibles fossiles.

Dans ce chapitre, nous aborderons les méthodes de production d'hydrogène, et nous nous intéresserons à la production par l'énergie solaire, par électrolyse de l'eau, ainsi que les types d'électrolyseurs et leur efficacité.

II.2. Méthodes de production de l'hydrogène :

Bien que présent à l'état naturel, l'hydrogène n'est pas encore exploité à grande échelle dans l'industrie. Il est largement disponible dans l'eau sous forme d'H₂O, lié à l'oxygène, ainsi que dans les hydrocarbures tels que le gaz naturel (CH₄) lié au carbone. Heureusement, il existe maintenant plusieurs options technologiques pour produire de l'hydrogène à partir de différentes sources Figure II.1 [10].

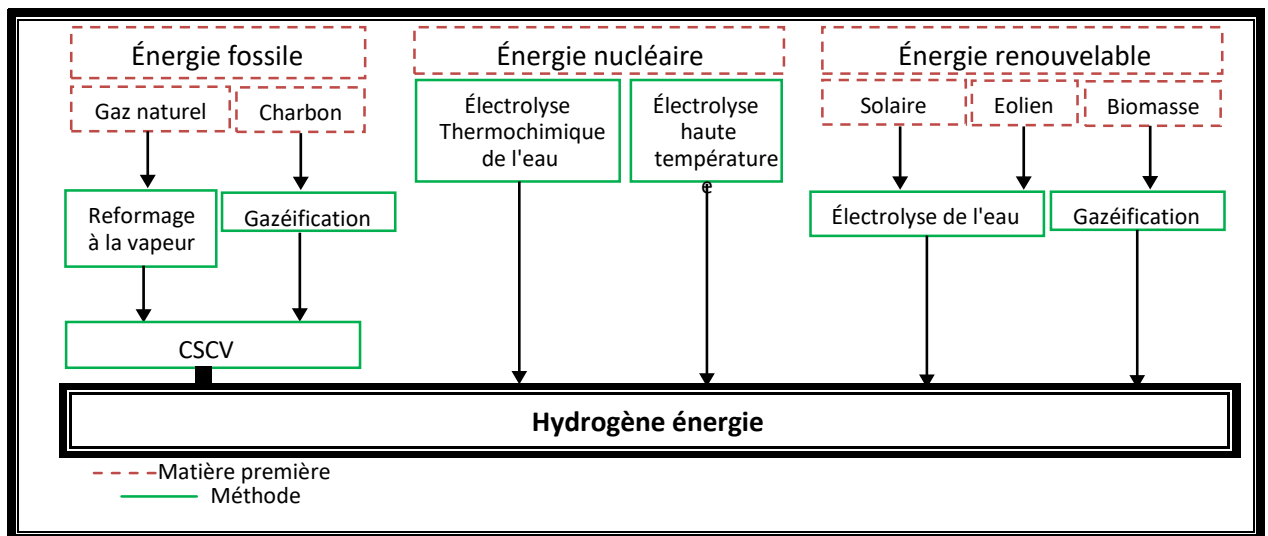


Figure.II.1 : Principales méthodes de la production d'hydrogène [10]

II.3. Production à partir des énergies fossiles :

Il existe plusieurs méthodes pour produire de l'hydrogène, certaines étant à un stade de production commerciale mature, tandis que d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. Les procédés de production d'hydrogène tels que la décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont considérés comme industrialisés ou en cours d'industrialisation. En revanche, les cycles thermochimiques purs et hybrides sont actuellement à un stade de recherche et développement, tandis que les procédés photochimiques et photo biologiques sont encore au premier stade de la recherche [12].

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- L'extraction de l'hydrogène se fait généralement à partir de l'eau, des hydrocarbures tels que le méthane ou le méthanol, ou d'une combinaison des deux, qui constituent la matière première pour la production d'hydrogène.
- Pour produire de l'hydrogène, une source d'énergie est nécessaire, qui peut être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermique, etc.).
- Il existe plusieurs procédés de production d'hydrogène qui font appel à différentes sources d'énergie, telles que l'énergie quantique pour la photolyse, l'énergie électrique pour l'électrolyse, ou l'énergie thermique pour le procédé thermochimique. Pour la plupart de ces procédés, il existe plusieurs variantes, ce qui représente un nombre relativement important de techniques différentes.

Actuellement, près de 96 % de la production d'hydrogène provient de sources d'énergie fossile, et le gaz naturel est la matière première la plus utilisée (figure .II.2). Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau est le procédé le plus économique pour la production

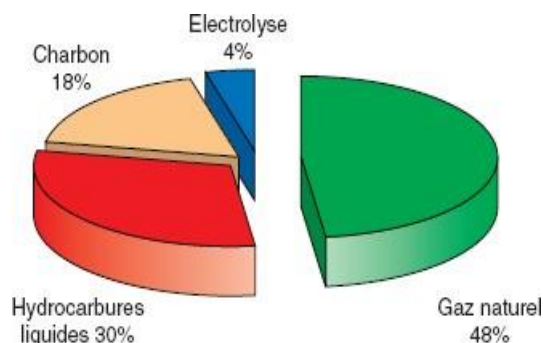


Figure II.2 : Principales origines de l'hydrogène [3].

La figure.II.2 le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource, la quantité d'hydrogène exigée et la pureté souhaitée de l'hydrogène. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène de manière économiquement et écologiquement satisfaisante [3]. La figure II.3 illustre les voies les plus connues pour la production de l'hydrogène.

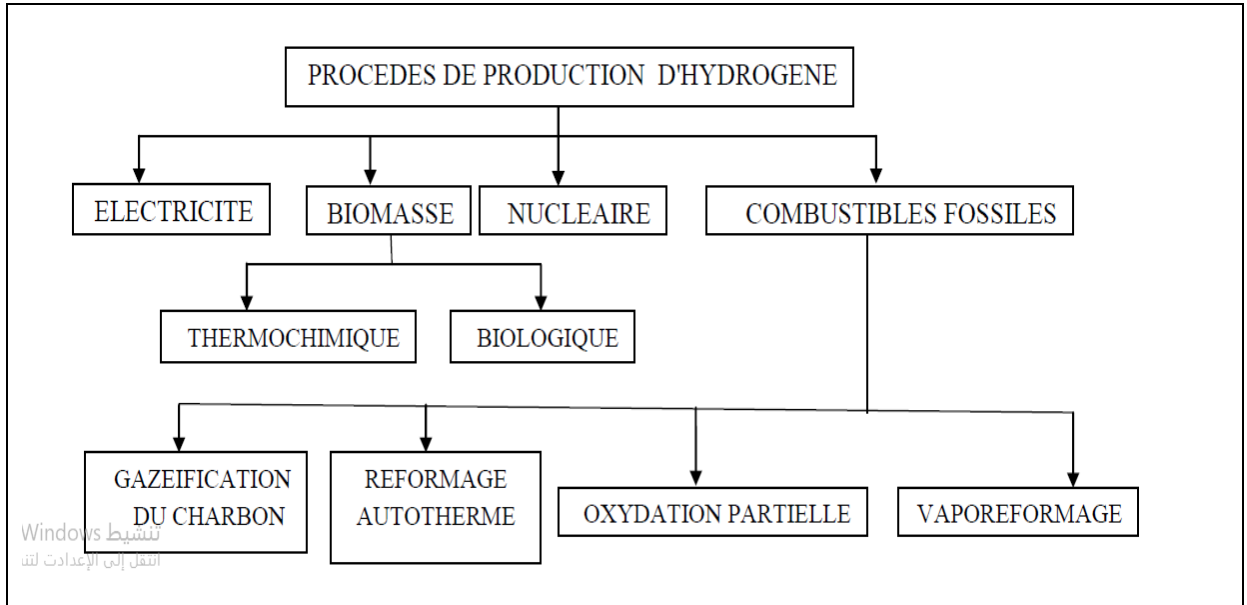


Figure II.3 : les voies les plus connues pour la production de l'hydrogène [3].

II.3.1. Production à partir du gaz naturel :

L'hydrogène peut actuellement être produit à partir du gaz naturel au moyen de trois processus chimiques différents :

• Reformage de vapeur (méthane SMR de reformage–de vapeur)

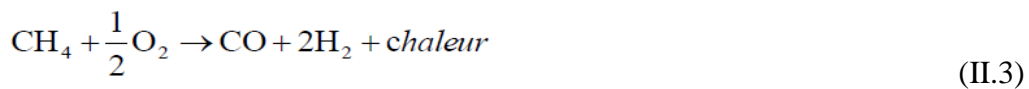
La reformation de vapeur est un processus endothermique qui implique la conversion du méthane et de la vapeur d'eau en hydrogène et en oxyde de carbone (II.1). La chaleur nécessaire est souvent fournie par la combustion d'une partie du méthane du gaz d'alimentation. Le processus se déroule généralement à des températures comprises entre 700 et 850 °C et à des pressions de 3 à 25 bars [13]. Le gaz produit contient environ 12 % de CO, qui peut être converti en CO2 et en H2 par la réaction de décalage d'eau gaz



•Oxydation partielle (POX)

L'oxydation partielle du gaz naturel, est le processus par lequel l'hydrogène est produit par combustion partiel du méthane avec le gaz de l'oxygène pour rapporter l'oxyde de carbone et l'hydrogène (II.3)

En ce processus, la chaleur est produite dans une réaction exothermique, et par conséquent une conception plus compacte est possible, car il n'y a aucun besoin de n'importe quel chauffage externe du réacteur. Le CO produit est encore converti à H₂ comme décrit dans l'équation (II.2).

**• Reformage autotherme (ATR)**

Le reformage aérotherme est une combinaison de la reformation de la vapeur (II.1) et de l'oxydation partielle (II.3).

La réaction d'oxydation partielle est entièrement exothermique, libérant ainsi de la chaleur. La température de sortie du réacteur se situe entre 950 et 1100 °C, et la pression du gaz peut atteindre jusqu'à 100 bars. De plus, le CO produit est converti en H₂ par la réaction de décalage eau-gaz (II.3). Cependant, la nécessité d'épurer les gaz pour améliorer leur rendement ajoute considérablement aux coûts de l'usine et réduit l'efficacité globale [14].

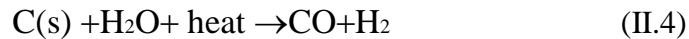
Chacun des processus ci-dessus a certains avantages et inconvénients qui sont présentés dans le Tableau (II.1) [15].

Tableau II.1 : Comparaison des technologies pour la production H₂ à partir du gaz naturel [15].

La technologie	SMR	Atrou POX
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> •Rendement élevé •émissions •Coûts pour de grandes unités 	<ul style="list-style-type: none"> •Une plus petite taille •Coûts pour de petite suintés •Simple système
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> •Complexe du système •Sensible aux qualités de gaz naturel 	<ul style="list-style-type: none"> •Inférieure efficacité •Emissions de lapurificationH₂ /évasant

II.3.2. Production à partir du charbon :

L'hydrogène peut être obtenu à partir de charbon par divers procédés de gazéification, tels que le lit fixe, le lit fluidisé ou l'écoulement entraîné. En pratique, les procédés d'écoulement entraîné à haute température sont préférés pour maximiser la conversion du carbone en gaz et éviter la formation de quantités significatives de charbon, de goudrons et de phénols. Une réaction typique pour le processus est décrite dans l'équation (II.4), où le carbone est converti en oxyde de carbone et en hydrogène [16].



Comme pour la reformation du méthane, cette réaction est endothermique, ce qui nécessite l'ajout de chaleur. Le dioxyde de carbone produit est ensuite converti en dioxyde de carbone et en hydrogène grâce à la réaction de décalage d'eau-gaz, décrite dans l'équation (II.2).

La production d'hydrogène à partir de charbon est techniquement mature, mais plus complexe que la production à partir de gaz naturel, ce qui entraîne un coût plus élevé. Cependant, étant donné l'abondance du charbon dans de nombreuses régions du monde et sa probabilité d'être utilisé comme source d'énergie sans souci, il est important d'explorer le développement de technologies propres pour son utilisation.

II.4 Production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire :

La production d'hydrogène à l'aide de l'énergie solaire est un moyen durable et propre de produire du carburant, car elle repose sur une source d'énergie renouvelable (le soleil) et ne produit aucune émission nocive pour l'environnement. Avec le développement de la technologie, des travaux sont en cours pour améliorer l'efficacité du processus de production d'hydrogène à l'aide de l'énergie solaire et réduire ses coûts afin d'améliorer son utilisation à l'avenir.

L'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène :

1. Panneaux Solaris photovoltaïques : Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent directement l'énergie solaire en électricité. Cet électrolyte peut être utilisé pour alimenter un électrolyseur qui sépare l'eau en hydrogène et en oxygène par électrolyse. Les cellules

photovoltaïques sont généralement composées de silicium, et lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil, elles génèrent un courant électrique qui peut être utilisé pour l'électrolyse de l'eau.

2. Concentrés solaires : Les concentrés solaires ne contiennent pas de dispositifs qui utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière solaire sur une petite surface. Ces concentrés solaires peuvent être utilisés pendant quatre heures de thermiques à cellules solaires. Les cellules solaires thermiques convertissent la chaleur solaire en électricité, qui peut ensuite être utilisée pour l'électrolyse de l'eau.

3. Systèmes solaires à jus : Les systèmes solaires à jus ne conviennent pas pour orienter des panneaux ou des concentrés solaires afin de maximiser la quantité d'énergie solaire que vous recevez tout au long de la journée. En suivant le mouvement du soleil, ces systèmes permettent de produire plus d'énergie solaire, ce qui peut être avantageux pour l'électrolyse de l'eau.

4. Stockage des énergies : L'énergie solaire est intermittente, car c'est le signe qu'elle n'est pas disponible tant que le soleil brille. Pour surmonter cette limitation, il est possible de stocker l'énergie solaire sous forme d'hydrogène. L'hydrogène produit par électrolyse peut être stocké et utilisé comme source d'énergie lorsque le soleil ne brille pas. L'hydrogène peut être stocké sous forme gazeuse dans des réservoirs haute pression ou sous forme liquide à des températures très basses [16].

L'hydrogène est principalement produit à partir de l'énergie solaire en utilisant des procédés thermochimiques, photo électrochimiques et électrolytiques.

Les procédés thermochimiques permettent de convertir le rayonnement solaire en chaleur à des températures allant de 200°C à 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur est ensuite convertie en vecteur énergétique d'hydrogène. Les concentrateurs solaires sont une alternative intéressante pour les pays disposant de ressources solaires abondantes.

Les procédés photo électrochimiques utilisent des cellules photolyse qui, lorsqu'elles sont exposées à la lumière, décomposent l'eau en oxygène et en hydrogène. Ces cellules sont constituées d'une électrode photosensible immergée dans un électrolyte ou dans de l'eau. Ce procédé de photolyse présente l'avantage de ne pas nécessiter le transport du courant électrique

entre la centrale solaire photovoltaïque et les installations de production d'hydrogène par hydrolyse Figure II.4 e, ce qui permet d'obtenir un rendement supérieur.

Les procédés électrolytiques consistent à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'un courant électrique continu traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes [16].

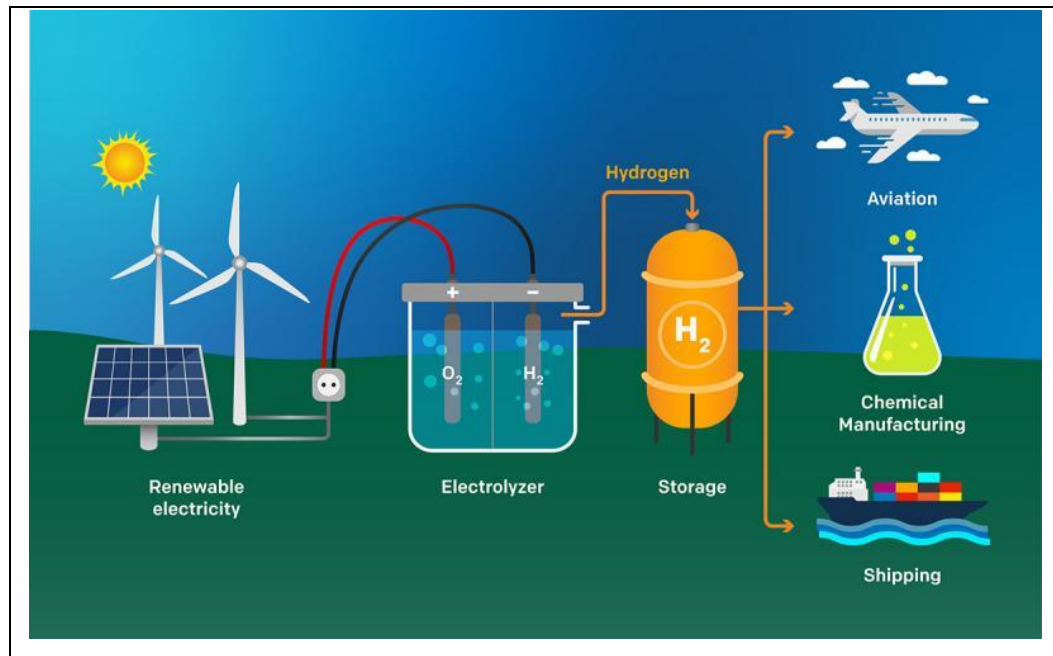


Figure II. 4: Production d'hydrogène par l'énergie solaire [16].

II.4.1 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau :

II.4.1.1 Introduction :

Jusqu'aux années 50, l'électrolyse de l'eau était couramment utilisée pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène. Toutefois, actuellement, la production d'hydrogène par électrolyse ne représente qu'une petite partie de la production mondiale. Elle est utilisée principalement pour fournir de petites quantités d'hydrogène à haute pureté pour des applications spécifiques.

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 [17].

Chapitre II : Les modes de production de l'hydrogène

II.4.1.2 Principe général de l'électrolyse de l'eau :

La décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène est réalisée par une réaction électrochimique appelée l'électrolyse de l'eau. Cette réaction est permise par le passage d'un courant électrique continu à travers deux électrodes plongées dans un électrolyte, qu'il soit liquide ou solide.

II.4.1.3 Qualité de l'eau d'alimentation :

Il est crucial que l'eau utilisée dans l'électrolyseur soit la plus pure possible, car les impuretés présentes peuvent s'accumuler et perturber les réactions électrolytiques. Ces impuretés peuvent notamment :

Formation de boues ;

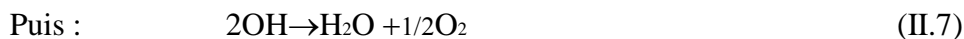
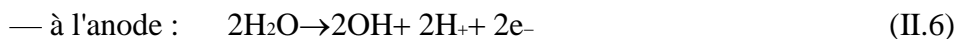
Action des chlorures (les halogénures en général) qui détruisent la protection par nickelage ou le nickel massif des anodes.

Après une première étape de purification, l'eau subit un traitement supplémentaire pour assurer une qualité optimale. Elle traverse un filtre à charbon actif puis passe à travers un filtre à couche mixte à échangeur d'ions pour une déminéralisation totale. L'objectif est d'obtenir une résistivité électrique supérieure à 2 MΩ cm (soit $2 \times 10^4 \Omega.m$). Cette étape est cruciale car elle permet d'éviter que les impuretés n'altèrent les réactions électrolytiques dans l'électrolyseur [18].

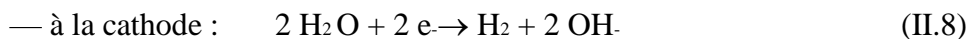
II.4.1.4 Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau :

II.4.1.4.1 Thermodynamique :

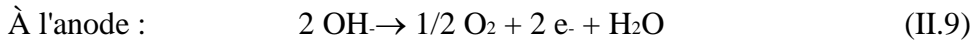
En solution acide, on admet généralement que la décomposition de l'eau s'effectue suivant les réactions :



En solution alcaline, par contre, les ions OH^- prédominent et le phénomène est habituellement exprimé par :



Chapitre II : Les modes de production de l'hydrogène



Dans les deux cas, la réaction globale s'écrit :



Des expériences menées sur l'électrolyse ont montré que toutes les irréversibilités dans une cellule d'électrolyse diminuent lorsque la température de fonctionnement augmente. La résistance ionique, qui est prédominante, diminue également, ce qui permet de réduire la tension pratique de l'électrolyseur et, par conséquent, sa consommation d'énergie.

En outre, les réactions à forte irréversibilité telles que l'oxydation de l'eau en oxygène, qui nécessitent une catalyse, sont également favorisées par une augmentation de la température.

La capacité d'augmenter la température est limitée par la résistance des matériaux de l'électrolyseur. Au-delà d'une certaine température, il est nécessaire de réaliser l'électrolyse sous pression pour éviter les pertes d'eau par évaporation.

Même si, pour des raisons thermodynamiques, une augmentation de la pression tend à augmenter la tension de l'électrolyseur et donc à diminuer son rendement énergétique, en pratique, l'impact de la pression sur la tension de cellule dépend de la technologie de l'électrolyseur, à densité de courant et température constantes [16].

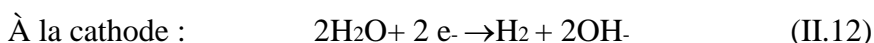
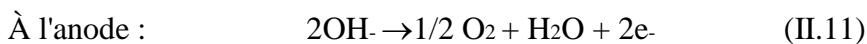
II.4.1.5 Les différentes technologies d'électrolyseurs :

II.4.1.5.1 Electrolyseurs alcalins :

Principe : [3]

L'électrolyse alcaline est largement utilisée pour la production d'hydrogène électrolytique ainsi que pour la fabrication de nombreux produits chimiques tels que le chlore, ce qui lui confère une grande maturité industrielle.

Dans cette technologie d'électrolyseur, l'électrolyte est constitué d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) qui assure la conduction ionique grâce aux ions hydroxyde (OH⁻) et potassium (K⁺). Les réactions anodiques et cathodiques sont les suivantes :



La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline.

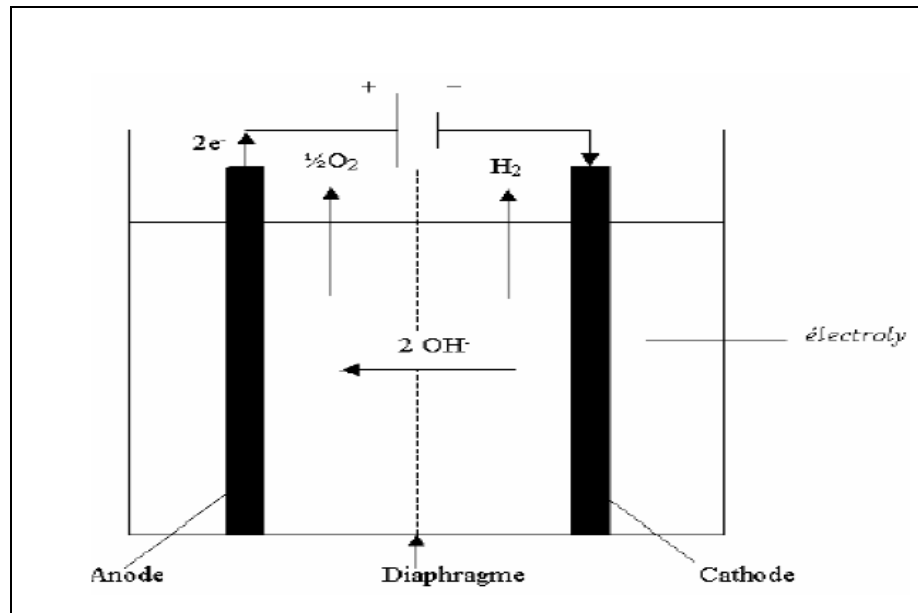


Figure II.5 : Principe de l'électrolyse alcaline [3].

Matières premières :

En général, l'électrolyse est effectuée en utilisant une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température de fonctionnement.

*** de 25 % en masse pour une température de 80 à 90°C;**

*** de 30 à 35 % à 120 °C ;**

*** de 40 % à 160 °C.**

Les concentrations optimales de la solution aqueuse d'hydroxyde de potassium correspondent à la conductivité électrique maximale de la solution pour la température de fonctionnement. Il est préférable d'utiliser des solutions de potasse plutôt que des solutions de soude pour plusieurs raisons :

- À une température donnée, la conductivité électrique de la potasse est supérieure à celle de la soude.
- Les solutions de potasse contiennent généralement moins d'impuretés de chlorure, car la fabrication de l'hydroxyde est différente.

- La pression de vapeur saturante de la potasse est inférieure à celle de la soude pour une même température, ce qui permet de réduire la quantité d'eau de refroidissement nécessaire pour condenser la vapeur entraînée par l'hydrogène [16].

II.4.1.6 Électrolyse à haute température :

Cette technologie découle directement des avancées réalisées dans le domaine des piles à combustible, qui opèrent à des températures allant de 400 à 600 °C et de 650 à 1000 °C respectivement. Si nous alimentons cette technologie à la fois en électricité et en chaleur pour maintenir la température élevée souhaitée, son rendement peut dépasser 80%, en excluant la chaleur de vaporisation de l'eau. Elle est principalement conçue pour être utilisée en combinaison avec des systèmes solaires à concentration ou des réacteurs nucléaires à haute température [19].

II.4.1.7 Électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM) :

Le terme PEM est dérivé de l'électrolyte utilisé, qui est un film polymère conducteur de protons. La membrane est revêtue des deux côtés d'une fine couche de matériau catalyseur. Ces deux couches constituent respectivement l'électrode négative et positive de l'électrolyseur. Un électrolyseur PEM opère la séparation de l'eau pure en hydrogène et oxygène Figure II.6. En appliquant une tension continue, les molécules d'eau sont oxydées sur l'anode, produisant de l'oxygène et des protons, tandis que les électrons sont libérés. Les protons (ions H^+) se déplacent à travers une membrane conductrice de protons vers la cathode, où ils réagissent avec les électrons provenant d'un circuit conducteur externe, formant ainsi du gaz hydrogène. De l'oxygène s'accumule du côté de l'anode [19].

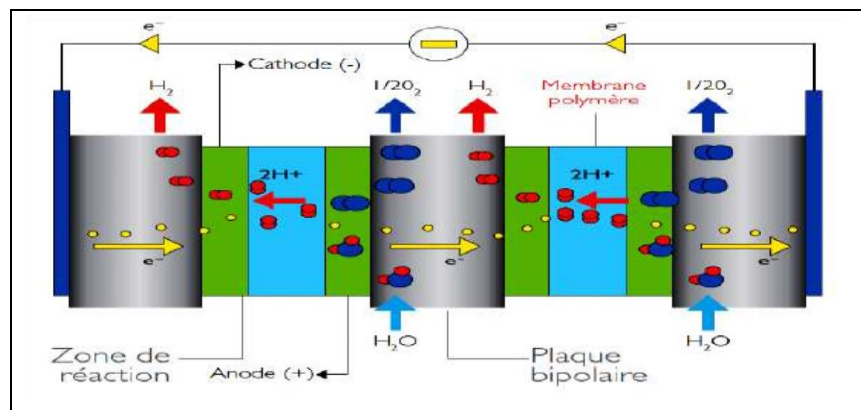


Figure II.6 : Schéma d'une cellule d'électrolyse PEM [19].

La technologie de l'électrolyse à membrane polymère est considérée comme prometteuse pour l'avenir en raison de son développement parallèle aux piles à combustible de technologie comparable (PEM) et de la réduction des coûts qui en découle. Les avantages de cette technologie incluent l'absence d'électrolyte liquide, sa compacité, sa facilité de fabrication, son design et son fonctionnement simplifiés, ainsi que sa résistance accrue à la corrosion. Ce type d'électrolyseur est particulièrement adapté à l'intégration avec des sources d'énergie renouvelable, car il est plus apte que l'électrolyse alcaline à gérer les variations de puissance électrique disponible. Les principales caractéristiques de ces trois types d'électrolyte sont résumées dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 : Principales caractéristiques des électrolytes [19].

Type	PEM	Alcalin	SOEC
Température de fonctionnement (°C)	80-100	50-100	800-1000
Pression de fonctionnement (bar)	1-70	3-30	-
Consommation électrique (kWh/Nm ³ d'H ₂)	6	4-5	3-3.5
Rendement énergétique (%)	80-90	75-90	80-90
Etat du marché	Mature	Commercialisé	Recherche

II.5. Production par la Biomasse :

L'utilisation de biomasse pour produire de l'hydrogène présente un attrait certain, car sa conversion en hydrogène produit une quantité de CO₂ équivalente à celle requise pour sa régénération, ce qui conduit à un bilan écologique pratiquement nul.

Elle peut produire de l'hydrogène de plusieurs façons :

Par gazéification pour donner du gaz de synthèse (CO + H₂) qui lui-même –après purification– donne de l'hydrogène. Aujourd'hui, dans le monde, plus de 50 usines de gazéification de la biomasse fonctionnent même si elles ne sont pas dédiées à la fabrication d'hydrogène.

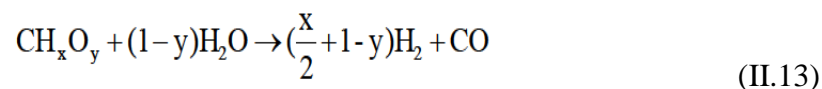
- Par bio photolyse de l'eau en utilisant certaines micro-algues ou certaines cyanobactéries.

Les scientifiques et les experts technologiques préconisent un effort particulier dans la production d'hydrogène par photo-décomposition de composés organiques par des bactéries. Une fois produit, l'hydrogène peut être utilisé, stocké sur place ou transporté via un réseau de pipelines. L'hydrogène a un grand potentiel d'utilisation dans le secteur des transports, qui est actuellement la principale source de production de CO₂. Par conséquent, il est crucial de développer des technologies de production, de stockage et de transport d'hydrogène efficaces et durables pour aider à réduire les émissions de CO₂ dans ce secteur [20].

II.5.1. Gazéification de la biomasse : [21]

Actuellement, les procédés de gazéification de la biomasse ont une capacité de production mondiale de plus de 430 millions de Nm³ d'hydrogène par jour, ce qui équivaut à une production d'énergie d'environ 20 GW (International Gâtification Organisation, 2003). Cependant, il convient de noter que près de 42 % des unités de gazéification dans le monde utilisent encore du charbon comme matière première.

Le processus de gazéification implique généralement le mélange d'une charge de matière organique (sous forme solide ou liquide) avec un agent oxydant tel que de l'air ou de l'oxygène pur, ainsi que de la vapeur d'eau, à des températures comprises entre 1000 et 1500 °C. Ce processus conduit à la formation de composés hydrocarbonés, qui réagissent avec la vapeur d'eau selon la réaction chimique suivante :



Il existe une multitude de procédés de gazéification qui se distinguent par l'état initial de la charge alimentée dans le réacteur et par leur configuration globale. Les unités de gazéification peuvent être intégrées à une turbine à cycle combiné (IGCC, Integrated Gâtification Combined Cycle) pour atteindre des rendements électriques nets de l'ordre de 40 à 50 % (et un rendement global de l'ordre de 85 à 90 %).

II.5.2. Production Photo-biologique (bio photolyse) : [15]

La production d'hydrogène par voie photo-biologique repose sur deux étapes principales : la photosynthèse (II.14) et la production d'hydrogène catalysée par des hydrogénases (II.15), qui impliquent des organismes tels que les algues et les cyanobactéries vertes. Bien que des recherches fondamentales et appliquées soient nécessaires dans ce domaine à long terme, si elles sont couronnées de succès, cela pourrait constituer une solution à long terme pour la production renouvelable d'hydrogène. Comprendre les processus normaux et les régulations génétiques de la production d'hydrogène est d'une importance cruciale. La génétique métabolique peut être utilisée pour étudier ce processus dans des bioréacteurs plus grands, tandis qu'une autre option est de reproduire les deux étapes en utilisant la photosynthèse artificielle Figure II.7.

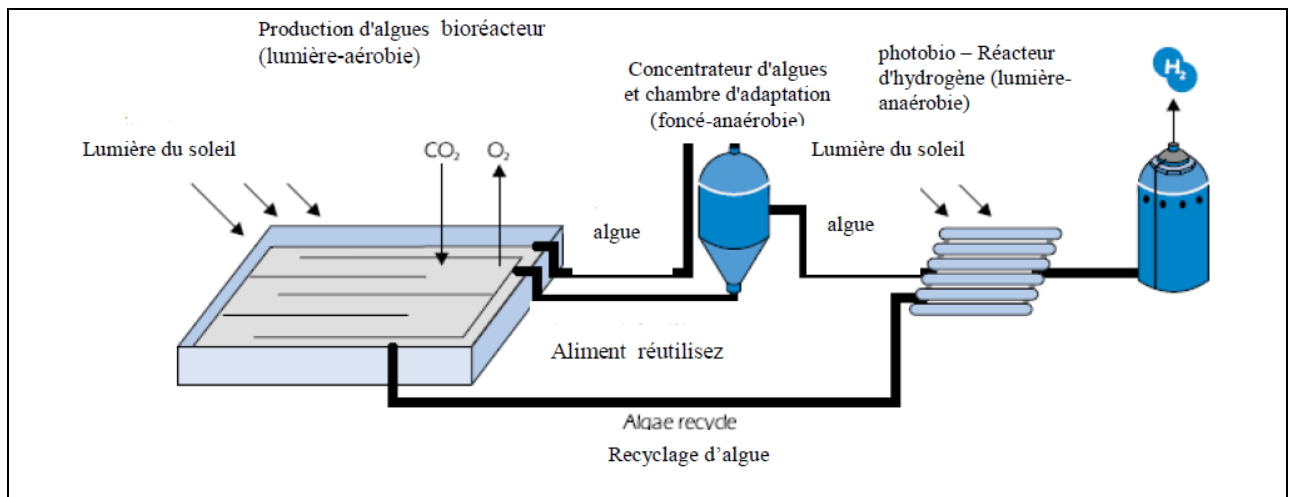
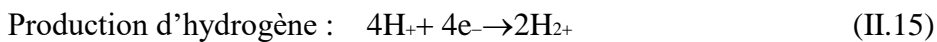
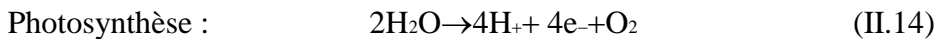


Figure II.7 : Principe de production photo-biologique d'hydrogène [15].

II.6. Production par l'énergie nucléaire :

L'intérêt de la production d'hydrogène par électrolyse est grevé d'un mauvais rendement global (de l'ordre de 25 %) mais pourrait être une solution incontournable pour certaines

applications. On pense alors à d'autres solutions jugées par certains, plus intéressantes à terme, comme :

L'électrolyse de l'eau peut être effectuée avec des procédés innovants, tels que la technologie acide PEM ou la technologie sous vapeur à haute température. Ces méthodes devraient offrir des rendements d'électrolyse atteignant environ 90 %, contrairement à la méthode traditionnelle alcaline.

La technique du craquage de l'eau par le procédé thermochimique IS (Iode-Soufre) nécessite une chaleur importante (environ 850°C), fournie par des réacteurs nucléaires spécifiques à haute température, tels que le réacteur HTGR (High Temperature Gas Reactor). Ce type de réacteur présente l'avantage de consommer des combustibles fossiles plus abondants que l'U235, utilisé actuellement dans les réacteurs PWR, dont les réserves sont limitées. Un projet de collaboration entre les États-Unis et le Japon prévoit une démonstration à grande échelle de 30 MW en 2010, avec un rendement global pouvant dépasser 50%, soit au moins deux fois supérieur à celui du cycle nucléaire actuel (PWR) couplé à un électrolyseur alcalin. [3]

. II.7. Rendement Production d'hydrogène :

Les rendements des électrolyseurs actuels varient de 62% à 89% selon les technologies et les conditions, notamment la tension électrique et le compromis effectué par le producteur avec le taux de production d'hydrogène. Pour produire un normo-mètre cube dans les électrolyseurs industriels, il faut consommer entre 4 et 5 kWh et 1 litre d'eau. La production d'un kilogramme d'hydrogène, permettant de parcourir 100 kilomètres pour tout véhicule léger à pile à combustible, nécessite entre 44 et 55 kWh d'électricité et 11 litres d'eau. Bien que l'électrolyse soit le procédé de production d'hydrogène décarboné le plus mature technologiquement, elle ne représente actuellement que 1% de la production volontaire d'hydrogène en raison d'un manque d'investissements et de coûts dissuasifs. [22]

II.8. Conclusion :

La production d'hydrogène est un aspect important de l'énergie et du développement durable. L'hydrogène est considéré comme le combustible le moins propre et le plus durable car il peut être utilisé dans de nombreuses applications, notamment l'électricité, la production d'électricité

Chapitre II : Les modes de production de l'hydrogène

et les industries chimiques. Il existe plusieurs façons de produire de l'hydrogène, en utilisant des combustibles fossiles tels que le gaz naturel e

t le charbon, et en utilisant l'énergie solaire, la ventilation et l'eau dans le processus d'électrolyte. L'hydrogène est une substance pratique, stockable et transportable qui peut être utilisée comme ressource renouvelable et pour promouvoir la durabilité dans tous les secteurs.

Il est important que l'hydrogène vert soit le meilleur type d'hydrogène, car il est produit à partir de sources d'énergie renouvelables, c'est donc un carburant propre, sans émissions, et considéré comme le carburant du futur.

Chapitre III : L'hydrogène vert en Algérie

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons simuler une étude du taux de développement et du coût de la production d'hydrogène vert dans certains états du sud algérien par électrolyse utilisant l'énergie solaire à l'aide du programme MATLAB, ainsi que les domaines de son exploitation. Pour obtenir des résultats et en discuter.

III.2. Exploitation de l'hydrogène vert en Algérie : [23]

L'hydrogène vert est une forme d'hydrogène produite à partir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. Il est considéré comme une alternative propre et durable aux combustibles fossiles. En Algérie, l'hydrogène vert présente plusieurs applications potentielles, exemples :

III.2.1 Transport : L'hydrogène vert peut être utilisé comme carburant pour les véhicules à pile à combustible (VPC). Ces véhicules utilisent l'hydrogène pour produire de l'électricité, ce qui alimente ensuite le moteur électrique. En Algérie, l'utilisation de l'hydrogène vert dans les transports pourrait contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à diversifier le mix énergétique du secteur des transports.

III.2.2 Stockage d'énergie : L'hydrogène vert peut être utilisé pour stocker l'énergie produite à partir des sources renouvelables intermittentes telles que l'énergie solaire et éolienne. En convertissant l'électricité excédentaire en hydrogène vert par électrolyse de l'eau, il est possible de stocker cette énergie sous forme d'hydrogène et de la convertir à nouveau en électricité lorsque cela est nécessaire.

III.2.3 Secteur industriel : L'hydrogène vert peut être utilisé dans divers processus industriels, tels que la production d'ammoniac, le raffinage du pétrole et la production de méthanol. L'Algérie dispose d'une industrie chimique développée, et l'utilisation de l'hydrogène vert dans ces processus pourrait réduire les émissions de carbone et améliorer la durabilité de ces secteurs.

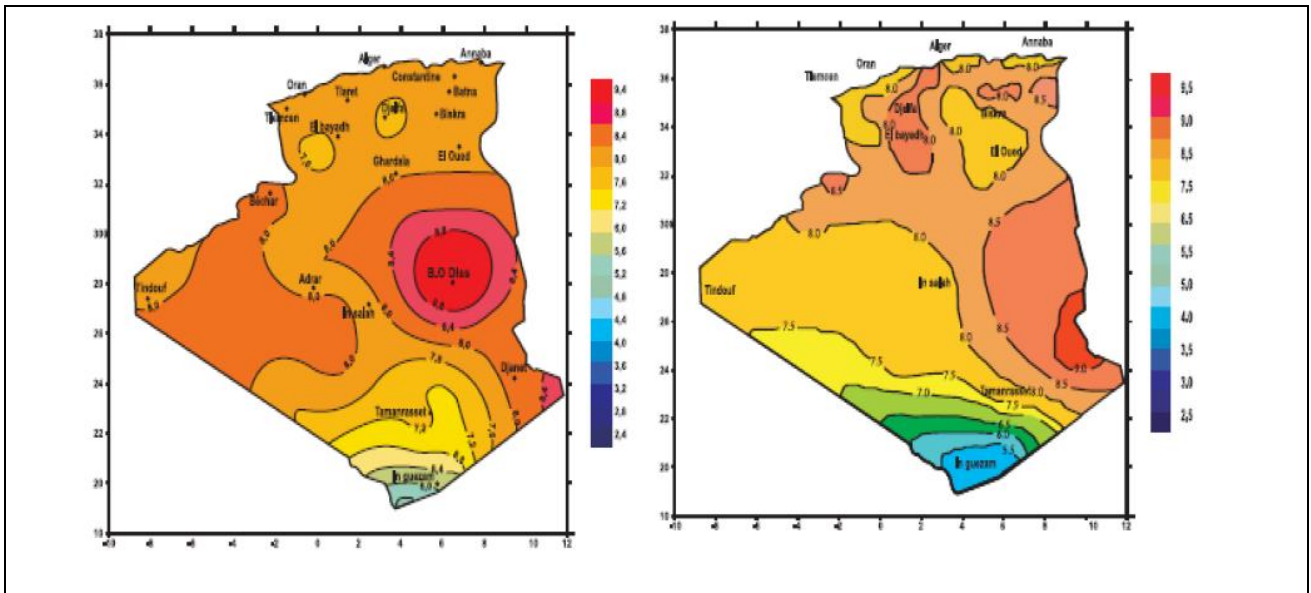
III.2.4 Alimentation électrique hors réseau : Dans les régions éloignées où l'accès à l'électricité est limité, l'hydrogène vert peut être utilisé pour générer de l'électricité. Les systèmes de stockage d'hydrogène permettent de produire de l'électricité lorsque les sources d'énergie renouvelables ne sont pas disponibles ou en combinaison avec elles.

Il convient de noter que l'utilisation de l'hydrogène vert en Algérie nécessite une infrastructure adéquate, notamment des installations de production d'hydrogène par électrolyse et des stations de ravitaillement en hydrogène pour les véhicules à pile à combustible. De plus, le coût de production de l'hydrogène vert reste relativement élevé par rapport à d'autres sources d'énergie. Cependant, avec les avancées technologiques et l'engagement croissant en faveur de la transition énergétique, l'hydrogène vert pourrait jouer un rôle important dans le paysage énergétique algérien à l'avenir.

III.3 Système solaire photovoltaïque : [3]

III.3.1. Introduction :

L'Algérie bénéficie d'un important potentiel en matière d'énergie solaire en raison de sa situation géographique. Le pays dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde, avec une durée d'insolation annuelle dépassant les 2000 heures dans la quasi-totalité du territoire et atteignant les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Chaque jour, une surface horizontale de 1 m² reçoit environ 5 kWh d'énergie solaire, ce qui équivaut à près de 1700 kWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.



a-horizontal

b-normal

Figure III.1 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale et normal au mois de juillet

III.3.2. Rayonnement solaire : [3]

Le soleil, une étoile parmi tant d'autres, a un diamètre d'environ 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la Terre. Sa composition est principalement constituée de 80 % d'hydrogène, 19 % d'hélium et 1 % d'un mélange de 100 autres éléments chimiques connus. Il a été établi il y a environ soixante ans que l'énergie du soleil est fournie par la fusion nucléaire, selon la théorie de la relativité d'Einstein, avancée par Langevin et Perrin. Aujourd'hui, il est largement accepté que le soleil fonctionne comme une bombe thermonucléaire à hydrogène-hélium, transformant chaque seconde environ 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium dans son noyau, à une température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, le soleil perd environ 4 millions de tonnes de masse par seconde, qui sont converties en rayonnement dispersé.

La lumière du soleil, se déplaçant à une vitesse de 300 000 km/s, met environ 8 minutes pour atteindre la Terre. Sa distribution spectrale dans l'atmosphère atteint un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0,5 μm , et la température de surface du soleil correspond à environ 5 780 K selon le modèle du corps noir.

III.3.3. Durée Insolation :

La durée d'insolation représente le nombre d'heures pendant lesquelles le soleil est clairement visible entre le lever et le coucher. Elle est mesurée à l'aide de l'héliographe de Campbell-Stokes, qui utilise une sphère de cristal pour concentrer les rayons solaires sur un papier, provoquant ainsi sa combustion et marquant ainsi la durée d'insolation réelle ou effective. Cela dépend de la visibilité du soleil depuis le point d'observation, qu'il soit visible ou caché par les nuages.

En l'absence de l'héliographe, il est possible d'estimer la durée théorique du jour en calculant le mouvement astronomique relatif du soleil et de la Terre. Cette durée théorique correspondrait à la durée du jour s'il n'y avait pas de nuages pour cacher le soleil. Elle est calculée en fonction de la latitude du lieu et de la déclinaison apparente, qui dépend à son tour de la période de l'année considérée [3].

III.3.3.1. Générateur Photovoltaïques : [16]

• Photopile

La cellule solaire, également connue sous le nom de photopile ou photovoltaïque, est constituée de matériaux semi-conducteurs similaires à ceux utilisés dans les transistors ou les puces d'ordinateur. On peut la considérer comme une diode plane qui réagit à la lumière.

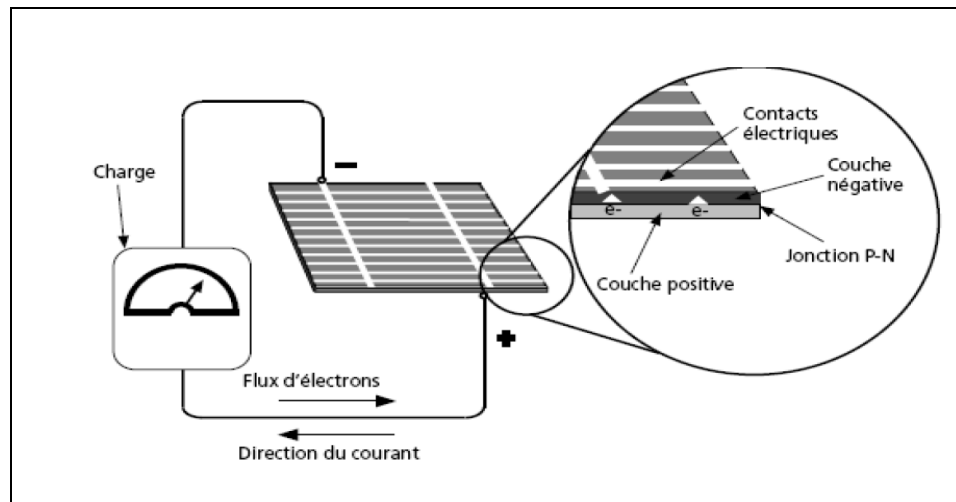


Figure III.2 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [16].

Lorsqu'un photon de lumière avec une énergie suffisante rencontre un atome sur la partie négative de la cellule solaire, il excite un électron et le libère de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie (voir figure 2). La conception de la cellule solaire est telle que cet électron libre ne peut pas se recombiner facilement avec un atome chargé positivement avant d'avoir accompli un travail utile en passant à travers un circuit externe. Similaire à une pile chimique ou une batterie, la cellule photovoltaïque produit de l'électricité en courant continu (CC). Cependant, la quantité d'énergie produite dépend principalement de la quantité de lumière reçue par la cellule solaire.

Tableau III.1 : Panneau photovoltaïque Polycristallin 330Wc VICTRON [16].

Paramètres électriques	Module solaire
Poids net	22.5 kg
Dimensions	1956×992 mm
Puissance nominale	330 Wc
Tension de puissance	37.3 V
Courant de puissance	8.86 A
Tension de court-circuit	44.72 V
Courant de court-circuit	9.57 A

III.3.4. Electrolyseur : [19]

Dans cette étude, un électrolyseur de type PEM a été utilisé. Par conséquence, l'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit :

$$E_{El} = \eta_{El} \eta_p E_{source} \tag{III.1}$$

E_{El} Energie absorbée par l'électrolyseur (kWh)

η_{El} Rendement d'électrolyseur (%)

η_p
Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur (%)

E_{source} Energie électrique délivrée par la source renouvelable (kWh)

L'évaluation du potentiel est basée sur l'utilisation de l'énergie électrique produite par une source renouvelable qui entraîne le fonctionnement d'un électrolyseur. Dans cette analyse, une capacité de puissance de 52.5 kWh/kg pour l'électrolyseur a été considérée (ce qui correspond à environ 75% de rendement). Le rendement supplémentaire qui est inclut pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur est égal à 90%. Le calcul de la masse d'hydrogène produite à partir de chaque source renouvelable est décrit comme suit :

$$M_{H_2} = \frac{E_{el}}{PCS_{H_2}} = \frac{\eta_{elec} \eta_p E_{source}}{PCS_{H_2}} \quad (III.2)$$

M_{H_2} Masse d'hydrogène (kg/an)

PCS_{H_2} Pouvoir calorifique supérieur d'hydrogène (kWh/kg)

Table III.2 : Caractéristiques Electrolyseur PEM

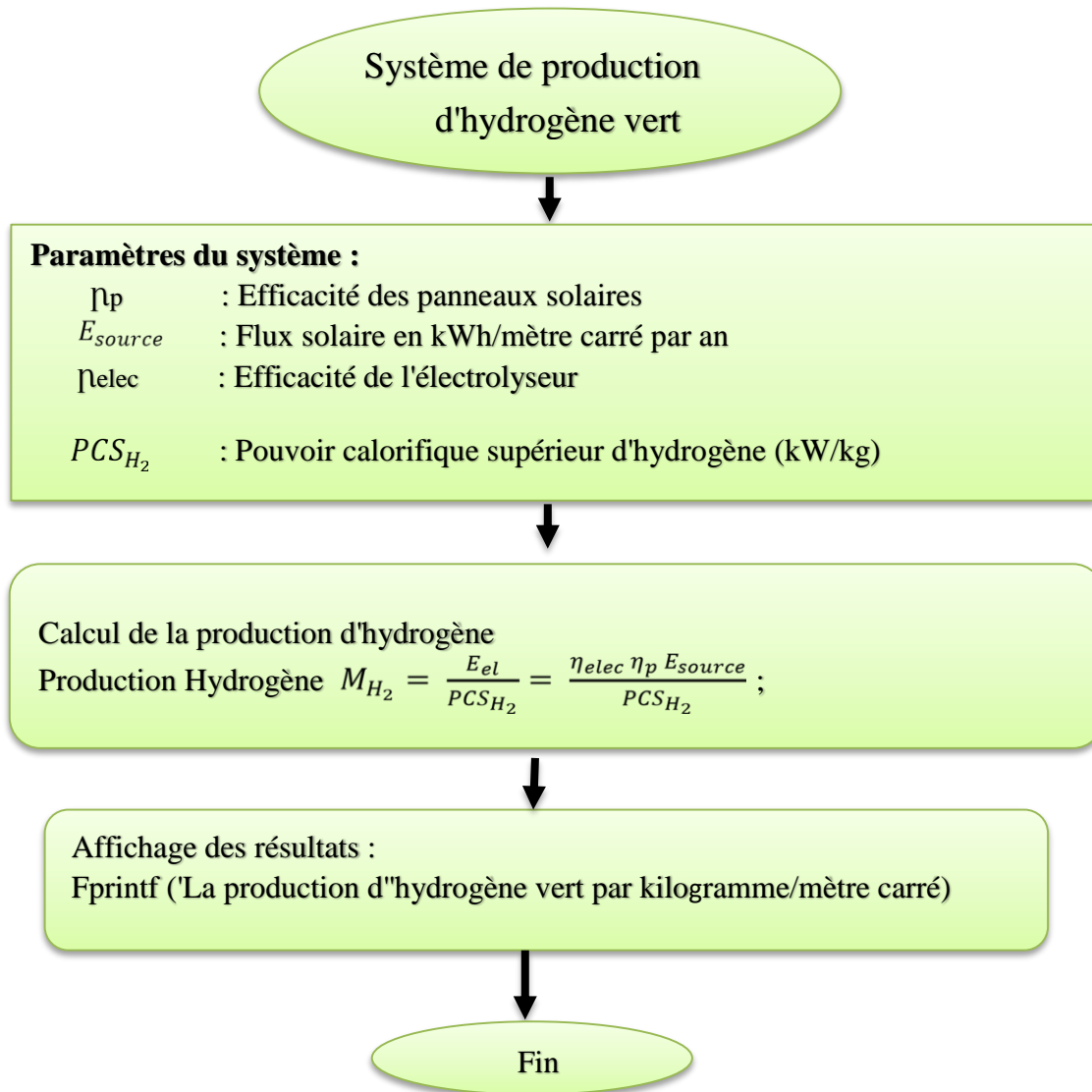
Electrolyseur	Température de fonctionnement (°C)	Pression de fonctionnement (bar)	Consommation électrique (kWh/Nm3 d'H2)	Rendement énergétique (%)	Etat du marché
PEM	80-100	1-70	6	80-90	Mature

III.4 Estimation de la production de l'hydrogène en Algérie :

Plusieurs technologies sont utilisées pour la production d'hydrogène. Parmi les plus courantes, on trouve la décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon, l'électrolyse de l'eau, les cycles de dissociation des substances thermochimiques pures et hybrides, ainsi que les procédés photochimiques et la photobiologie.

La majeure partie de l'hydrogène produite, en particulier pour l'industrie pétrochimique, provient du gaz naturel, principalement par reformage à la vapeur. Cependant, les ressources en gaz peuvent être améliorées en utilisant l'énergie solaire pour la production d'hydrogène vert, notamment par la décomposition de l'eau en utilisant des sources d'énergie renouvelables.

Cette étude se concentre sur la production d'hydrogène vert par l'énergie solaire dans certaines régions du sud de l'Algérie, bénéficiant d'un fort ensoleillement allant de 1800 à 3000 kWh par an. Cela permet d'obtenir une production d'hydrogène vert à un pourcentage significatif [24].



III.5 Estimation du coût de la production de l'hydrogène en Algérie :

Le coût total de production d'hydrogène solaire en Algérie peut être calculé en prenant en compte plusieurs éléments. Voici les principaux facteurs à considérer lors du calcul du coût total :

1. Enquête initiale : Cela comprend les coûts liés à la mise en place de l'infrastructure de production d'hydrogène solaire, tels que les panneaux solaires, les électrolyseurs, les systèmes de stockage, les équipements auxiliaires.

2. Besoins en matériel : Il est indispensable que le chronométreur fournisse le matériel nécessaire à la production d'hydrox chloroquine, qui comprend pan-solaire, électrolytes, compresseurs, systèmes de purification, réserves de stockage, distribution des systèmes de stockage.

3. Coûts de fonctionnement et d'entretien : Il ne tient pas compte des coûts de fonctionnement et d'entretien des installations de production d'hydrox chloroquine, donc des équipements électriques à équiper, des coûts d'entretien régulier, des coûts de remplacement des pièces.

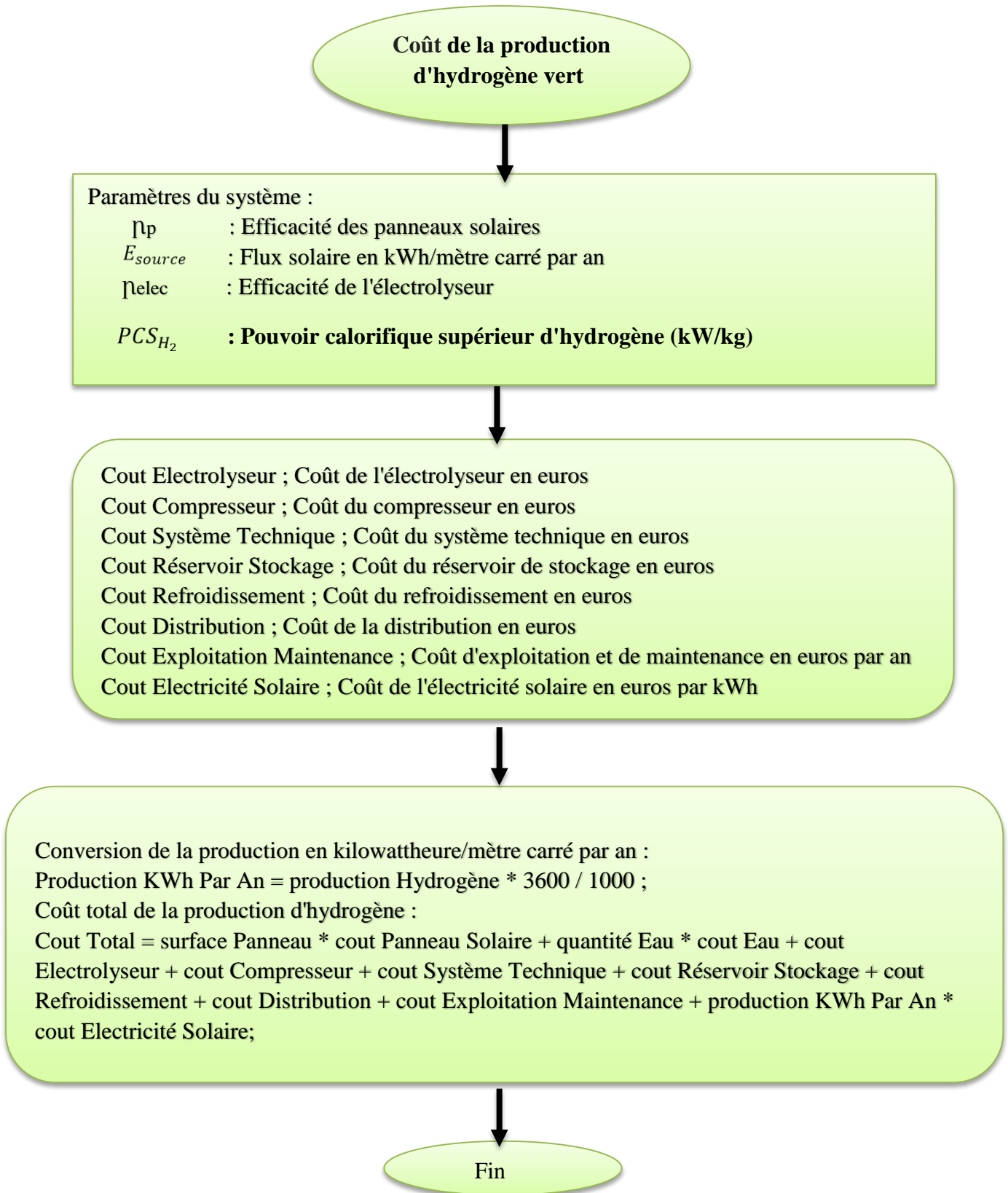
4. Réduction de l'électrolyseur : Le taux de conversion de l'électrolyseur, qui est efficace avec la conversion de l'énergie électrique en hydrogène, est un fait important à prendre en considération. Un rendement plus élevé signifie une production d'hydrogène plus efficace, ce qui peut réduire les coûts de production.

5. Coûts solaires électrolytiques : Coûts de l'énergie électrique solaire pour les utilités électriques avec différents types d'utilités solaires électriques, installation capacité, tarifs d'achat ou coûts de production solaire électrolytique.

6. Stockage coûts : Si l'hydrogène doit être stocké pour une utilisation ultérieure, il est important de prendre en compte les coûts de stockage, tels que les réservoirs de stockage, les systèmes de compression ou de liquéfaction, les pertes d'hydrogène pendant le stockage.

7. Coûts de distribution : si l'hydrogène n'est pas distribué sur une certaine distance, les coûts liés au transport et à la distribution doivent être pris en compte.

Il est important de noter que les coûts de production de l'hydrogène solaire peuvent varier en fonction de l'échelle de production, des technologies utilisées, des politiques énergétiques du pays, des conditions géographiques spécifiques, des coûts des matières premières. Par conséquent des études détaillées, des analyses de rentabilité et des évaluations spécifiques doivent être effectuées pour obtenir des estimations précises du coût total de production d'hydrogène solaire en Algérie [16].



III.6 Résultats :

Nous avons pris les données de flux solaire pour l'année 2021 de [25].

Tableau III.3 : coût de production d'hydrogène vert par Wilaya .

La Ville	Flux solaire annuelle (kWh/m ²)	production d'hydrogène vert annuel (kg/m ²)	Cout production d'hydrogène vert annuel (DA)
Adrar	2710.8	9.2647	23295141.37
Tamanrasset	2589.2	8.8491	22250324.67
Hassi-Mess	2668.56	9.1203	22932203.82
Biskra	2632.24	8.9968	22620134.43
El oued	2622.53	8.9630	22536703.32
Bechar	2523.4	8.6242	21684957.31
Touggourt	2609.45	8.9185	22424317.22
Ouargla	2659.75	9.0902	22856506.34
Ghardaïa	2620.5	8.9561	22519261.00

Tableau III. 4 : Production d'hydrogène vert des différents Wilaya par mois (kg/m²).

	Adrar	Tamanrasset	Hassi-Mess	Biskra	El oued	Touggourt	Ouargla	Ghardaïa	Bechar
Janvier	0.4542	0.5486	0.2665	0.3465	0.3660	0.3650	0.4049	0.4162	0.4244
Février	0.4777	0.6039	0.4070	0.4367	0.4460	0.4808	0.4460	0.4572	0.4931
Mars	0.6233	0.6613	0.4870	0.5711	0.6715	0.5505	0.5772	0.5741	0.5444
Avril	0.7095	0.7648	0.5926	0.6633	0.6664	0.7331	0.6838	0.6920	0.7146
Mai	0.7170	0.7997	0.7143	0.7402	0.7207	0.7679	0.7002	0.7054	0.7505
Juin	0.7570	0.8305	0.7177	0.7043	0.6992	0.8130	0.7372	0.7495	0.5705
Juillet	0.8069	0.7341	0.7464	0.7997	0.7864	0.7956	0.8017	0.8089	0.8062
Aout	0.4716	0.7084	0.6644	0.7259	0.7259	0.7197	0.7556	0.7566	0.7269
Septembre	0.6739	0.7289	0.5464	0.5823	0.5054	0.5895	0.6500	0.6274	0.6151
Octobre	0.5571	0.6223	0.4490	0.4890	0.4818	0.4921	0.5177	0.5239	0.5249
Novembre	0.4552	0.5085	0.2460	0.3588	0.3793	0.3773	0.3947	0.4029	0.4152
Décembre	0.4060	0.4634	0.2768	0.3315	0.3505	0.3301	0.3752	0.3783	0.3803

III.7.Résultats et discussion :

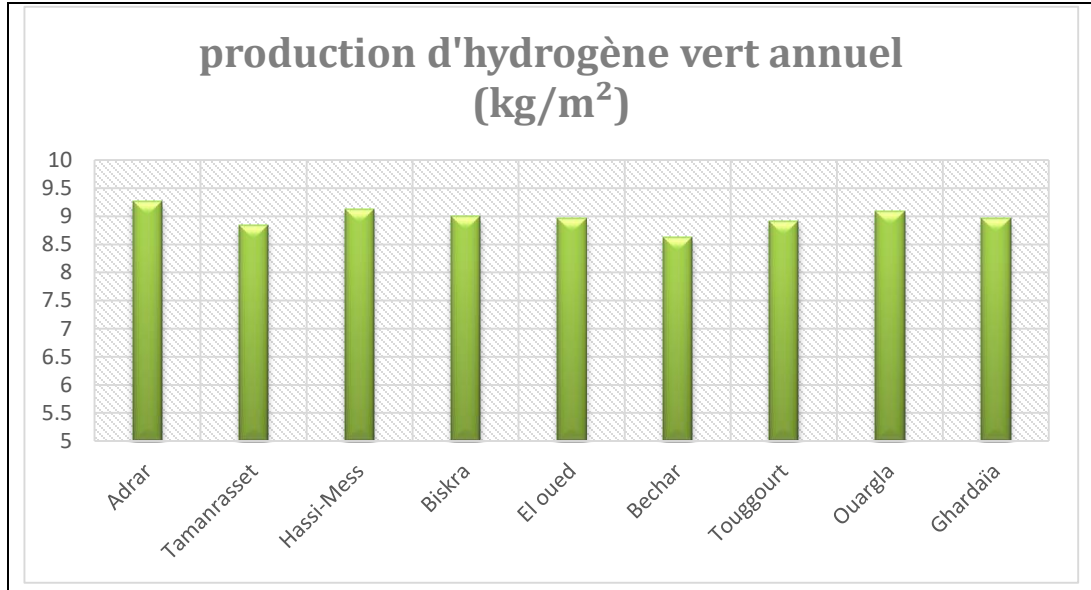


Figure III.3 : production d’hydrogène vert annuel pour différents wilayas .

Figure.3 : Les résultats obtenus sont présentés sur la figure. 4, qui montrent la production d'hydrogène dans certains Wilayas du sud en kWh par mètre carré de panneaux photovoltaïques poly cristallins. Ces résultats donnent une idée du potentiel de production d'hydrogène vert dans le sud de l'Algérie. On note également qu'il existe une convergence de production au niveau de ces Wilayas et une relative supériorité dans la Wilaya d'Adrar et de Hassi- Messaoud en production, du fait du flux solaire important.

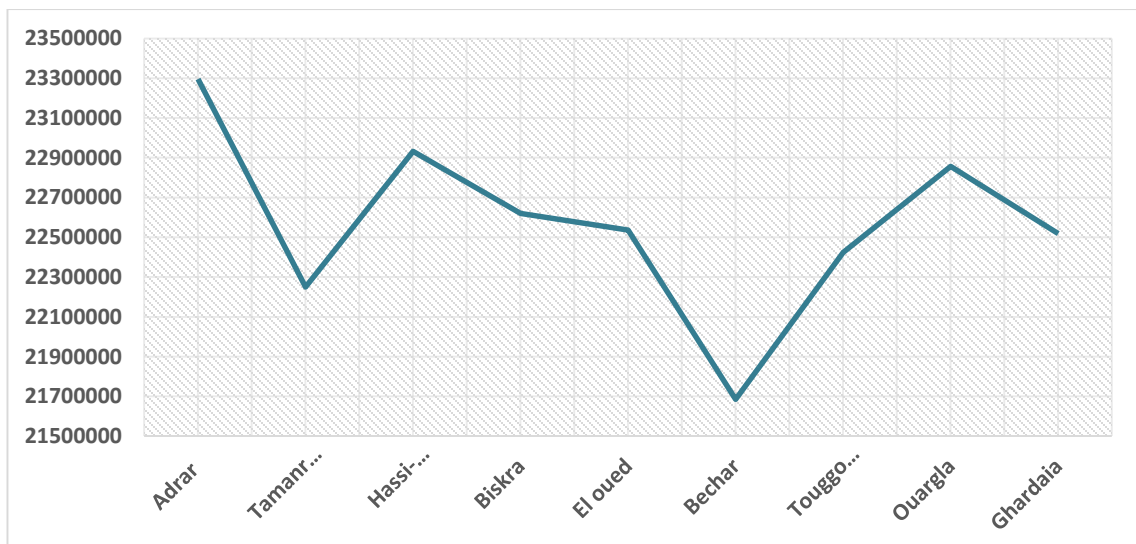


Figure III.4 : Coût de la production d’hydrogène vert annuel (DA).

Figure.4: montre l'évolution du coût de production d'hydrogène dans certains wilaya du sud Algérien, on remarque une différence dans le coût et c'est un peu élevé car le coût des panneaux solaires et des équipements, et la surface des panneaux a un rôle dans le coût, plus la surface augmente, plus le coût augmente, et réciproquement

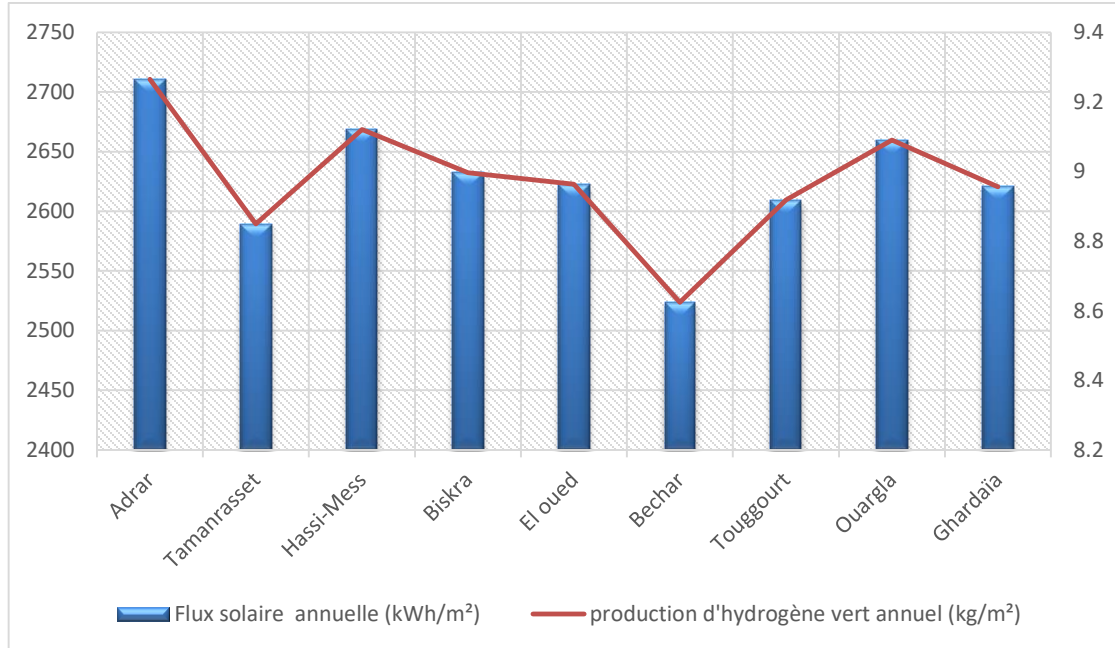


Figure III.5 : Production d'hydrogène vert et flux solaire en termes Wilayas.

Figure.5 : présente l'évolution de la production d'hydrogène et du flux solaire dans certains Wilayas du sud de l'Algérie. On peut observer que plus le taux de flux solaire n'est élevé, plus la production d'hydrogène vert n'augmente. De plus, on remarque que la production d'hydrogène à Tamanrasset, Adrar et Ouargla est légèrement plus élevée que dans les autres Wilayas.

Cette différence de production d'hydrogène peut être attribuée à un flux solaire plus élevé dans ces régions. En effet, ces Wilayas bénéficient d'un ensoleillement plus important, ce qui se traduit par une plus grande disponibilité d'énergie solaire pour la production d'hydrogène.

Il est important de noter que la production d'hydrogène vert est étroitement liée à l'apport d'énergie solaire, car l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène nécessite une source d'électricité propre, telle que l'énergie solaire. Ainsi, lorsque le flux solaire est élevé, il y a une plus grande quantité d'énergie disponible pour alimenter le processus d'électrolyse et augmenter la production d'hydrogène.

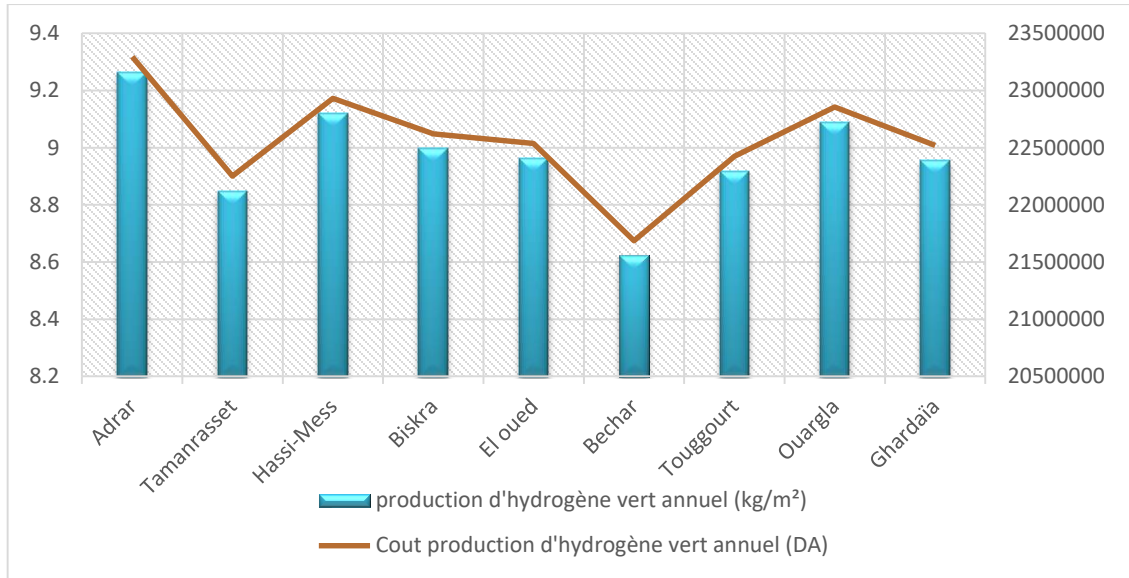


Figure III.6 : Production d'hydrogène vert et coût en termes Wilayas.

Figure.6 : Les résultats montrent l'évolution de la production d'hydrogène et du coût de production dans certains Wilayas du sud de l'Algérie. On peut observer une relation entre le pourcentage de production d'hydrogène vert et le coût de production d'hydrogène. Plus le pourcentage de production d'hydrogène vert est élevé, plus le coût de production d'hydrogène vert est élevé.

De plus, on remarque que le coût de production d'hydrogène à Tamanrasset, Adrar et Ouargla est légèrement plus élevé que dans les autres Wilayas. Cette différence de coût de production peut être attribuée au taux de production d'hydrogène plus élevé dans ces régions.

Lorsque le taux de production d'hydrogène est élevé, cela peut entraîner une augmentation des coûts de production. Cela peut être dû à plusieurs facteurs tels que la nécessité d'investir dans des infrastructures supplémentaires, d'augmenter la capacité de production et de gérer la demande croissante. Par conséquent, il est possible que Production mensuelle d'hydrogène vert en termes Wilayas avec une production d'hydrogène plus élevée, comme Tamanrasset, Adrar et Ouargla, aient des coûts de production légèrement plus élevés.

Il convient de noter que le coût de production d'hydrogène peut également être influencé par d'autres facteurs tels que les coûts de l'énergie utilisée dans le processus de production, les coûts des matières premières et les coûts de l'entretien des installations. Ces facteurs peuvent varier d'une région à l'autre, ce qui explique les différences de coût de production d'hydrogène entre Production mensuelle d'hydrogène vert en termes Wilayas sites. .

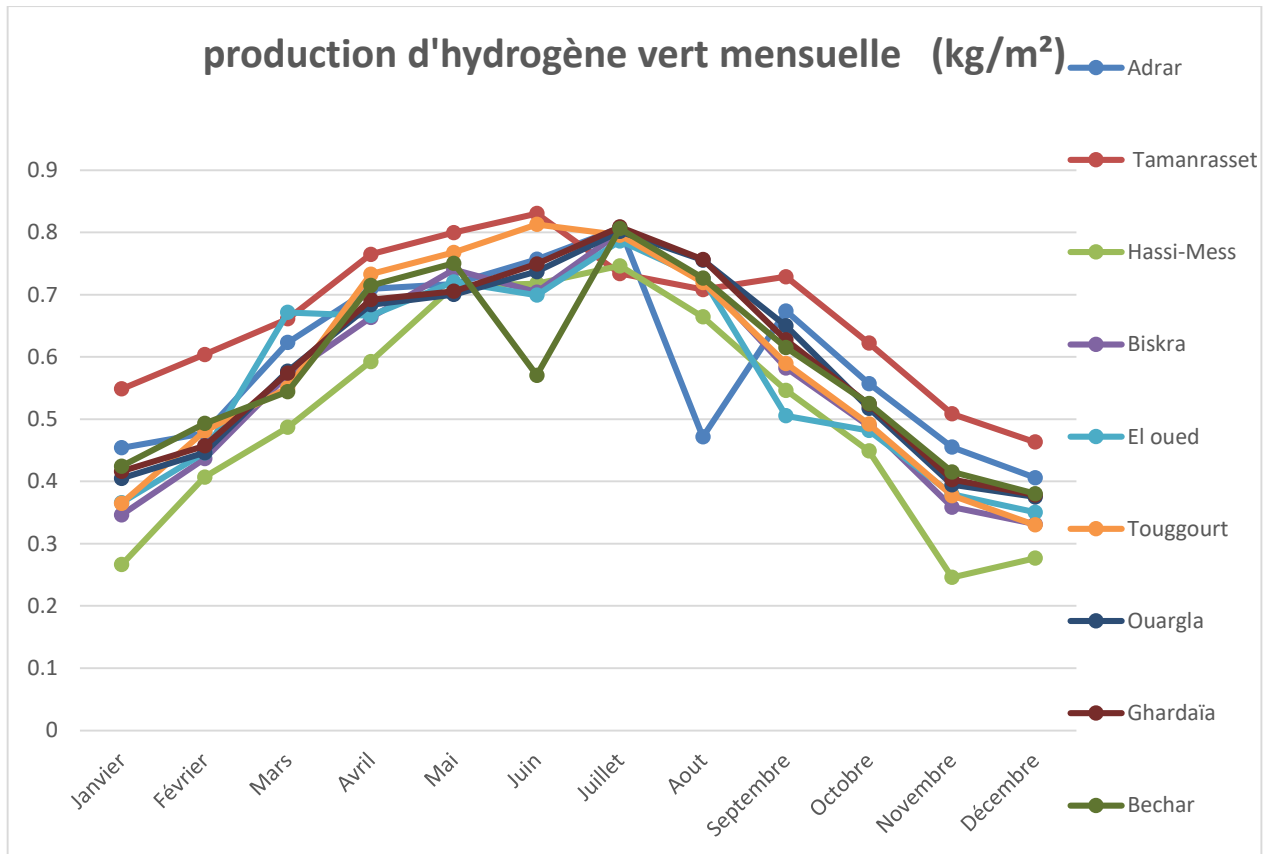


Figure III.7 : Production mensuelle d'hydrogène vert en termes Wilayas

Figure.7 : Les résultats obtenus, on remarque que le rythme de production de l'hydrogène varie par mois. Certains Wilayas du sud de l'Algérie ont un potentiel de production similaire tout au long de l'année. Cependant, la production est deux fois plus élevée en juin, juillet et août qu'en décembre et janvier.

Cette différence de production s'explique par le fait que le flux solaire est plus important en été qu'en hiver. En effet, pendant les mois d'été, le soleil est plus haut dans le ciel, ce qui entraîne une intensité plus élevée du rayonnement solaire. D'autre part, pendant les mois d'hiver, le soleil est plus bas dans le ciel, ce qui réduit l'intensité du rayonnement solaire.

III.8.Conclusion :

Les résultats de l'étude montrent que la production d'hydrogène vert est directement influencée par le taux de flux solaire. Les Wilayas du sud algérien avec un flux solaire plus élevé, tels que Tamanrasset, Adrar et Ouargla, présentent une production d'hydrogène légèrement supérieure par rapport aux autres Wilayas, en raison de cette disponibilité accrue d'énergie solaire.

Et montrent une relation entre le pourcentage de production d'hydrogène vert et le coût de production d'hydrogène. Une production d'hydrogène plus élevée peut entraîner des coûts de production plus élevés. De plus, les Wilayas du sud algérien avec une production d'hydrogène plus élevée, tels que Tamanrasset, Adrar et Ouargla, peuvent présenter des coûts de production légèrement supérieurs, en raison de la demande accrue et des investissements nécessaires pour soutenir cette production.

Ainsi, en raison de la variation saisonnière du flux solaire, la production d'énergie solaire est plus élevée pendant les mois d'été que pendant les mois d'hiver.

Conclusion générale

Conclusion générale

La production d'hydrogène vert en Algérie présente de nombreux avantages et opportunités, mais aussi des défis à relever. De manière générale, l'Algérie dispose d'atouts importants qui pourraient lui permettre de devenir un acteur majeur de la production d'hydrogène vert.

L'Algérie dispose d'importantes réserves de gaz naturel, qui est une matière première essentielle pour produire de l'hydrogène vert par reformage à la vapeur. Cette méthode de production capte et stocke les émissions de carbone, ce qui en fait une solution plus respectueuse de l'environnement que la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles.

De plus, le pays bénéficie d'un fort ensoleillement, ce qui lui donne un énorme avantage pour produire de l'hydrogène vert par électrolyse de l'eau en utilisant des énergies renouvelables comme l'énergie solaire. L'Algérie a un énorme potentiel pour développer des capteurs solaires et des installations d'électrolyse, qui produiront de grandes quantités d'hydrogène vert.

Les résultats de l'étude montrent que la production d'hydrogène vert est directement influencée par le taux de flux solaire. Les Wilayas du sud algérien avec un flux solaire plus élevé, tels que Tamanrasset, Adrar et Ouargla, présentent une production d'hydrogène légèrement supérieure par rapport aux autres Wilayas, en raison de cette disponibilité accrue d'énergie solaire.

Et résultats montrent aussi une relation entre le pourcentage de la production d'hydrogène vert et le coût de production d'hydrogène. Une production d'hydrogène plus élevée peut entraîner des coûts de production plus élevés. De plus, les Wilayas du sud algérien avec une production d'hydrogène plus élevée, tels que Tamanrasset Adrar et Ouargla, peuvent présenter des coûts de production légèrement supérieurs, en raison de la demande accrue et des investissements nécessaires pour soutenir cette production.

Il est important d'assurer la durabilité environnementale de la production d'hydrogène vert. Des mesures strictes doivent être prises pour minimiser les impacts environnementaux et assurer une utilisation responsable des ressources naturelles.

La production d'hydrogène vert en Algérie pourrait également contribuer à diversifier son économie. Actuellement, le pays dépend largement des revenus des hydrocarbures, et la transition vers une économie verte de l'hydrogène peut offrir de nouvelles opportunités économiques, créer des emplois et stimuler le développement technologique.

Référence :

- [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,).

Référence

- [8] N. Hajjaji. Analyse de cycle de vie exégétique 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]. ELBAHRI, F., & SAADOUNI, I. (2016). Etude, dimensionnement et simulation d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).
- [12] H. Derbal , R. Miri et A. M'Raoui, Etude d'un système de production d'hydrogène par voie solaire Application sur l'électrolyse de la vapeur d'eau à très hautes températures, *Rev. Energ. Ren.* Vol. 8, p137 – 156, 2005.
- [13] A.P.Simpson, A.E.Lutz: Energy analysis of hydrogen production via steam methane reforming, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 2007, Vol.32, P.4811-4820.
- [14] K.Shashi, K.Surendra, K.P.Jitendra: Hydrogen production by partial oxidation of methane, Modeling and simulation, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 2009, Vol.34, P.6655-6668.
- [15] The International Energy Agency (IEA), Hydrogen production and storage, Hydrogen implementing agreement, 2005.
- [16] Bouziane, K. (2011). Etude d 'une installation photovoltaïque de production d 'hydrogène par électrolyse de l 'eau. Mémoire de Magister Energétique et Procèdes, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie.

Référence

- [17] N.Nagai, M.Takeuchi, T.Kimura, T.Oka, Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis, *Int. Journal of Hydrogen Énergie*, 2003, Vol.28(1), P.35-41.
- [18] A. Damien, Hydrogène par électrolyse de l'eau, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, 2002.
- [19].AFHyPAC, 2015. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. , pp.1–12.
- [20] D.B.Levin, L.Pitt,M.Lov, Bio hydrogen production: prospects and limitations to practical application, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 2004, Vol.29, P.173-185.
- [21] J. Labbé, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité —Énergétique, 2006.
- [22]. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau – AFHYAC, 2015.
- [23] Abbassi et Fairouz. Effet des oxydes métalliques (TiO₂, CuO, Al₂O₃) sur la production d'hydrogène (Thèse de doctorat) Université de Kasdi Merbah Ouargla
- [24].Boudries-Khellaf, R., & Khellaf, A. (2003). Estimation de la Production de l'Hydrogène Solaire au Sud Algérien. *Revue des Energies. Renouvelables.* : ICPWE, 73-77.
- [25]. nasa.<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>. 16 :30.20/05/2023.

Production et exploitation de l'hydrogène vert en Algérie

Résumé :

L'hydrogène est le carburant et le vecteur énergétique du futur. Par l'hydrogène vert, nous entendons par l'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables, dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur la production l'hydrogène par l'énergie solaire.

L'Algérie avec un emplacement très approprié pour l'utilisation de l'énergie solaire, car il a une durée de rayonnement et une quantité d'énergie très importantes, ce qui fait de l'Algérie un endroit approprié pour la production d'hydrogène par l'énergie solaire. Dans ce travail, nous avons utilisé un programme de calcul en MATLAB pour donner l'estimation de la production d'hydrogène vert et son coût dans certaines wilayas du sud algérien en utilisant l'électrolyse de l'eau. Après résultats trouves ont été analysés et discutés.

Abstract :

Hydrogen is the fuel and energy carrier of the future. By green hydrogen we mean hydrogen produced from renewable energy sources, in this study we focused on hydrogen production by solar energy.

Algeria has a very suitable location for the use of solar energy, because of its very large radiation duration and amount of energy, which makes Algeria a suitable place for hydrogen production through solar energy. In this work, we used a calculation program in MATLAB to give an estimate of green hydrogen production and its cost in some states of southern Algeria using water electrolysis. After finding the results, they were analyzed and discussed.

ملخص:

الهيدروجين هو ناقل الوقود والطاقة في المستقبل. نعني بالهيدروجين الأخضر الهيدروجين المنتج من مصادر الطاقة المتجددة ، في هذه الدراسة ركزنا على إنتاج الهيدروجين بواسطة الطاقة الشمسية.

تتمتع الجزائر بموقع مناسب جدًا لاستخدام الطاقة الشمسية ، لما لها من مدة إشعاع كبيرة جدًا وكمية من الطاقة ، مما يجعل الجزائر مكانًا مناسبًا لإنتاج الهيدروجين عن طريق الطاقة الشمسية. في هذا العمل ، استخدمنا برنامج حساب في MATLAB لإعطاء تقدير لإنتاج الهيدروجين الأخضر وتكلفته في بعض ولايات جنوب الجزائر باستخدام التحليل الكهربائي للماء. بعد العثور على النتائج تم تحليلها ومناقشتها.

