

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A.MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

**Option**

**Energies renouvelables**

**Thème :**

**Potentiel de la production d'hydrogène à base d'énergies solaire  
en Algérie**

*a. Présenté par :*

M<sup>r</sup> BAHATT Omar

M<sup>r</sup> MOKRANI Salah-Eddine

*Encadré par :*

Dr R.Babouri

---

2022 / 2023

---

## *Dédicaces*

---

---

*Je souhaite dédier humblement ce travail à :*

*Mes très chers parents, pour l'amour inconditionnel qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements constants et toute l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée tout au long de mes études. Aucun mot ni dédicace ne sauraient exprimer pleinement le respect, la considération et l'amour que j'ai pour eux. Que Dieu les protège pour les nombreux sacrifices consentis en ma faveur.*

*À mes très chers frères, Omar, Amel et Nessrine, je suis reconnaissant(e) de leur soutien et de leurs encouragements tout au long de ce parcours. Leur appui indéfectible a été une source de motivation essentielle.*

*À mes très chers amis, Lounes, Aymen, Nabile, BAHATT Omar, Aissaoui Nour-Elislam et Ilyas melizou, je tiens à exprimer ma gratitude pour leur soutien moral précieux. Leur présence et leur encouragement ont été d'une grande importance dans mon cheminement.*

*À mes amis et à toute ma famille, je suis profondément reconnaissant(e) de leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire. Leur présence, leurs conseils et leur soutien ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé(e) dans cette entreprise.*

*Que cette dédicace témoigne de mon immense reconnaissance envers vous tous. Votre soutien indéfectible a été une source d'inspiration et de force tout au long de ce parcours. Je suis honoré(e) de vous avoir à mes côtés.*

*Avec tout mon amour et ma gratitude sincère.*

*MOKRANI Salah-Eddine*

*Je souhaite dédier humblement ce travail à :*

*Mes très chers parents, pour l'amour inconditionnel qu'ils m'ont toujours donné, leurs encouragements constants et toute l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée tout au long de mes études. Aucun mot ni dédicace ne sauraient exprimer pleinement le respect, la considération et l'amour que j'ai pour eux. Que Dieu les protège pour les nombreux sacrifices consentis en ma faveur.*

*À mes très chers frères, Mourad, Madjid, Amina, je suis reconnaissant(e) de leur soutien et de leurs encouragements tout au long de ce parcours. Leur appui indéfectible a été une source de motivation essentielle.*

*À mes très chers amis, MOKRANI Salah-Eddine, Anis tifraouine, je tiens à exprimer ma gratitude pour leur soutien moral précieux. Leur présence et leur encouragement ont été d'une grande importance dans mon cheminement.*

*À mes amis et à toute ma famille et mes oncles, je suis profondément reconnaissant(e) de leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire. Leur présence, leurs conseils et leur soutien ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé(e) dans cette entreprise.*

*Que cette dédicace témoigne de mon immense reconnaissance envers vous tous. Votre soutien indéfectible a été une source d'inspiration et de force tout au long de ce parcours. Je suis honoré(e) de vous avoir à mes côtés.*

*Avec tout mon amour et ma gratitude sincère.*

**BAHATT OMAR**

## *Remerciements*

---

---

*Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Allah le Tout-puissant pour nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadrement de mémoire, Monsieur R. BABOURI, docteur à l'université de Bejaia, pour ses encouragements constants, ses critiques constructives et son soutien moral. Grâce à ses conseils précieux, nous avons pu gagner en autonomie et mener à bien ce travail.*

*Nous souhaitant exprimer nos reconnaissances envers nous parents. Votre amour, votre compréhension et votre confiance en nous, il's en donné la force nécessaire pour persévérer et surmonter les difficultés rencontrées durant cette période. Votre soutien constant a été une source d'inspiration et de motivation qui nous a permis d'atteindre nos objectifs. Nous sommes profondément reconnaissant(e) de tout ce que vous avez fait pour nous et de l'amour inconditionnel que vous avez témoigné.*

*Nous souhaitant également adresser nos remerciements à nos frères, sœurs et autres membres de nos familles. Votre présence, vos encouragements et vos précieux conseils ont été d'une grande valeur pour nous. Votre soutien moral et émotionnel ne permis de rester concentré(e) sur nos études et de surmonter les moments de doute et de découragement.*

*Nous sommes extrêmement reconnaissant(e) d'avoir une famille aussi aimante et solidaire.*

*Nous leur exprimons notre profonde gratitude et notre reconnaissance éternelle pour avoir été à nos côtés tout au long de ce parcours académique.*

*Que leurs bénédictions et leur amour continuent de nous accompagner dans nos futures réalisations.*

## SOMMAIRE

### Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre 01.....</b>	<b>13</b>
<b>    GENERALITE SUR LA PRODUCTION D'HYDROGENE .....</b>	<b>13</b>
1.1. Introduction .....	13
1.2. Historique .....	13
1.3. Les caractéristiques de l'hydrogène .....	15
1.3.1. Propriétés physiques de l'hydrogène .....	16
1.3.2. Propriétés chimiques de l'hydrogène .....	16
1.3.3. Propriétés énergétiques de l'hydrogène .....	17
1.4. Production d'hydrogène .....	18
1.4.1. Vaporéformage .....	18
1.4.2. Electrolyse .....	19
1.4.3. Photosynthèse .....	21
1.4.4. Pile à combustible .....	21
1.4.5. Biomasse .....	21
1.5. Stockage de l'hydrogène .....	22
1.5.1. Les formes de stockage d'hydrogène .....	22
1.5.1. Les avantages et les inconvénients de chaque forme.....	24
1.6. Demande d'hydrogène .....	25
1.7. Transport de l'hydrogène .....	26
1.8. Utilisation d'hydrogéné.....	27
1.8.1. En site isolé.....	27
1.8.2. Alimentation électrique de secours .....	27
1.8.3. Systèmes de traction à l'hydrogène .....	27

## SOMMAIRE

1.8.4. Station pour véhicule à hydrogène.....	27
1.9. Les risques dans la production et l'utilisation de l'hydrogène .....	28
1.9.1. Risques d'explosion.....	29
1.9.2. Risques d'incendie .....	29
1.9.3. Risques de toxicité.....	30
1.9.4. Risques liés au stockage et au transport de l'hydrogène .....	30
<b>1.9.5</b> Risques liés aux réactions chimiques avec d'autres substances.....	30
1.9.6. Risques liés aux comportements humains .....	30
1.10. La viabilité à grande échelle de la production d'hydrogène .....	31
1.10.1. Coûts de production .....	31
1.10.2. Approvisionnement en matières premières.....	32
1.10.3. Efficacité énergétique .....	33
1.10.4. Impact environnemental .....	33
1.10.5. Infrastructure.....	34
1.11. Conclusion.....	35
<b>Chapitre 02.....</b>	<b>36</b>
<b>TECHNIQUE DE PRODUCTION D'HYDROGENE A BASE D'ENERGIES</b>	
<b>RENOUVELABLES.....</b>	<b>36</b>
2.1. Introduction .....	36
2.2. Techniques de production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables .....	37
2.3. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau .....	37
2.3.1. Electrolyseur alcaline.....	38
2.3.2. Electrolyseur à haute température.....	39
2.3.3. Electrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) .....	41
2.3.4. Applications de l'électrolyse de l'eau .....	43
2.4. Production d'hydrogène par la Biomasse.....	45
2.4.1. Conversion de la biomasse en hydrogène.....	45

## SOMMAIRE

2.4.2. Avantages et défis de la production d'hydrogène à partir de la biomasse .....	47
2.4.3. Biomasse et production d'hydrogène .....	49
2.4.4. Nouvelles technologies de conversion de la biomasse en hydrogène .....	50
2.5. Production d'hydrogène par Énergie solaire photovoltaïque.....	51
2.5.1. Utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène .....	52
2.5.2. Systèmes solaires photovoltaïques.....	52
2.5.3. Avantages de l'énergie solaire photovoltaïque dans la production d'hydrogène. ....	55
2.5.4. Inconvénient de l'énergie solaire photovoltaïque dans la production d'hydrogène.....	55
2.5.5. Perspectives futures de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène. .....	56
2.6. Production d'hydrogène par Énergie éolienne .....	58
2.6.1. Énergie éolienne pour la production d'hydrogène .....	58
2.6.2. Avantages de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'hydrogène .....	59
2.6.3. Défis et opportunités .....	61
2.7. Énergie hydraulique .....	62
2.7.1. Production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique .....	63
2.7.2. Barrages hydroélectriques et production d'hydrogène.....	63
2.7.3. Développement de technologies innovantes pour la production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique.....	64
2.8. Électrolyse assistée par plasma .....	65
2.8.1. La théorie de plasma .....	65
2.8.2. Production d'hydrogène par le Reformage Plasma.....	66
2.8.3. Perspectives futures de l'électrolyse assistée par plasma dans la production d'hydrogène .....	67
2.9. CONCLUSION .....	68

## SOMMAIRE

<b>Chapitre 03.....</b>	<b>69</b>
<b>POTENTIEL DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE A BASE D'ENERGIES</b>	
<b>SOLAIRE EN ALGERIE.....</b>	<b>69</b>
3.1. Introduction .....	69
3.2. L'hydrogène solaire comme source d'énergie propre .....	70
3.2.1. Avantages de l'hydrogène solaire.....	70
3.2.2. Applications de l'hydrogène solaire.....	71
3.2.3. Vecteur énergétique d'hydrogène solaire.....	72
3.2.4. Procédés de fabrication de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire.....	72
3.3. Potentiel solaire en Algérie pour la production d'hydrogène .....	73
3.3.1. Évaluation du potentiel solaire en l'Algérie .....	74
3.3.2. Potentiel solaire du Sahara algérien.....	75
3.3.3. Ressources solaires disponibles pour la production d'hydrogène en Algérie .....	76
3.3.4. Estimation de la production d'hydrogène en Algérie .....	77
3.4. Défis et opportunités de développement à la production d'hydrogène solaire en Algérie .....	78
3.5. Cadre politique et initiatives .....	80
3.5.1. Politiques et réglementations pour promouvoir la production d'hydrogène solaire en Algérie .....	80
3.5.2. Exemples de projets de production d'hydrogène solaire en Algérie.....	83
3.5.3. Infrastructures nécessaires pour soutenir la production et l'utilisation de l'hydrogène solaire.....	83
3.6. Perspectives futures et recommandations .....	84
3.6.1. Perspectives de développement de l'hydrogène solaire en Algérie .....	85
3.6.2. Recommandations pour stimuler la production d'hydrogène solaire en Algérie .....	85
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>87</b>



## *Liste des figures*

<b>Figure 1.1</b> : Principales technologies de production de l'hydrogène .....	18
<b>Figure 1.2</b> : Schéma Reformage des combustibles fossile à la vapeur d'eau. ....	19
<b>Figure 1.3</b> : Principales sources de production d'hydrogènes.....	20
<b>Figure 1.4</b> : pile combustible.....	20
<b>Figure 1.5</b> : Réaction de l'hydrogène avec le métal : dissociation de l'hydrogène en surface, diffusion dans le métal et formation de l'hydrure métallique .....	23
<b>Figure 1.6</b> : Demande mondiale d'hydrogène pur, 1975-2018.....	25
<b>Figure 1.7</b> : station d'une pompe à essence en Algérie.....	28
<b>Figure 1.8</b> : explosion d'une station de la distribution d'hydrogène pour véhicules, en Norvège ....	29
<b>Figure 1.9</b> : Un incendie à la raffinerie du sud de Philadelphie le vendredi 21 janvier 2019, dû à une négligence à une légère fuite dans l'une des canalisations de transport d'hydrogène .....	31
<b>Figure 1.10</b> : cout de production de l'hydrogène.....	32
<b>Figure 1.11</b> : la production d'hydrogène à partir du l'eau (électrolyse), et du gaz (vaporéformage)	33
<b>Figure 1.12</b> : La densité énergétique de l'hydrogène par rapport aux autres gaz (liquides).....	34
<b>Figure 2.1</b> : Schéma des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau .....	37
<b>Figure 2.2</b> : Electrolyseur alcalin .....	38
<b>Figure 2.3</b> : Electrolyseur alcalin standard.....	38
<b>Figure 2.4</b> : Principe d'une cellule d'électrolyse SOEC .....	40
<b>Figure 2.5</b> : Stack d'électrolyseur PEM .....	41
<b>Figure 2.6</b> : Mono cellule Electrolyseur PEM. ....	41
<b>Figure 2.7</b> : mécanismes de la gazéification .....	45
<b>Figure 2.8</b> : Les avantages de la biomasse .....	47

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 2.9 :</b> Schéma de processus de fermentation séquentielle pour la production d'hydrogène à partir de la biomasse.....	50
<b>Figure 2.10 :</b> conversion de l'énergie solaire en électricité. ....	51
<b>Figure 2.11 :</b> Les différents styles de systèmes photovoltaïques autonomes.....	52
<b>Figure 2. 12 :</b> Schéma d'un système de pompage au fil de soleil. ....	53
<b>Figure 2.13 :</b> Configuration du système hybride à bus continu .....	54
<b>Figure 2.14 :</b> Systèmes photovoltaïque connectés au réseau .....	54
<b>Figure 2. 15:</b> la production d'hydrogène par l'énergie éolienne .....	59
<b>Figure 2. 16:</b> les coûts de production de l'hydrogène «vert» pourraient être divisés par 3 entre 2018 et 2050. (©Connaissance des Énergies, d'après Irena).....	61
<b>Figure 2. 17:</b> Le schéma de procès d'une centrale de haute-chute .....	62
<b>Figure 2. 18:</b> Les particules existent dans le plasma.....	66
<b>Figure 2.19 :</b> Représentation schématique des quatre états de la matière.....	66
<b>Figure 3.1:</b> Les filières de synthèse d'hydrogène par voie solaire .....	73
<b>Figure 3.2:</b> Evolution du potentiel de production d'hydrogène durant l'année pour différents sites .....	74
<b>Figure 3.3:</b> Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel .....	76
<b>Figure 3.4:</b> quelques villages qui alimentés et prévus en alimentation solaire en Algérie .....	81

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1.1</b> : propriété thermo physique de l'hydrogène. ....	16
<b>Tableau 1.2</b> : Conditions d'hydratation de différents composés métalliques (Cm = capacité massique).....	25
<b>Tableau 1.3</b> : Comparaison des propriétés d'inflammabilité entre l'hydrogène, le méthane et l'essence. ....	29
<b>Tableau 2.1</b> : Synthèse sur les électrolyseurs alcalins .....	39
<b>Tableau 2.2</b> : Synthèse sur les électrolyseurs SOEC. ....	41
<b>Tableau 2.3</b> : Synthèse sur les électrolyseurs PEM .....	42
<b>Tableau 2.4</b> : les aspects clés de la mobilité durable. ....	44
<b>Tableau 2.5</b> : les avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'hydrogène. ....	60
<b>Tableau 2.6</b> : Avantages et inconvénient de l'utilisation de l'énergie hydraulique dans la production d'hydrogène. ....	64
<b>Tableau 3.1</b> : l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique .....	76
<b>Tableau 3.2</b> : Potentiel de Production annuelle d'hydrogène (l/m <sup>2</sup> /j) .....	78

## *Listes des Acronymes et Symboles*

---

---

**MW** : méga watt

**kWh/m<sup>2</sup>** : kilo water heure par mètre carré

**PPA** : Power Purchase Agreement MWC

**PPV** : Panneau photovoltaïque

**h/an** : heure par Anne

**TWh/an** : terra watt heure par an

**ASA** : l'Agence spatiale allemande CO2

**DBD** : décharge à barrière diélectrique

**H<sub>2</sub>** : molécule hydrogène

**DC** : direct courant

**PV** : photovoltaïque

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking

**CH<sub>4</sub>** : molécule de méthane

**H<sub>2</sub>O** : molécule d'eau

**PEM** : Proton Exchange Membrane

**SOEC** : Solid Oxid Electrolyser Cell

**Pt** : puissance turbin

**PCS** : puissance crête solaire

**KVA** : Kilo var

**T (K)** : température à l'échelle de kelvin

**PCI** : Pouvoir Calorifique Inferieur

**SPFC** : Solide Polymère Fuel Cell

**HCL** : acide chlorhydrique

**HBR** : acide bromhydrique

**IRH** : L'Institut de recherche sur l'hydrogène

**PEMFC** : Proton Exchange Membrane Fule cell

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

## **Introduction générale :**

Le présent mémoire de fin d'études se concentre sur le potentiel de production d'hydrogène solaire en Algérie. L'hydrogène est considéré comme une source d'énergie propre et prometteuse pour répondre aux besoins futurs en énergie tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. La production d'hydrogène à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie solaire, offre une solution prometteuse pour une transition énergétique durable.

Dans le premier chapitre, nous aborderons les principes fondamentaux de la production d'hydrogène, en mettant l'accent sur les différentes méthodes utilisées. Nous examinerons les procédés classiques tels que le reformage du gaz naturel, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau. De plus, nous discuterons des technologies émergentes telles que la thermolyse, la photo électrolyse et les bioréacteurs, qui offrent de nouvelles perspectives pour la production d'hydrogène. Le deuxième chapitre se concentre sur les différentes sources d'énergie renouvelable et leur utilisation potentielle pour la production d'hydrogène. Nous examinerons les procédés de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne, de l'énergie hydraulique, de la biomasse et de la géothermie. Nous discuterons également des défis et des avantages liés à chaque technologie, ainsi que de leur intégration dans un système énergétique global.

Est le dernier chapitre se concentrera sur le potentiel de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire en Algérie. Nous explorerons les ressources solaires abondantes du pays, en mettant en évidence les avantages et les possibilités offerts par cette source d'énergie renouvelable. Nous examinerons les différentes technologies solaires utilisées pour la production d'hydrogène, telles que les systèmes photovoltaïques et les centrales solaires thermiques. De plus, nous discuterons des politiques et des mesures incitatives nécessaires pour promouvoir la production d'hydrogène solaire en Algérie.

Ce mémoire de fin d'études vise à fournir une compréhension approfondie du potentiel de production d'hydrogène solaire en Algérie. En examinant les différentes techniques de production d'hydrogène à partir de toutes les sources d'énergie renouvelables et en se concentrant spécifiquement sur l'énergie solaire, ce mémoire contribuera à une meilleure compréhension des opportunités et des défis de la transition vers une économie de l'hydrogène durable. Est organisé en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect spécifique de la production d'hydrogène.

# Chapitre 01

## GENERALITE SUR LA PRODUCTION D'HYDROGENE

---

### 1.1. Introduction :

L'hydrogène peut être créé à partir de combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz ou le charbon, à partir de l'eau utilisant l'énergie hydraulique, solaire, éolienne ou nucléaire, ou à partir de la biomasse. Le gaz dihydrogène, également appelé hydrogène et désigné par le symbole H<sub>2</sub>, est un vecteur énergétique universel et ne peut être utilisé uniquement pour répondre aux problèmes liés à la pénurie annoncée d'énergies fossiles. Ils peuvent être appliqués dans des domaines tels que le transport, la production d'électricité et de chaleur pour les maisons ou l'appoint électrique.

### 1.2. Historique :

La production d'hydrogène a une histoire qui remonte à plusieurs siècles, Voici un aperçu détaillé de l'histoire de la production d'hydrogène :

**Découverte de l'hydrogène :** L'hydrogène a été découvert en 1766 par Henry Cavendish, un chimiste et physicien britannique. Il a réalisé des expériences sur l'acide sulfurique et le fer, produisant du gaz inflammable, qu'il a appelé "air inflammable". Ce gaz était en réalité de l'hydrogène, cette dernière doit son nom au français Lavoisier, qui vient du grec "hydro" (hudôr), "eau" et "gène" (gennen), « engendrer » [1].

**Production à partir de charbon (gaz de ville) :** Au 19<sup>e</sup> siècle, la production d'hydrogène à grande échelle a commencé avec le développement du gaz de ville. Le charbon était chauffé en l'absence d'air pour produire du gaz de houille, un mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de méthane. Ce processus était appelé "gazéification" [2].

**Production à partir de l'eau (électrolyse) :** À la fin du 19<sup>e</sup> siècle, l'électrolyse de l'eau est devenue une méthode courante de production d'hydrogène. L'électrolyse consiste à passer un courant électrique à travers de l'eau, ce qui sépare les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène. Cette méthode nécessitait toutefois une grande quantité d'énergie électrique [3].

**Production à partir de gaz naturel (reformage) :** Au début du 20<sup>e</sup> siècle, la production d'hydrogène à partir de gaz naturel a été développée. Dans le processus de reformage, le méthane (principal composant du gaz naturel) est chauffé à haute température en présence de vapeur d'eau, produisant de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. Le monoxyde de carbone peut ensuite être réagi pour produire davantage d'hydrogène et de dioxyde de carbone [4].

**Production à partir de pétrole (craquage) :** Pendant la Première Guerre mondiale, la production d'hydrogène à partir du pétrole a été développée en utilisant un processus appelé craquage catalytique. Dans ce processus, les molécules d'hydrocarbures plus lourds du pétrole sont cassées en molécules plus légères, produisant de l'hydrogène et d'autres produits pétroliers [5].

**Production à partir de biomasse :** Au cours des dernières décennies, des recherches ont été menées pour développer des méthodes de production d'hydrogène à partir de biomasse. Des procédés tels que la gazéification de la biomasse, la fermentation anaérobie et la pyrolyse ont été explorés pour produire de l'hydrogène à partir de matières organiques renouvelables [6].

- **Voici un historique détaillé de la production d'hydrogène avec des dates clés :**

**1661 : Robert Boyle** observe la production d'un gaz inflammable lorsqu'il réagit avec des acides. Cependant, il ne reconnaît pas l'hydrogène comme une substance distincte à ce stade.

**1766 : Henry Cavendish** isole pour la première fois l'hydrogène sous sa forme pure et le nomme "air inflammable".

**1783 : Lavoisier** introduit le terme "hydrogène", dérivé du grec "hydro" (eau) et "gènes" (général), pour décrire l'élément chimique.

**1800 : William Nicholson et Anthony Carlisle** découvrent le principe de l'électrolyse de l'eau, ouvrant ainsi la voie à la production d'hydrogène par ce procédé.

**1820 : Michael Faraday** réalise d'importantes recherches sur l'électrolyse de l'eau et identifie l'hydrogène comme le produit de la réduction à l'électrode négative.

**1838 : Christian Friedrich Schönbein** développe la pile à combustible, une technologie permettant de générer de l'électricité en utilisant l'hydrogène et l'oxygène.

**1874 : Jules Verne** évoque l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie dans son roman "Le Tour du monde en quatre-vingts jours".

**1898 : Thomas Edison** démontre l'utilisation de l'hydrogène dans des ballons dirigeables pour le transport aérien.

**1910** : Le premier générateur d'hydrogène basé sur la gazéification du charbon est construit par Charles Langer et Fritz Haber.

**1920** : Le procédé de reformage du gaz naturel est développé par Ipatiev et Chichibabin, permettant une production plus économique d'hydrogène à partir de cette source.

**1940** : Le craquage du pétrole est utilisé pour produire de l'hydrogène en grande quantité pendant la Seconde Guerre mondiale.

**1960** : Le programme spatial américain utilise des piles à combustible à hydrogène pour fournir de l'énergie électrique aux astronautes.

**1970** : La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau devient plus répandue, en utilisant principalement l'électricité provenant de centrales électriques.

**2000** : La production d'hydrogène à partir de sources d'énergie renouvelables (énergie solaire, éolienne) gagne en importance, conduisant au concept d'hydrogène vert. **2020** : Des avancées significatives sont réalisées dans les technologies d'électrolyse et de production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, avec des projets pilotes et des initiatives visant à promouvoir une économie de l'hydrogène décarboné.

### 1.3. Les caractéristiques de l'hydrogène :

L'hydrogène est un élément chimique extrêmement léger et abondant dans l'univers. L'hydrogène possède d'importantes propriétés énergétiques, Avec ses qualités physiques, chimiques et énergétiques uniques, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique clé pour l'avenir.

#### 1.3.1. Propriétés physiques de l'hydrogène :

Les principales particularités et propriétés physiques de l'hydrogène sont :

- ❖ L'hydrogène est l'élément le plus léger et le plus abondant dans l'univers [7].
- ❖ C'est un gaz incolore, inodore et non toxique à l'état naturel.
- ❖ L'hydrogène a la densité la plus faible de tous les gaz connus. Il est 14 fois moins dense que l'air.
- ❖ L'hydrogène a une forte capacité calorifique, il peut stocker une grande quantité de chaleur par unité de masse.
- ❖ L'hydrogène liquide est incolore, très froid  $-253^{\circ}\text{C}$  et bouillonne vigoureusement à température ambiante car il passe rapidement à l'état gazeux [7].
- ❖ L'hydrogène possède une conduction thermique faible. Il est 7 fois plus conducteur que l'air.



- ❖ L'hydrogène devient liquide seulement sous très haute pression ou à très basse température. Le tableau suivant donne les propriétés thermo physique de l'hydrogène.

**Tableau 1.2:**propriété thermo physique de l'hydrogène.

Masse moléculaire	2.016 g/mol
Electronégativité	2.1
Densité de masse (phase gazeuse)	0.0838 Kg /m <sup>3</sup>
Masse volumique (phase liquide)	70.8 kg/m
Température d'ébullition	20 K
Température de fusion	13.8K
Chaleur latente de vaporisation	449.59 KJ /Kg
Chaleur latente de fusion	58.23 KJ/kg
Chaleur latente de sublimation	507.39 KJ/Kg
Capacité calorifique (phase gazeuse)	14.9KJ/Kg k
Capacité calorifique (phase liquide)	9.69KJ/Kg k
Valeur de chauffage supérieur	140 MJ/ Kg k
Valeur de chauffage inférieur	120 MJ/ Kg

### 1.3.2. Propriétés chimiques de l'hydrogène :

Les propriétés chimiques fondamentales de l'hydrogène sont :

- Son symbole est H et son numéro atomique est 1.
- L'hydrogène est un gaz très inflammable. Sa flamme est presque invisible. Il brûle en produisant de l'eau.
- L'hydrogène est un gaz monoatomique. Sa molécule se compose de deux atomes d'hydrogène ( $H_2$ ). Il est diatomique.
- C'est un gaz peu soluble dans l'eau et les liquides organiques. Mais il a une bonne solubilité dans certains métaux, en particulier le palladium.
- L'hydrogène est un réducteur puissant. Il a une forte tendance à s'oxyder et peut réduire de nombreux oxydes métalliques.
- A haute température, l'hydrogène ionisé se dissocie en protons et électrons. Il devient un bon conducteur électrique.
- L'hydrogène forme des liaisons covalentes. Il peut former des liaisons simples, doubles ou triples avec d'autres atomes.

- L'hydrogène réagit avec la plupart des halogènes (chlore, brome, etc.) et peut produire des acides (acide chlorhydrique  $HCl$ , acide bromhydrique  $HBr$ , etc.).

### 1.3.3. Propriétés énergétiques de l'hydrogène :

Les principales propriétés énergétiques de l'hydrogène :

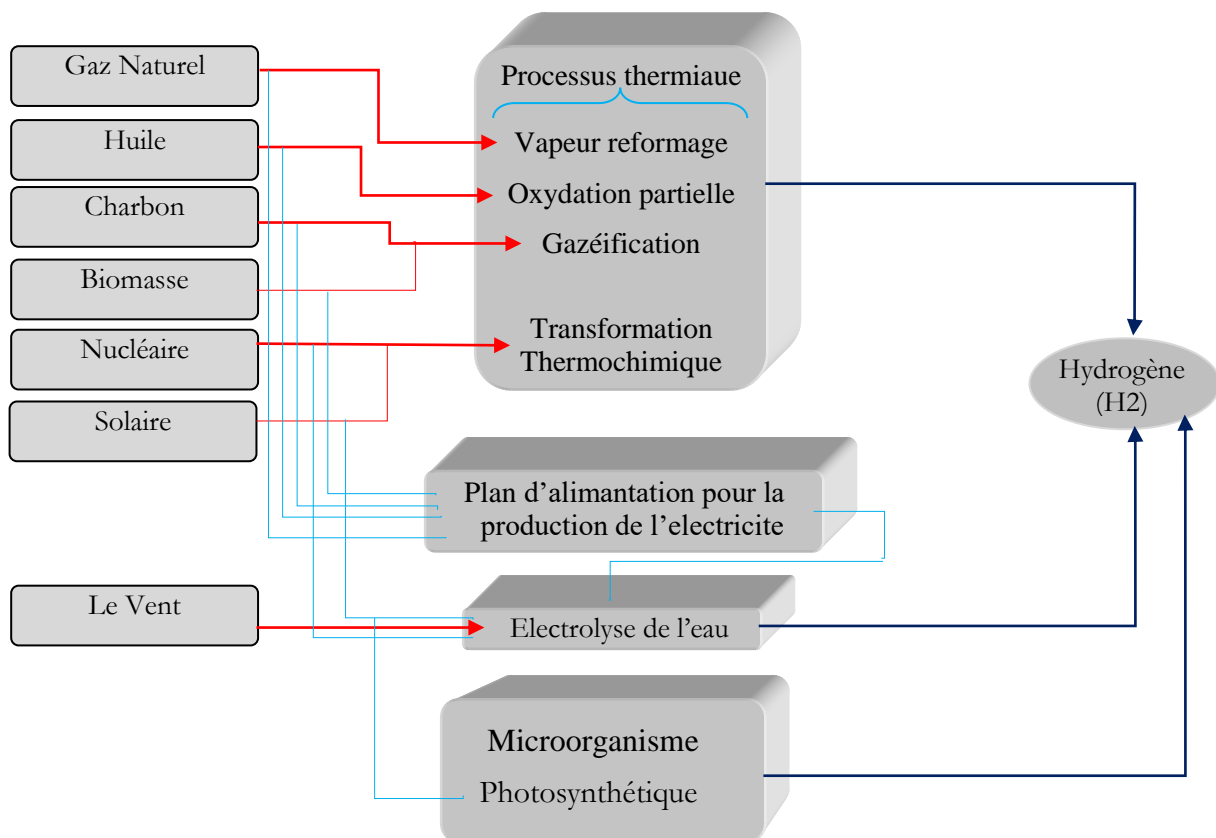
- L'hydrogène a une densité énergétique très élevée par unité de masse, environ 2,6 fois celle de l'essence. Cependant, sa densité volumique d'énergie est faible à cause de sa faible densité.
- L'hydrogène peut être utilisé comme carburant propulsif pour alimenter les moteurs de fusées et certains moteurs de véhicules. Lorsqu'il est brûlé avec de l'oxygène, les produits de combustion sont l'eau et de l'énergie thermique.
- La combustion de l'hydrogène dans l'air libère de grandes quantités d'énergie (141,9 MJ/kg) et ne produit que de la vapeur d'eau. Aucun polluant n'est émis. C'est pourquoi l'hydrogène est considéré comme un combustible "propre".
- Grâce à son fort pouvoir calorifique massique, l'hydrogène est 3 fois plus énergétique que les hydrocarbures par unité de masse. Il peut donc stocker plus d'énergie dans un réservoir de masse donnée.
- L'hydrogène peut être produit à partir de sources renouvelables (éolien, solaire) par électrolyse de l'eau. C'est un excellent vecteur énergétique pour le stockage de l'énergie et la production d'électricité.

### 1.4. Production d'hydrogène:

Aujourd'hui, de nombreux domaines techniques produisent de l'hydrogène à partir de diverses sources. Certaines de ces méthodes sont déjà prêtes pour la production, tandis que d'autres sont encore en cours de test. La consommation d'énergie précède toujours la création d'hydrogène.

Il existe deux modes de production classiques : une production importante utilisant de l'eau et des hydrocarbures (charbon, pétrole ou gaz naturel ; voir biogaz) ; les hydrocarbures fournissent l'énergie et l'eau est électrolysée pour produire de l'électricité [8].

Actuellement, le monde produit (et consomme) 55 Mt d'hydrogène par an, dont 95 % proviennent d'énergies fossiles (la moitié du gaz naturel) et 5 % de l'électrolyse de l'eau.



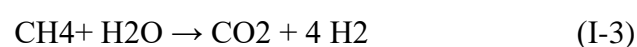
**Figure 1.1** : Principales technologies de production de l'hydrogène [9].

#### 1.4.1. Vaporéformage:

Reformage du méthane à la vapeur, est la technique de production la plus utilisée. La méthode la plus populaire pour fabriquer de l'hydrogène est le reformage à la vapeur du gaz naturel. Lorsque le gaz naturel est soumis à de la vapeur d'eau à 900°F, le dihydrogène qu'il contient est libéré. Le composant majeur du gaz naturel, le méthane [CH<sub>4</sub>], qui comprend quatre atomes d'hydrogène, est décomposé dans cette réaction chimique sous l'action de la chaleur pour libérer de l'hydrogène. Le dioxyde de carbone [CO<sub>2</sub>] et l'hydrogène [H<sub>2</sub>] peuvent tous deux être produits par deux processus ultérieurs.



Le bilan de ces deux réactions est donc, dans le cas du méthane



Le dihydrogène est créé par reformage de combustibles fossiles dans un rapport de 95 %. Du fait que le gaz naturel [CH<sub>4</sub>] est un combustible fossile, cette approche n'est pas renouvelable. De plus, il n'est pas propre en raison des importantes émissions de dioxyde de carbone [CO<sub>2</sub>]. À l'avenir, LE

dioxyde de carbone pourrait être capté et stocké [10].

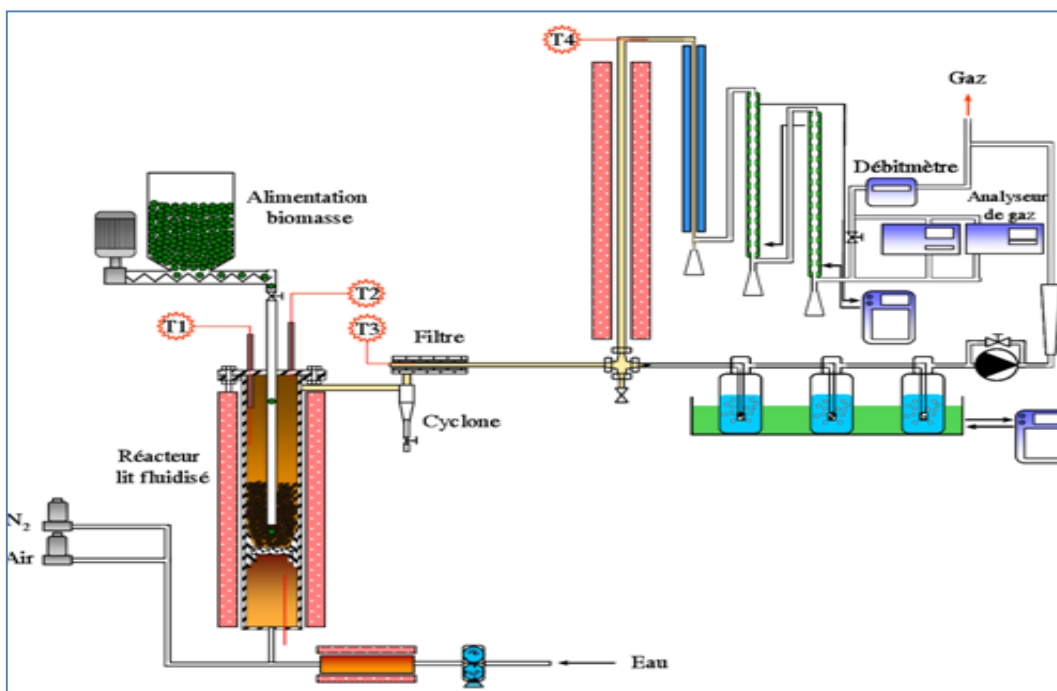
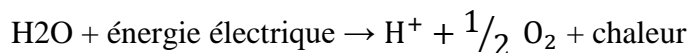


Figure 1.2 : Schéma Reformage des combustibles fossile à la vapeur d'eau.

#### 1.4.2. Electrolyse:

L'eau [H<sub>2</sub>O] est divisée en hydrogène [H<sub>2</sub>] et en oxygène [O<sub>2</sub>] par le processus d'électrolyse, qui consiste à conduire un courant électrique entre deux électrodes immergées dans un électrolyte aqueux. Parce que l'hydrogène créé est plus pur que celui créé par le reformage à la vapeur, les piles à combustible (PAC) peuvent l'utiliser. Dans le cas d'un rendement de 66 %, l'énergie nécessaire est typiquement de l'ordre de 50 kWh d'électricité par kilogramme d'hydrogène produit.

La molécule d'eau est scindée par le courant électrique en protons H<sup>+</sup> à l'anode et en ions hydroxyde [OH] à la cathode. Les protons consentent à un processus d'oxydation qui se traduit par de l'hydrogène gazeux. La réaction de rupture est décrite en dernier lieu :



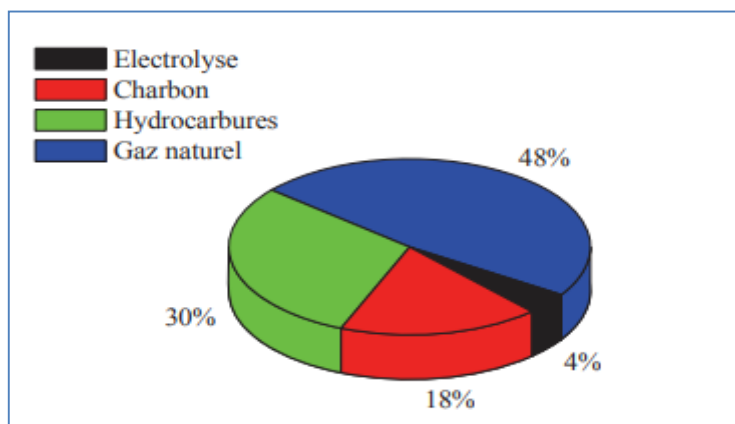


Figure 1.3 : Principales sources de production d'hydrogènes [11].

- Comment ça marche l'électrolyse ?

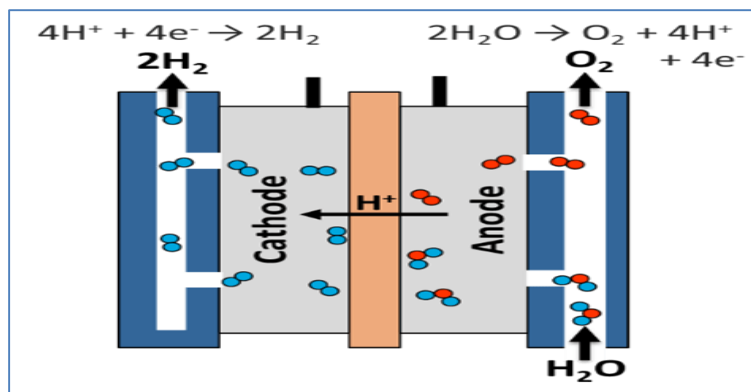


Figure 1.4 : pile combustible.

Comme les piles à combustible, les électrolyseurs sont constitués d'une anode et d'une cathode séparée par un électrolyte. Différents électrolyseurs fonctionnent de différentes manières, principalement en raison du type différent de matériau d'électrolyte impliqué et des espèces ioniques qu'il conduit.

- **Electrolyse alcaline:**

La solution de potasse est alcaline. Cette méthode est fiable, développée et testée.

- **Electrolyse PEM :**

L'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) est un type d'électrolyse qui utilise un électrolyte polymère solide pour conduire le flux de protons entre l'anode et la cathode pendant le processus d'électrolyse

- **Electrolyse SOEC haute température :**

L'électrolyse SOEC (Solide Oxyde Electrolyses Cell) à haute température est une méthode de

production d'hydrogène qui utilise une cellule électrolytique à haute température pour séparer l'eau en oxygène et en hydrogène. Cette méthode est également appelée électrolyse à haute température ou électrolyse à haute température et haute pression.

#### 1.4.3. Photosynthèse:

Ce pourrait être de la science-fiction de fabriquer de l'hydrogène exclusivement à partir de lumière et d'eau. Ou, certaines bactéries créent de l'hydrogène par le processus naturel de la photosynthèse. En utilisant cette technologie, les gaz à effet de serre ne sont pas rejetés directement dans l'atmosphère.

#### 1.4.4. Pile à combustible

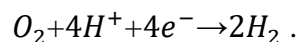
Un convertisseur d'énergie, PAC, est la pile à combustible. Un point de contact entre l'énergie électrique et chimique. Référencée comme "pile à combustible à membrane solide" (Solide Polymère Fuel Cell SPFC), son utilité vient de sa capacité à générer directement un courant électrique en déclenchant l'oxydation du combustible, en l'occurrence l'hydrogène Il lustre l'interaction entre l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et la réduction du comburant, en l'occurrence l'oxygène (O<sub>2</sub>), aux bornes d'une membrane conductrice ionique.

Selon l'équation, lorsque l'hydrogène est oxydé à l'anode, il se décompose en deux ions hydroniums (H<sup>+</sup>) et deux électrons (e) [12].



Les ions H<sup>+</sup> se déplacent à travers l'électrode poreuse du côté anode de la cellule vers l'électrolyte solide, qui est constitué d'une membrane échangeuse d'ions appelée Nafion.

D'autre part, conformément à l'équation, les deux électrons libérés par le sursaut de la molécule d'hydrogène rejoindront la cathode, qui servira de siège à la réduction de l'oxygène.



#### 1.4.5. Biomasse

Les débats récents concernant les bio-carbures soulèvent la question de l'utilisation des terres pour la production d'énergie au détriment de la production alimentaire. Cependant, il est possible de transformer les plantes en énergie en utilisant leurs composants non combustibles. De plus, des améliorations sont apportées pour augmenter les rendements.

Le méthane peut être produit grâce au recyclage des ordures ménagères. Son reformage permet un processus de production d'hydrogène propre, ainsi que le piégeage du CO<sub>2</sub>. Gardez également à l'esprit que les algues vertes, qui sont d'importants consommateurs de CO<sub>2</sub>, peuvent créer de l'hydrogène.

## 1.5. Stockage de l'hydrogène

Un litre de ce gaz ne pèse que 90 mg à pression atmosphérique, il est donc environ 11 fois plus légères que l'air que nous respirons [13].

### 1.5.1. Les formes de stockage d'hydrogène

Il faut un volume d'environ 11 m<sup>3</sup>, c'est-à-dire le volume du coffre d'un grand utilitaire, pour seulement stocker 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Il est donc indispensable d'augmenter sa densité et plusieurs techniques existent pour cela [9].

- ❖ le stockage à haute pression sous forme gazeuse.
- ❖ le stockage à très basse température sous forme liquide.
- ❖ le stockage à base d'hydrures sous forme solide.
- ❖ Le stockage sous forme d'hydrures métalliques.

- **Sous forme gazeuse**

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse est la méthode la plus commune. Pour augmenter la densité, l'hydrogène est comprimé sous haute pression (allant jusqu'à 1300 bars). Ce ci impose une consommation d'énergie de 10 à 20 % du PCI (Pouvoir Calorifique Inferieur).

A l'état gazeux et à 293 K, la densité de l'hydrogène est de 0,0827 kg/m<sup>3</sup> sous une pression de

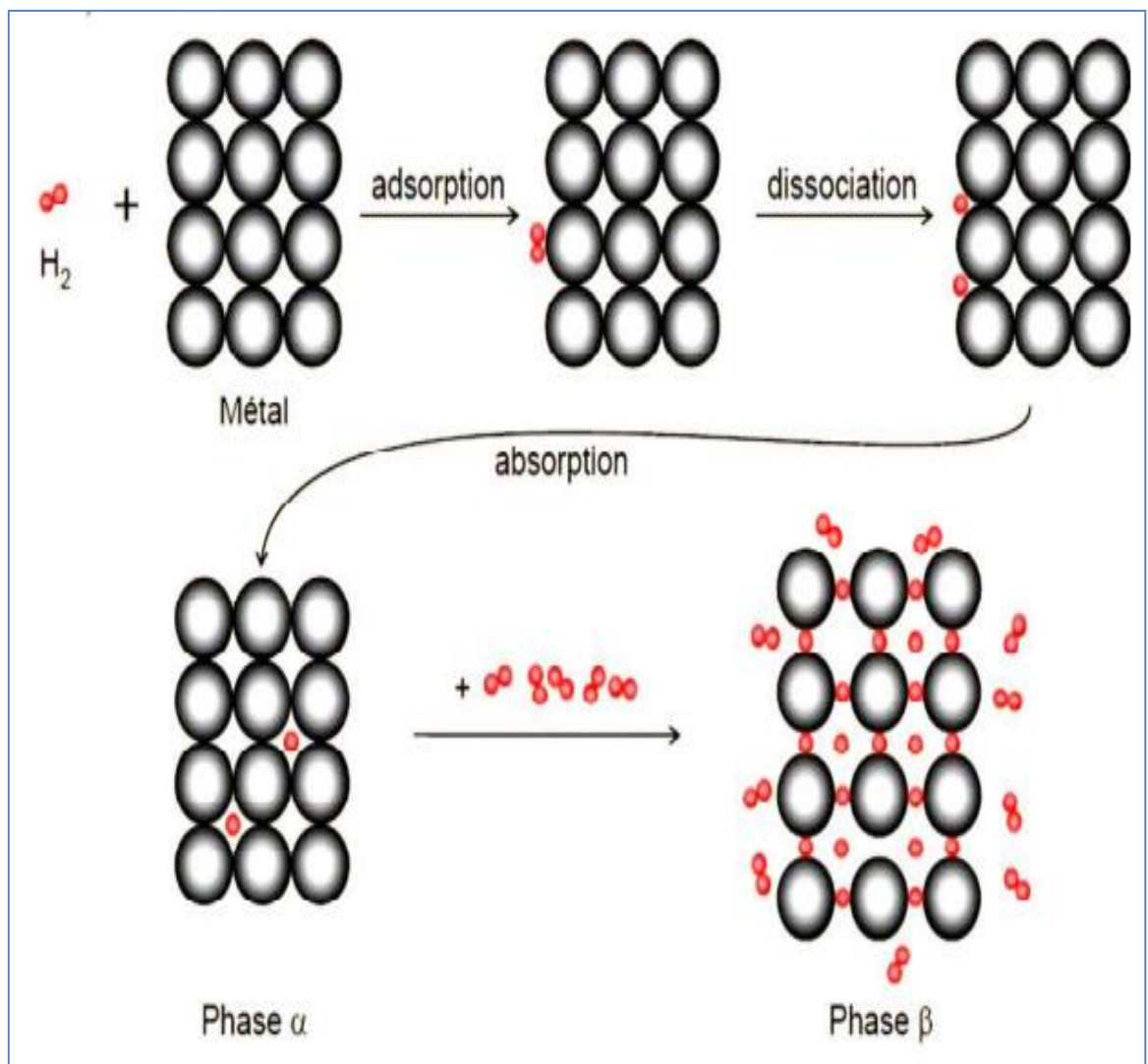
1 bar, de 14,49 kg/m<sup>3</sup> sous une pression de 200 et de 23,66 kg/m<sup>3</sup> sous une pression de 350 bars. L'intérêt de stocker l'hydrogène sous pression réside dans le fait que l'on possède une grande maîtrise de la technologie et que le remplissage est très rapide.

- **Sous forme liquide**

Ce mode de stockage est une solution très attrayante. Après l'hélium, l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier dans la mesure où sa température de liquéfaction est de -253°C. Cette technique est utilisée dans le domaine spatial. Cependant, le volume de stockage est plutôt faible et nécessite une grande dépense d'énergie. Comme tout liquide cryogénique, l'hydrogène est stocké dans des récipients à double isolations thermique dont le but est de limiter les échanges de chaleur. Bien que la capacité volumique soit 2 à 3 fois supérieure à celle de l'hydrogène gazeux, le volume total du réservoir (du fait des couches isolantes) est similaire à celui d'un réservoir sous pression contenant la même quantité d'hydrogène.

- **Sous forme solide :**



L'hydrogène peut être stocké dans les hydrures métalliques. En effet, l'hydrogène peut réagir de manière réversible avec certains métaux et alliages. Il réagit avec différents types de poudres métalliques ce qui crée un stockage solide à pression modérée. Il existe deux classes d'hydrures : les hydrures haute et basse température. L'hydrogène absorbé doit être pur pour ne pas détériorer les propriétés absorbantes du matériau. Les densités énergétiques sont faibles pour les hydrures à basse température et fortes pour les hydrures haute température. L'intérêt d'utiliser les hydrures métalliques pour stocker l'hydrogène est de minimiser le risque de manipuler de grandes quantités de cet élément très réactif [14].



**Figure 1.5** : Réaction de l'hydrogène avec le métal : dissociation de l'hydrogène en surface, diffusion dans le métal et formation de l'hydrure métallique [15].



## 1.5.1. Les avantages et les inconvénients de chaque forme :

	Avantages	Inconvénients
<p>Stockage gazeux</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Cette méthode est simple et mature technologiquement parlant, car elle a été utilisée depuis longtemps pour le stockage de gaz.</li> <li>❖ utilisée pour stocker de grandes quantités d'hydrogène à des pressions relativement élevées, ce qui la rend pratique pour les applications de transport.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ nécessite des réservoirs solides, lourds et coûteux qui peuvent résister à la pression de l'hydrogène stocké.</li> <li>❖ Les réservoirs doivent être inspectés régulièrement pour détecter toute fuite, et ils peuvent être dangereux s'ils ne sont pas correctement entretenus.</li> </ul>
<p>Stockage liquide</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ permet de stocker une plus grande quantité d'hydrogène dans un volume plus réduit par rapport au stockage sous forme comprimée.</li> <li>❖ est utile pour les applications qui nécessitent une grande quantité d'hydrogène, comme les piles à combustible de grande taille.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ La liquéfaction de l'hydrogène nécessite un processus énergivore et coûteux.</li> <li>❖ Les réservoirs doivent être maintenus à des températures très basses, ce qui nécessite une isolation efficace et une consommation d'énergie continue pour maintenir la température.</li> </ul>
<p>Stockage solide</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Les matériaux de stockage solides peuvent stocker une grande quantité d'hydrogène dans un petit volume, ce qui les rend pratiques pour les applications mobiles et les appareils portables.</li> <li>❖ Cette méthode est considérée comme sûre et facile à utiliser.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Les matériaux de stockage solides sont encore développement et leur coût est souvent élevé.</li> <li>❖ Le processus de libération d'hydrogène des matériaux solides peut être lent et nécessite souvent des conditions spécifiques de température et de pression pour être efficace.</li> </ul>

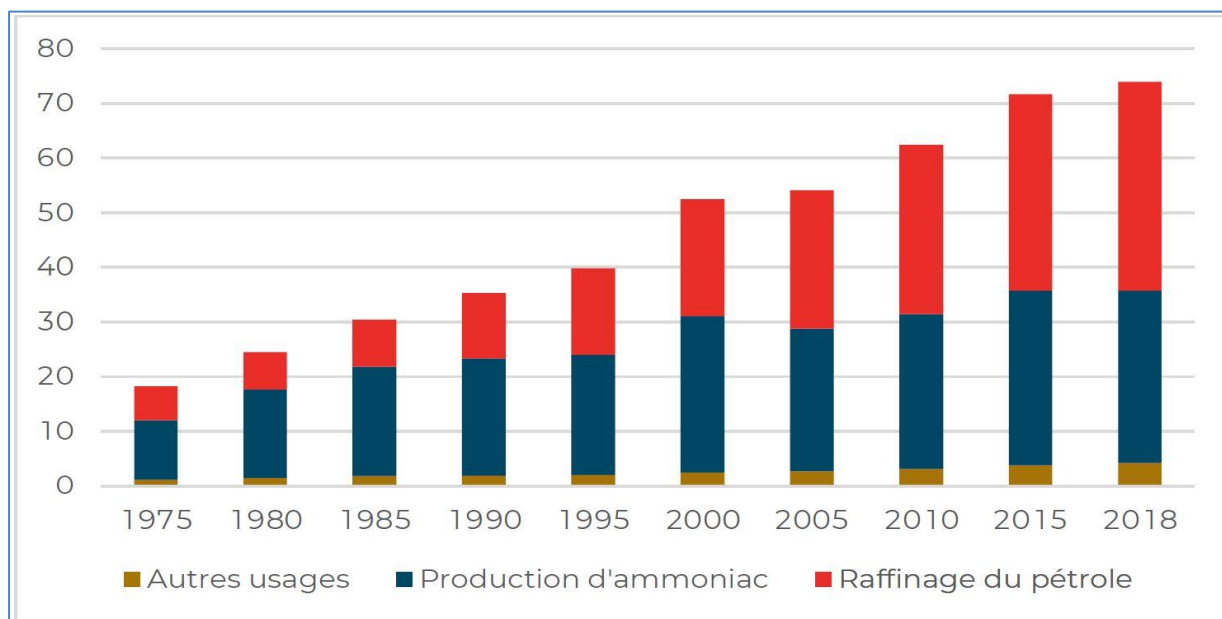
**Tableau 1.2** : Conditions d'hydratation de différents composés métalliques (Cm = capacité massique).

Composés métalliques	P (bar)	T (K)	Cm (%)	Hydrure formée
LaNi <sub>5</sub>	1,7	298	1,4	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>
ZrV <sub>2</sub>	1E-8	323	3,0	ZrV <sub>2</sub> H <sub>5,5</sub>
Tiffe	5	303	1,9	TiFeH <sub>2</sub>
Mg <sub>2</sub> Ni	1	555	3,6	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>
bcc	10	313	2,6	TiV <sub>2</sub> H <sub>4</sub>

### 1.6. Demande d'hydrogène

La fourniture d'hydrogène aux utilisateurs industriels est aujourd'hui une activité majeure dans le monde. La demande d'hydrogène, qui a plus que triplé depuis 1975, continue d'augmenter - presque entièrement alimentée par des combustibles fossiles, 6 % du gaz naturel mondial et 2 % du charbon mondial étant destinés à la production d'hydrogène.

En conséquence, la production d'hydrogène est responsable d'émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 830 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an, soit l'équivalent des émissions de CO<sub>2</sub> du Royaume-Uni et de l'Indonésie réunies [16].



**Figure 1.6** : Demande mondiale d'hydrogène pur, 1975-2018.

**1.7. Transport de l'hydrogène**

<p style="text-align: center;"><b>Transport par mer</b></p> 	<p>est une méthode prometteuse pour transporter de grandes quantités d'hydrogène liquide sur de longues distances. L'hydrogène liquide a une densité énergétique élevée et peut être utilisé comme carburant pour les véhicules à hydrogène ou comme matière première pour la production de produits chimiques.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Transport par route</b></p> 	<p>avec la mise à disposition de stations-service hydrogène, comme c'est le cas des stations de démonstration mises en service dans de nombreux pays, le transport d'hydrogène liquide par camion est le plus fréquemment utilisé. L'hydrogène est conservé dans des réservoirs cryogéniques cylindriques qui ressemblent à des camions-citernes qui transportent des liquides. Pour un poids cumulé de 40 t, ces véhicules peuvent transporter jusqu'à 3,5 t d'hydrogène liquide [17].</p>
<p style="text-align: center;"><b>Le transport de l'hydrogène par gazoducs</b></p> 	<p>est une méthode courante et efficace de transport de l'hydrogène sur de longues distances. Les gazoducs peuvent être utilisés pour transporter l'hydrogène sous forme de gaz comprimé à haute pression ou sous forme d'hydrogène liquide. peut être utilisé comme carburant pour les véhicules à hydrogène ou comme matière première pour la production de produits chimiques. Les gazoducs sont souvent utilisés pour transporter de grandes quantités d'hydrogène pour alimenter les usines de production d'hydrogène ou pour approvisionner les industries qui utilisent l'hydrogène comme matière première.</p>

## 1.8. Utilisation d'hydrogène

### 1.8.1. En site isolé

Pour l'alimentation électrique temporaire ou le fonctionnement continu d'installations distantes abritant des antennes de télécommunications, des capteurs de vidéosurveillance, de signalisation, d'éclairage et de mesure, utiliser un groupe électrogène propre et autonome [18].

### 1.8.2. Alimentation électrique de secours

Est une source d'énergie supplémentaire qui est utilisée pour fournir de l'électricité en cas de panne de courant ou d'interruption de l'alimentation électrique principale. Elle peut être utilisée dans une variété de situations, notamment dans les hôpitaux, les centres de données, les installations industrielles, les centres de communication et les foyers.

Les sources d'énergie de secours les plus courantes sont les groupes électrogènes, les onduleurs et les batteries de stockage.

### 1.8.3. Systèmes de traction à l'hydrogène

Les systèmes de traction à hydrogène prennent en charge tous les besoins de traction du véhicule et fournissent une puissance maximale qui, pour les modèles actuels, varie de 50 à 120 KVA.

Que ce soit pour un usage routier ou urbain, ces méthodes sont appropriées.

La charge (poids du véhicule) affecte leur efficacité. Il fonctionne mieux entre 10% et 30% du poids maximum, ce qui le rend idéal pour les cycles urbains.

Dans une voiture légère, la consommation d'hydrogène varie de 0,8 à 1,2 kg/100 km. Selon le type de véhicule et l'utilisation prévue, cela nécessite d'adopter 2 à 6 kg d'hydrogène.

Une option simple consiste à stocker le gaz sous pression. Actuellement, 200 forces armées utilisent cette technologie pour le gaz naturel et il y a environ 1,5 million de véhicules dans le monde.

### 1.8.4. Station pour véhicule à hydrogène

Est une infrastructure qui permet aux propriétaires de véhicules à hydrogène de faire le plein d'hydrogène. Les stations de véhicules à hydrogène sont similaires aux stations-service conventionnelles, mais elles sont équipées de compresseurs et de réservoirs d'hydrogène pour stocker et distribuer le carburant.

Les stations pour véhicules à hydrogène sont souvent situées à proximité des routes principales ou

des zones urbaines densément peuplées pour faciliter l'accès des propriétaires de véhicules à hydrogène. Ils peuvent être installés dans des zones industrielles ou commerciales, ou même dans des stations-service existantes. Les stations de véhicules à hydrogène peuvent également être alimentées en hydrogène à partir de gazoducs, de camion-citerne ou d'électrolyseurs sur site.



**Figure 1.7 :** station d'une pompe à essence en Algérie.

### 1.9. Les risques dans la production et l'utilisation de l'hydrogène

L'hydrogène est un vecteur énergétique prometteur pour les applications de transport et de stockage d'énergie. Cependant, la production et l'utilisation de l'hydrogène comportent des risques pour la sécurité qui doivent être pris en compte pour garantir une utilisation sûre et durable. Les risques liés à la production de l'hydrogène comprennent les risques chimiques et thermiques associés aux processus de production tels que la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ou la reforme de gaz naturel. Les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène comprennent les risques d'incendie et d'explosion associés à la combustion de l'hydrogène, ainsi que les risques d'asphyxie et d'intoxication par l'inhalation d'hydrogène.

La gestion des risques de l'hydrogène nécessite une approche holistique qui prend en compte tous les aspects de la production, de la distribution et de l'utilisation de l'hydrogène. Des mesures de sécurité spécifiques sont nécessaires pour minimiser les risques liés à la production et à l'utilisation de l'hydrogène, telles que des protocoles de sécurité clairs, des équipements de protection appropriés, des formations pour les travailleurs et des procédures d'urgence.

La sécurité de l'hydrogène est également étroitement liée à la réglementation et aux normes de sécurité applicables [19].



### 1.9.1. Risques d'explosion

L'hydrogène est un gaz très inflammable et peut former des mélanges explosifs avec l'air dans une large plage de concentrations. Des sources d'allumage telles que les étincelles, les flammes nues, la chaleur et les arcs électriques peuvent déclencher une explosion. Les risques d'explosion sont particulièrement élevés lors de la production, du transport et du stockage de l'hydrogène.



**Figure 1.8 :** explosion d'une station de la distribution d'hydrogène pour véhicules, en Norvège [20].

### 1.9.2. Risques d'incendie

Outre les risques d'explosion, l'hydrogène peut également provoquer des incendies. Les fuites d'hydrogène peuvent facilement s'enflammer et brûler rapidement. Les incendies peuvent être particulièrement dangereux dans des espaces confinés ou mal ventilés où l'accumulation d'hydrogène peut augmenter la probabilité d'une explosion, comme le montrent ses propriétés comparées à celles du méthane et de l'essence dans le tableau ci-après :

**Tableau 1.3:** Comparaison des propriétés d'inflammabilité entre l'hydrogène, le méthane et l'essence.

Propriétés		Hydrogène	Méthane	Essence
Plage d'inflammabilité dans l'air	(vol. %)	4 - 75	5,3 - 15	1,0 - 7,6
Plage de détonabilité dans l'air	(Vol. %)	13 - 65	6,3 - 13,5	1,1 - 3,3
Energie minimale d'inflammation dans l'air	(mJ)	0,02	0,29	0,24
Chaleur de combustion	(kJ/g)	120	50	44,5
Température d'auto-inflammation	(°C)	585	540	228 - 501
Température de flamme	(°C)	2 045	1 875	2 200
Energie théorique d'explosion	(kg TNT/m <sup>3</sup> <sub>gaz</sub> )	2,02	7,03	44,22
Coefficient de diffusion dans l'air	cm <sup>2</sup> /s	0,61	0,16	0,05

Source : Hydrogen, the energy carrier, TÜV Bayern Group

Comme cela a déjà été dit, le risque principal lié à l'hydrogène est celui de l'incendie ou de l'explosion (84 % des accidents recensés), du fait de son domaine d'inflammabilité très large (de 4 à 75 % dans l'air, plus large encore dans des atmosphères enrichies en oxygène ou en chlore), ainsi que de sa très faible énergie d'activation [21].

### 1.9.3. Risques de toxicité

L'hydrogène n'est pas toxique en soi, mais il peut devenir dangereux en remplaçant l'oxygène dans l'air. Lorsque l'hydrogène est stocké dans des espaces confinés, il peut s'accumuler et épuiser l'oxygène disponible, ce qui peut causer des étourdissements, des nausées, des vomissements et, dans les cas les plus graves, la mort par asphyxie. De plus, l'hydrogène peut réagir avec certains métaux pour former des composés toxiques tels que l'hydrazine, qui est un poison puissant.

### 1.9.4. Risques liés au stockage et au transport de l'hydrogène

Les risques associés au stockage et au transport de l'hydrogène sont principalement liés à la nature hautement inflammable de l'hydrogène. Les fuites d'hydrogène peuvent se produire lors du transfert de l'hydrogène d'un réservoir à l'autre, ou lorsqu'un réservoir est endommagé. Les fuites peuvent causer des incendies et des explosions, qui peuvent être particulièrement dangereux dans les zones confinées. Les risques de gelure et de suffocation sont également présents lors du stockage et du transport de l'hydrogène liquide.

### 1.9.5. Risques liés aux réactions chimiques avec d'autres substances

L'hydrogène est un gaz très réactif, et il peut réagir avec d'autres substances pour former des produits dangereux. Par exemple, lorsque de l'hydrogène réagit avec l'oxygène, de l'eau est produite. Cependant, si la réaction se produit dans des conditions non contrôlées, elle peut générer suffisamment de chaleur pour déclencher une explosion. De même, l'hydrogène peut réagir avec certains métaux pour former des hydrures métalliques, qui peuvent également être dangereux.

### 1.9.6. Risques liés aux comportements humains

Les risques liés aux comportements humains dans la production et l'utilisation de l'hydrogène comprennent des erreurs de conception et de maintenance des équipements, des erreurs d'exploitation, des accidents résultant de la négligence ou de l'inattention, des actes de sabotage ou de terrorisme, ainsi que des comportements inappropriés tels que la fumée, l'utilisation de téléphones portables, le non-respect des procédures de sécurité, etc. Il est important de mettre en

place des mesures de prévention et de sensibilisation pour minimiser ces risques.



**Figure 1.9** : Un incendie à la raffinerie du sud de Philadelphie le vendredi 21 janvier 2019, dû à une négligence à une légère fuite dans l'une des canalisations de transport d'hydrogène [22].

### 1.10. La viabilité à grande échelle de la production d'hydrogène

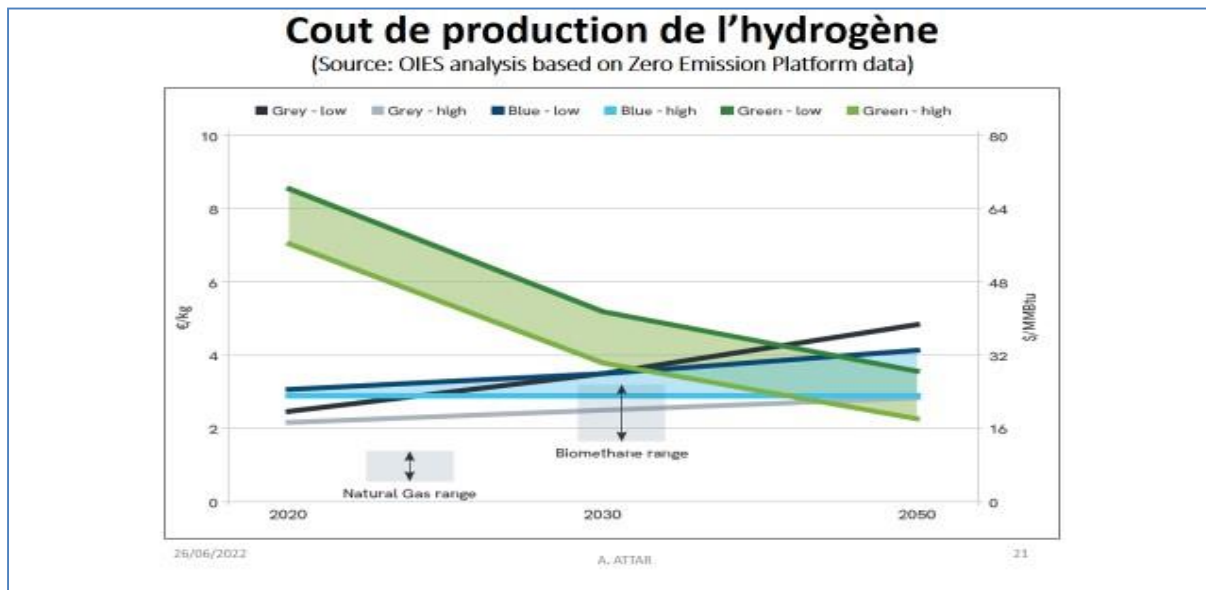
La viabilité à grande échelle de la production d'hydrogène dépend de plusieurs facteurs, tels que les coûts de production, l'approvisionnement en matières premières, l'efficacité énergétique, l'impact environnemental et la disponibilité des infrastructures nécessaires.

#### 1.10.1. Coûts de production

L'hydrogène peut être produit à partir de différentes sources, telles que l'électrolyse de l'eau, le reformage du méthane, la biomasse ou la production thermochimique. Le coût de production varie en fonction de la méthode utilisée. Actuellement, la production d'hydrogène est généralement coûteuse par rapport à d'autres sources d'énergie. Cependant, avec le développement de technologies plus efficaces et l'augmentation de l'échelle de production, les coûts devraient diminuer.

Les coûts de production de l'hydrogène varient en fonction de la méthode utilisée. Actuellement, le coût moyen de production d'hydrogène à partir de méthane (reformage du méthane) se situe entre 1 et 1,5 €/kg d'hydrogène. Le coût de production par électrolyse de l'eau est d'environ 2 à 6 €/kg, en fonction de la source d'électricité utilisée [23].





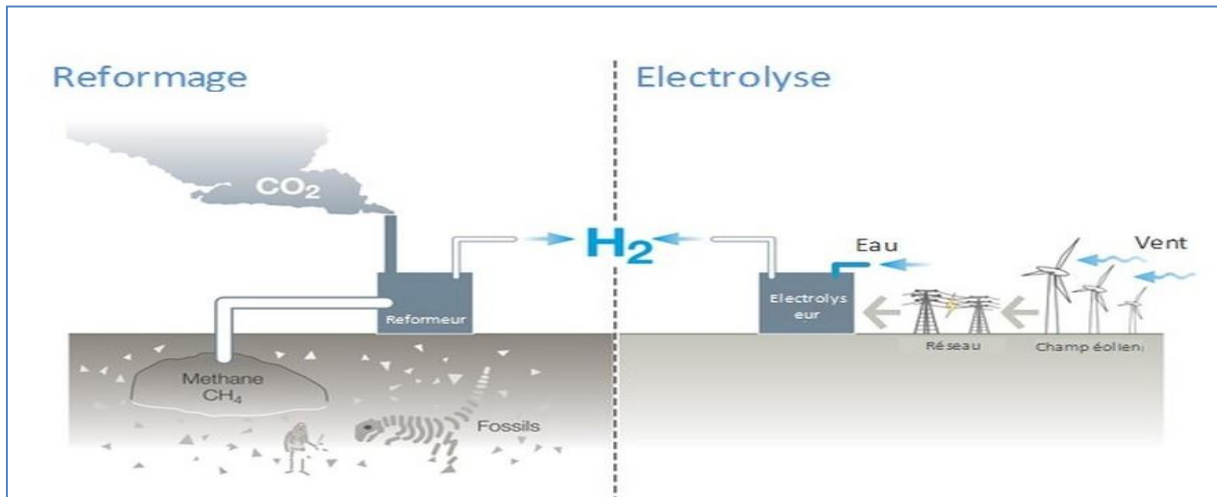
**Figure 1.10 : cout de production de l'hydrogène [24].**

L'hydrogène fait ainsi l'objet d'un maximum d'attention et d'espoir en tant que vecteur d'énergie du futur, pratiquement indispensable pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 en compagnie des autres énergies renouvelables. La demande dépendra certes des politiques de transition énergétique et leur succès dans les années à venir, et les 4 grands secteurs consommateurs d'hydrogène sont en premier l'industrie, le transport, le bâtiment (résidentiel), et l'énergie. Sa production va s'accélérer à compter de 2030 et sera multipliée par 2 ou 3 à l'horizon 2050 quel que soit le scénario de réduction des gaz à effet de serre. L'hydrogène vert devrait compter au moins pour 50% dans les quantités produites et consommées à l'horizon 2050 [24].

**1.10.2. Approvisionnement en matières premières :**

L'hydrogène peut être produit à partir de diverses sources, notamment l'eau, le gaz naturel et la biomasse. L'approvisionnement en matières premières nécessaires à la production d'hydrogène à grande échelle est essentiel. Par exemple, l'électrolyse de l'eau nécessite de l'eau propre et abondante, tandis que la production à partir de gaz naturel nécessite un approvisionnement stable en gaz. Des sources durables et renouvelables d'hydrogène, telles que l'électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables, sont préférables pour assurer la viabilité à long terme.

L'eau est une source abondante pour la production d'hydrogène par électrolyse. Environ 9 à 12 litres d'eau sont nécessaires pour produire 1 kilogramme d'hydrogène. La production d'hydrogène à partir de gaz naturel représente actuellement environ 95% de la production mondiale d'hydrogène [25].



**Figure 1.11** : la production d'hydrogène à partir du l'eau (électrolyse), et du gaz (vaporéformage) [25].

### 1.10.3. Efficacité énergétique

La production d'hydrogène nécessite de l'énergie, quel que soit le processus utilisé. L'efficacité énergétique de la production est donc un facteur important à considérer. Certains procédés de production d'hydrogène sont plus efficaces que d'autres. Par exemple, l'électrolyse de l'eau à haute température (SOEC) peut atteindre des efficacités plus élevées que l'électrolyse à basse température (PEM). L'amélioration de l'efficacité énergétique de la production contribue à réduire les coûts et l'empreinte environnementale de l'hydrogène [26].

L'efficacité énergétique de l'électrolyse de l'eau varie en fonction de la technologie utilisée. Les électrolyseurs à haute température (SOEC) peuvent atteindre des efficacités de conversion de l'énergie de l'ordre de 50 à 80%, tandis que les électrolyseurs à basse température (PEM) ont des efficacités de conversion allant de 70 à 80% [11].

### 1.10.4. Impact environnemental

L'hydrogène est souvent considéré comme une source d'énergie propre, car sa combustion ne produit que de l'eau. Cependant, la production d'hydrogène à grande échelle peut avoir un impact environnemental significatif, en particulier si elle dépend de sources d'énergie non renouvelables. Pour garantir la viabilité à grande échelle, il est important d'adopter des méthodes de production d'hydrogène respectueuses de l'environnement, telles que l'électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables.

#### . Les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la production d'hydrogène à partir de différentes sources d'énergie

- Hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables :

Électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables : Aucune émission directe de CO<sub>2</sub>.

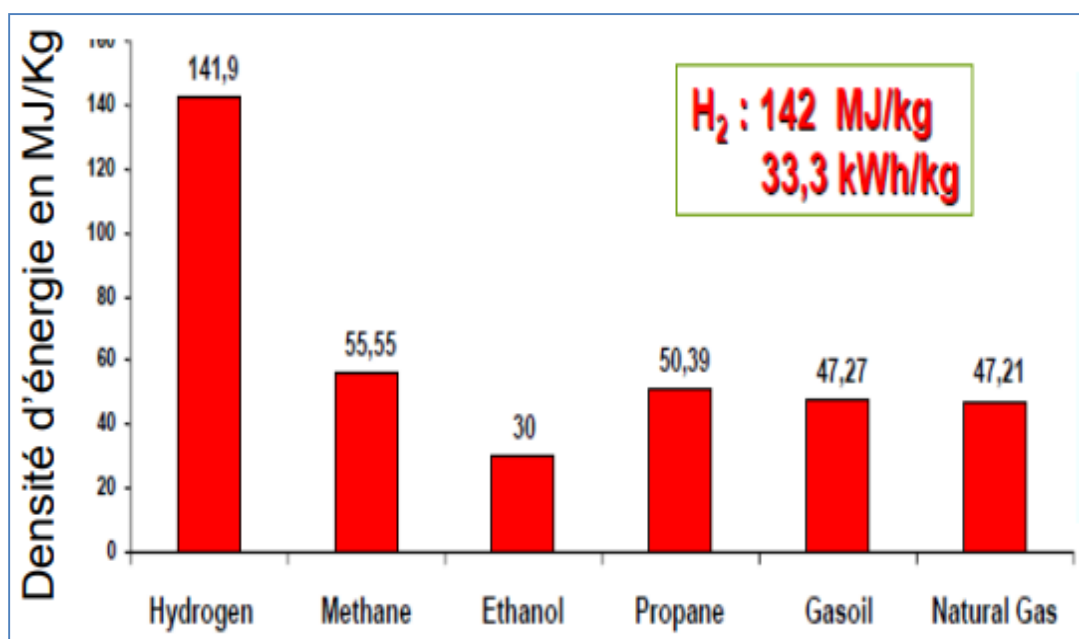
- **Hydrogène produit à partir de sources d'énergie non renouvelables :**

- 1) Reformage du méthane (gaz naturel) : Environ 9 à 12 kg de CO<sub>2</sub> sont émis pour chaque kilogramme d'hydrogène produit [27].
- 2) Gazéification du charbon : Environ 20 à 25 kg de CO<sub>2</sub> sont émis pour chaque kilogramme d'hydrogène produit.
- 3) Craquage du pétrole : Environ 14 à 16 kg de CO<sub>2</sub> sont émis pour chaque kilogramme d'hydrogène produit.

### 1.10.5. Infrastructure

Pour une production d'hydrogène à grande échelle, une infrastructure adéquate est essentielle. Cela comprend des installations de production, des réseaux de transport et de stockage, ainsi que des stations de ravitaillement pour les véhicules à hydrogène. La mise en place de cette infrastructure nécessite des investissements importants et une planification soignée. De plus, une coordination entre les différents acteurs, tels que les gouvernements, les industries et les fournisseurs d'énergie, est nécessaire pour développer efficacement l'infrastructure de l'hydrogène.

La densité énergétique de l'hydrogène est d'environ 33 kWh/kg, ce qui en fait un vecteur énergétique intéressant pour le stockage à grande échelle, [28]. Les réservoirs d'hydrogène comprimé peuvent stocker jusqu'à 5 à 10 kg d'hydrogène par mètre cube, tandis que les réservoirs d'hydrogène liquide peuvent stocker environ 8 à 10 fois plus d'hydrogène par volume.



**Figure 1.12:** La densité énergétique de l'hydrogène par rapport aux autres gaz (liquides) [29].

### 1.11. Conclusion

Nous avons exploré les différentes méthodes de production d'hydrogène, en mettant l'accent sur leurs avantages, leurs inconvénients et leur viabilité à grande échelle.

Nous avons constaté que la production d'hydrogène est essentielle pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui. L'hydrogène présente de nombreux avantages en tant que vecteur énergétique, notamment sa grande capacité de stockage et sa combustion propre, ne produisant que de l'eau comme sous-produit.

Nous avons examiné les différentes sources d'approvisionnement en hydrogène, telles que les combustibles fossiles, l'électrolyse de l'eau et les sources renouvelables. Bien que l'utilisation des combustibles fossiles reste une méthode courante de production d'hydrogène, il est crucial de se tourner vers des sources plus durables afin de réduire notre dépendance aux énergies non renouvelables et de minimiser les émissions de gaz à effet de serre.

L'électrolyse de l'eau et les sources renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, se révèlent être des alternatives prometteuses pour la production d'hydrogène. Cependant, des défis techniques et économiques doivent être relevés pour rendre ces méthodes plus compétitives et largement adoptées.

En conclusion, la production d'hydrogène est un domaine en évolution constante, et il est essentiel de poursuivre les recherches et les développements technologiques pour améliorer l'efficacité et la durabilité de cette production. L'hydrogène jouera un rôle crucial dans la transition vers une économie à faible émission de carbone et dans la réalisation des objectifs de développement durable à l'échelle mondiale.

## Chapitre 02

# TECHNIQUE DE PRODUCTION D'HYDROGENE A BASE D'ENERGIES RENOUVELABLES

---

### 2.1. Introduction :

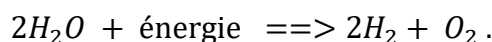
L'hydrogène est de plus en plus considéré comme une solution clé pour la transition énergétique vers un avenir durable et dé carboné. Une méthode de production d'hydrogène qui gagne en popularité repose sur l'utilisation d'énergies renouvelables. Cette approche offre la possibilité de générer de l'hydrogène de manière propre, sans émissions de gaz à effet de serre, en utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse. La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables est basée sur différentes techniques. L'une des méthodes les plus couramment utilisées est l'électrolyse de l'eau, qui consiste à diviser l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'un courant électrique. Lorsque cette électricité provient de sources renouvelables telles que les panneaux solaires ou les éoliennes, l'hydrogène produit est totalement exempt de carbone et contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Une autre méthode de production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables est le reformage du bio méthane. Le bio méthane est produit par la fermentation de la biomasse organique, et il peut être transformé en hydrogène grâce à un processus de reformage catalytique. Cette approche utilise des sources de biomasse telles que les déchets agricoles ou alimentaires, offrant ainsi une solution de production d'hydrogène renouvelable et durable. La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables présente de nombreux avantages. Elle permet de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre et de contribuer à la lutte contre le changement climatique. De plus, l'hydrogène produit peut être utilisé dans une grande variété de secteurs, notamment les transports, l'industrie et le stockage d'énergie, offrant ainsi une alternative propre aux combustibles fossiles. Cependant, certains défis subsistent, tels que le coût élevé de la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables et la nécessité de développer des infrastructures adaptées. Néanmoins, des progrès significatifs sont réalisés dans la recherche et le développement de technologies plus efficaces et économiquement viables pour la production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables.

## 2.2. Techniques de production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables:

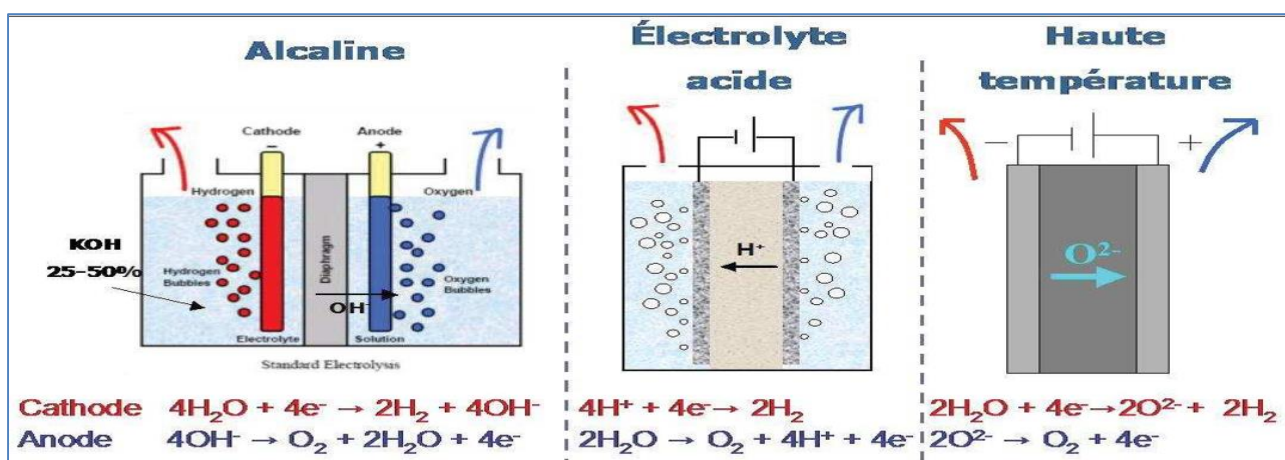
La production mondiale d'hydrogène est d'environ 55 millions de tonnes par année [30], L'hydrogène peut être produit à partir de sources renouvelables, telles que la biomasse par des Procédés, qui comprennent: la gazéification à la vapeur, la pyrolyse et la fermentation microbienne. Cependant, plus de recherche et de développement est nécessaire car les rendements sont faibles pour tous les processus ci-dessus. L'hydrogène peut également être produit à partir de l'eau en utilisant une variété de sources d'énergie telles que l'énergie éolienne, solaire, géothermique, hydroélectrique et nucléaire. Actuellement, la principale méthode de production d'hydrogène est la conversion du gaz naturel par le procédé de reformage à la vapeur. Environ 96% de l'hydrogène produit à ce jour provient de la conversion des combustibles fossiles. À court et à moyen terme, les combustibles fossiles jouent un rôle majeur dans la production d'hydrogène en raison de leur disponibilité, de leur coût relativement faible et de l'infrastructure existante pour la livraison et la distribution [31].

## 2.3. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau :

La décomposition de l'eau par électrolyse se produit selon la réaction suivante :



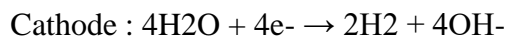
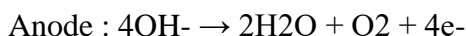
Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) reliées à un générateur de courant continu, et séparées par un électrolyte (milieu conducteur ionique). Cet électrolyte peut être soit une solution aqueuse acide ou basique, soit une membrane polymère échangeuse de protons, soit une membrane céramique conductrice d'ions. Suivant le cas, les demi-équations électrochimiques qui se déroulent à chaque électrode sont différentes. Chaque procédé a ses avantages et inconvénients et peut être utilisé en fonction des applications désirées.



**Figure 2.1** : Schéma des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau [32].

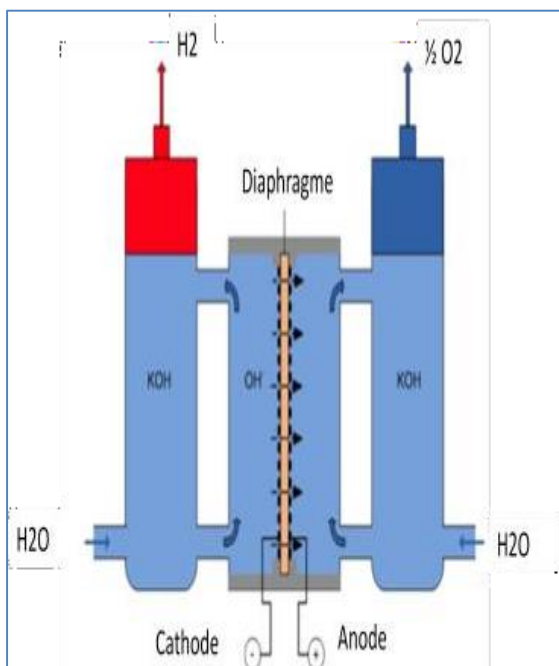
### 2.3.1. Electrolyseur alcaline

La technologie alcaline est actuellement développée à l'échelle industrielle pour la production massive d'hydrogène. En France, depuis la fin des années 1970, des unités de plusieurs mégawatts ont été construites pour diverses applications [33]. Ce type d'électrolyseur utilise généralement une solution concentrée d'hydroxyde de potassium (KOH). L'ion OH<sup>-</sup> est utilisé pour le transfert de charges entre les électrodes où se produisent les réactions suivantes :



Pour permettre la séparation des gaz hydrogène et oxygène, les deux électrodes sont séparées par un diaphragme (ou une membrane). Le diaphragme doit permettre le passage de l'eau et des ions, mais pas des gaz.

Étant donné que l'hydroxyde de potassium est une base forte, il corrode de nombreux matériaux. Par conséquent, les électrodes sont généralement en nickel ou en cobalt [34].



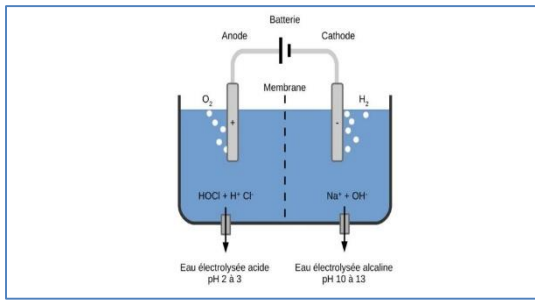
**Figure 2.2 :** Electrolyseur alcalin.



**Figure 2.3 :** Electrolyseur alcalin standard [36].

Les gaz produits contiennent des impuretés qui proviennent de la solution alcaline, de l'oxygène et de l'eau, et doivent donc être traités : l'hydrogène extrait du mélange à la sortie de l'électrolyseur est d'abord lavé pour éliminer les traces de KOH, puis purifié pour éliminer les traces d'oxygène, et enfin séché. Au final, le degré de pureté obtenu est supérieur à 99% [36].

**Tableau 2.1 : Synthèse sur les électrolyseurs alcalins**

	<b>Anode : <math>4HO^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-</math></b>
	<b>Cathode : <math>4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4HO^-</math></b>
	<b>Electrolyte : 30% de KOH</b>
	<b>Pression : 1 à 50 bars</b>
	<b>Température : 60 à 90°C</b>

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Technologie mature	Electrolyte liquide corrosif KOH. Risque important de fuite de KOH
Durée de vie importante (50 000 à 60 000 heures)	Pression de fonctionnement (50 bar maximum) plus faible que pour le PEM
Gaz de haute pureté	Faible intolérance aux impuretés dans l'eau
Catalyseurs à base de nickel (coût faible par rapport au PEM)	Par rapport à l'électrolyseur PEM, plage de fonctionnement réduite (20 à 110%) et temps de réponse important pour le démarrage à froid

### 2.3.2. Electrolyseur à haute température

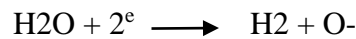
La technologie SOEC (Solid Oxide Electrolyzer Cell), bien qu'elle soit actuellement à un stade moins avancé, vise à atteindre des rendements élevés dans la conversion de l'électricité en hydrogène. La société allemande Sunfire, basée à Dresde, est en cours de construction d'un prototype appelé "Power-to-Liquides" qui intègre un électrolyseur SOEC. Ce dernier devrait être opérationnel fin 2016, mais sa commercialisation ne devrait probablement pas se concrétiser avant 2025 voire 2030 [37].

Le principe de cette technologie repose sur la réalisation de l'électrolyse à haute température (entre 700 et 800°C), ce qui permet de réduire considérablement la consommation d'électricité. Bien

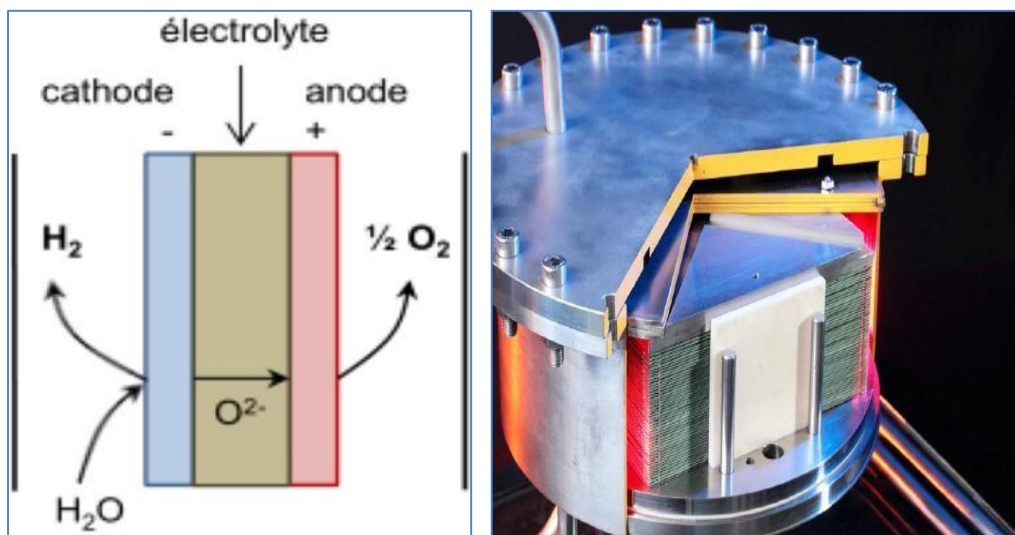
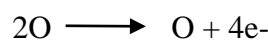


qu'un apport de chaleur soit nécessaire, la majeure partie de cette chaleur peut être récupérée à partir des gaz produits pendant le processus. Cependant, les températures élevées exigent l'utilisation de matériaux spécifiques, ce qui explique pourquoi l'électrolyte et les électrodes sont conçus à base de céramiques.

Dans ce processus, la vapeur d'eau est introduite à la cathode, où l'hydrogène est produit grâce à la réduction des anions superoxydes  $O_2^-$ . L'équation de la réaction à la cathode est la suivante :



Ensuite, les anions  $O^-$  migrent à travers la membrane électrolytique vers l'anode, où ils se déchargent pour former de l'oxygène. L'équation de la réaction à l'anode est la suivante :



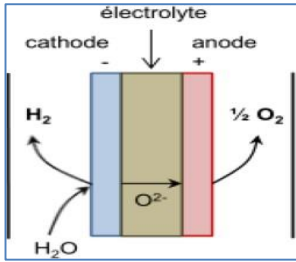
**Figure 2.4 :** Principe d'une cellule d'électrolyse SOEC [38].

Une caractéristique distinctive de l'électrolyseur SOEC réside dans sa réversibilité, ce qui lui permet de fonctionner également en tant que "pile à combustible". Ainsi, le même système peut à la fois convertir l'électricité en hydrogène et, à d'autres moments, produire de l'électricité à partir d'hydrogène.

En termes de performances, le rendement de conversion de l'électricité en hydrogène pourrait atteindre 100% (PCS), mais si l'on tient compte de la chaleur fournie, le rendement de conversion de l'électricité et de la chaleur en hydrogène serait d'environ 85% PCS [39].

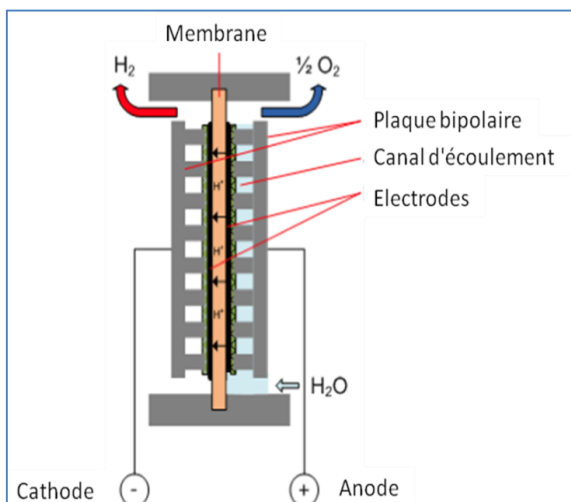
La durée de vie de l'électrolyseur est particulièrement liée à la fragilité des céramiques, ce qui constitue un défi majeur (le cyclage thermique dans le cas d'une utilisation intermittente sans système de maintien de la température étant un facteur aggravant).

**Tableau 2.2 :** Synthèse sur les électrolyseurs SOEC.

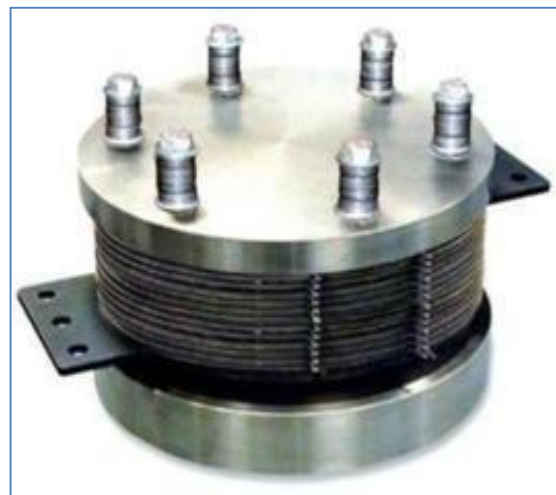
	$CATHODE: H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$
	$Anode: 2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$
	Electrolyte et électrodes en céramique
	Pression : 5 à 30 bar
	Température : 600 à 800 °C
<b>ADVANTAGES</b>	<b>INCONVENIENT</b>
Rendement important	Fragilité des matériaux
	Nécessité d'un apport de chaleur important
Gaz de haute pureté	Temps de démarrage à froid long
	Pression de fonctionnement limitée
Réversibilité possible : fonctionnement en mode pile à combustible	Durée de vie limitée de la céramique
	Technologies en cours de développement

**2.3.3. Electrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane)**

Le développement des électrolyseurs PEM est plus récent et ils sont actuellement en pleine croissance. Dans une cellule d'électrolyseur PEM, les deux électrodes (anode et cathode) sont séparées par un film polymère conducteur protonique (membrane) comme le montre la Figure 8

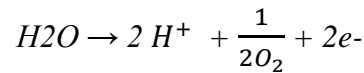


**Figure 2.5 :** Stack d'électrolyseur PEM [40]

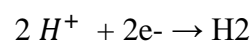


**Figure 2.6 :** Mono cellule Electrolyseur PEM.

Dans le processus de l'électrolyseur à membrane à échange de protons (PEM), deux électrodes métalliques microporeuses sont déposées sur les deux faces de la membrane. L'ensemble est immergé dans de l'eau déminéralisée. Lorsqu'une différence de potentiel électrique suffisante est appliquée entre ces deux électrodes, l'électrolyse se produit. À l'anode, l'eau est oxydée selon la réaction :



Les protons migrent à travers la membrane sous l'effet du champ électrique et sont réduits à la cathode selon la réaction :



La membrane est constituée d'un polymère, tandis que les électrodes sont recouvertes de catalyseurs composés de métaux rares tels que le platine ou l'iridium [41]. Ces deux particularités rendent cette solution actuellement plus coûteuse, mais des gains importants de performances sont attendus, notamment une augmentation de la densité de courant, ce qui permettra d'augmenter la capacité des électrolyseurs avec une quantité identique de matériaux. En d'autres termes, la priorité des recherches actuelles n'est pas forcément de remplacer ces matériaux, car cela aurait un impact négatif sur le rendement, mais plutôt de les utiliser le moins possible [42].

La technologie PEM présente l'avantage de pouvoir fonctionner sur une large plage, allant d'un minimum technique de 5% jusqu'à une surcapacité ponctuelle de 110 à 130% [23]. Les réponses dynamiques montrent également que la technologie PEM est mieux adaptée que la technologie alcaline aux variations rapides de charge [43]. Enfin, l'électrolyseur PEM présente un temps de démarrage à froid plus court que son concurrent alcalin.

**Tableau 2.3 :** Synthèse sur les électrolyseurs PEM

	$\text{Anode: } H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$
	$\text{Cathode: } 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
	Spécificité : membrane solid échangeuse d'électron
	Pression : 1 à 80 bar
	Température : 55 à 80°C

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénient</b>
Gaz de haute pureté	Cher (catalyseur à base de métaux nobles (Pt, Ir) et membrane en polymère)
Fonctionnement sous pression	Faible Durée de vie
Faible temps de réponse eau démarrage à froid	Faible tolérance aux impuretés dans l'eau
Large plage de fonctionnement (5 à 130%)	Technologie « jeune »
Fort potentiel d'évolution	

### 2.3.4. Applications de l'électrolyse de l'eau

Une méthode efficace pour obtenir de l'hydrogène propre et durable.

- **L'électrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. Les technologies en concurrence sont de deux natures, l'une porte sur le type d'électrolyte et l'autre sur le type de structure (monopolaire ou bipolaire). Il existe trois types d'électrolytes : l'alcalin, le PEM (Proton Exchange Membrane) et l'électrolyse à haute température par SOEC (Solid Oxid Electrolyser Cell) [44].

- **Système de stockage d'énergie renouvelable**

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composant utilisés dans la majorité des cas, [45]. Les caractéristiques techniques des systèmes de stockage peuvent entraîner d'importantes contraintes de fonctionnement et réduire leur domaine d'utilisation. Le couplage ou l'hybridation de technologies ayant des propriétés complémentaires est dans certains cas nécessaires pour contourner les difficultés liées à l'utilisation d'un dispositif unique [46].

- **Mobilité durable**

La mobilité durable fait référence à l'utilisation de modes de transport et de systèmes de mobilité qui réduisent les impacts environnementaux, sociaux et économiques négatifs associés aux déplacements.

**Tableau 2.4:** les aspects clés de la mobilité durable.

	<p><b>Transports en commun :</b> Encourager l'utilisation des transports en commun, tels que les bus, les tramways, les métros et les trains, qui permettent de transporter un grand nombre de personnes tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Les systèmes de transports en commun doivent être accessibles, fiables, confortables et abordables pour encourager leur utilisation.</p>
	<p><b>Véhicules électriques et à faibles émissions :</b> Encourager l'adoption de véhicules électriques (VE) et d'autres véhicules à faibles émissions, tels que les véhicules hybrides et les véhicules fonctionnant à l'hydrogène. Les VE contribuent à réduire les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, surtout s'ils sont alimentés par des sources d'énergie renouvelable.</p>
	<p><b>Covoiturage et partage de véhicules :</b> Encourager le covoiturage et le partage de véhicules, tels que les services de covoiturage entre particuliers, les services de location de voitures et les systèmes d'autopartage. Cela permet de réduire le nombre de véhicules sur les routes et de maximiser l'utilisation des véhicules existants.</p>

#### 2.4. Production d'hydrogène par la Biomasse

La production d'hydrogène à partir de la biomasse, également connue sous le nom d'hydrogène renouvelable, est un domaine de recherche et de développement en plein essor. Elle vise à produire de l'hydrogène, un vecteur énergétique propre, à partir de sources biologiques telles que la biomasse

ligno-cellulosique, les déchets agricoles, les résidus forestiers, les algues et d'autres matières organiques d'origine végétale.

### 2.4.1. Conversion de la biomasse en hydrogène

Il existe plusieurs méthodes pour produire de l'hydrogène à partir de la biomasse. Voici quelques-unes des techniques couramment utilisées que nous avons trouvées à partir de notre recherche.

- **Gazéification de la biomasse**

Ce processus consiste à chauffer la biomasse à haute température en l'absence d'oxygène pour produire un mélange gazeux appelé gaz de synthèse. Le gaz de synthèse, principalement composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène, peut ensuite être purifié pour obtenir de l'hydrogène [47].

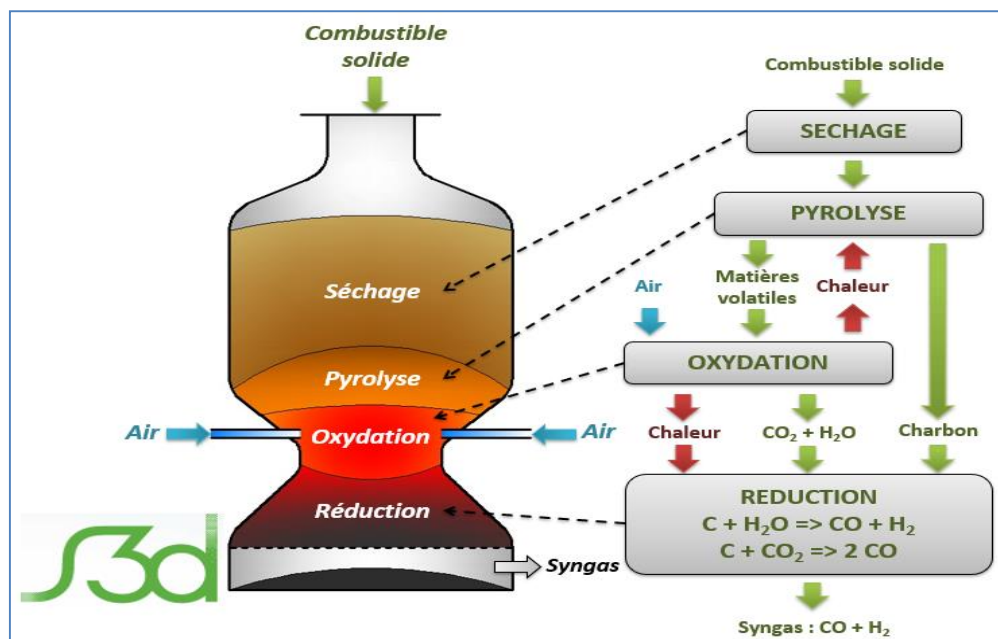


Figure 2.7 : mécanismes de la gazéification [48].

✓ On distingue 4 grandes étapes dans le processus gazéification: [49].

**Une phase de séchage** intégrée ou non au réacteur de gazéification,

**Une phase de pyrolyse** qui produit, sous l'effet de la chaleur et en absence d'agent oxydant, des matières volatiles ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$  et hydrocarbures gazeux appelés « goudrons ») et du charbon,

**Une phase de combustion**, parfois appelée oxydation partielle, qui par injection d'un agent oxydant (air,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$ ) oxyde les matières volatiles produites lors de la phase de pyrolyse et parfois une partie du charbon. Cette phase fournit la chaleur nécessaire à l'ensemble du procédé et



détruit la fraction de goudrons.

**Une phase de gazéification** proprement dite, appelée également réduction, étroitement liée à la phase de combustion qui par des réactions thermochimiques complexes convertit le charbon (carbone) en un gaz combustible riche en CO et H<sub>2</sub> appelé « gaz de synthèse » ou « syngas » en anglais.

La différence clé entre la pyrolyse et la gazéification est que la pyrolyse se fait en l'absence d'air tandis que la gazéification se fait en présence d'air.

- **Pyrolyse de la biomasse :**

La pyrolyse implique également le chauffage de la biomasse, mais cette fois-ci en absence partielle d'oxygène. Cela conduit à la décomposition thermique de la biomasse, produisant un mélange d'huiles pyrolytiques, de gaz et de charbon. Le gaz peut être séparé et purifié pour récupérer l'hydrogène.

Lorsque la biomasse est soumise à des températures élevées (généralement entre 400 et 800 degrés Celsius) en l'absence d'oxygène, elle subit une décomposition thermique appelée pyrolyse. Ce processus conduit à la production de trois principaux produits : le bio char (charbon biologique), les gaz de pyrolyse et les bios huiles [50].

L'hydrogène est principalement présent dans les gaz de pyrolyse générés pendant le processus de pyrolyse. Ces gaz de pyrolyse contiennent généralement une combinaison d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres composés organiques volatils. Pour obtenir de l'hydrogène pur à partir de ces gaz de pyrolyse, une étape supplémentaire de séparation et de purification est nécessaire.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour séparer l'hydrogène des autres composés contenus dans les gaz de pyrolyse. Par exemple, on peut utiliser des procédés tels que la réforme du gaz, la réaction de l'eau-gaz, la séparation par membranes ou la sorption chimique. Ces techniques permettent d'obtenir de l'hydrogène pur qui peut ensuite être utilisé comme combustible ou comme matière première dans diverses applications industrielles.

#### 2.4.2. Avantages et défis de la production d'hydrogène à partir de la biomasse

- **Avantages de la production d'hydrogène à partir de la biomasse :**

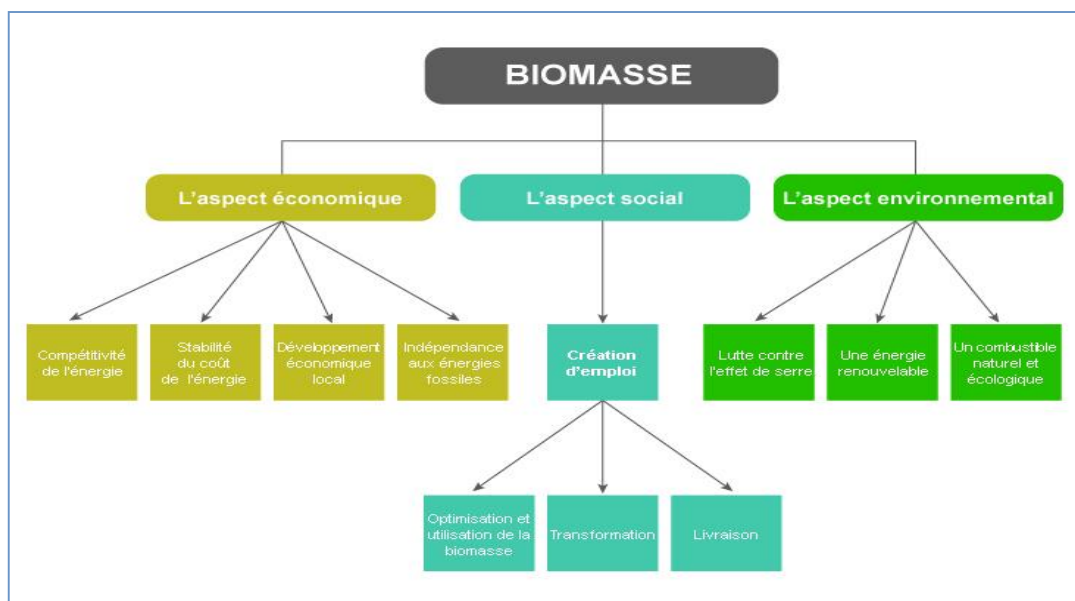
1) Ressource renouvelable : La biomasse est une source d'énergie renouvelable, provenant de matières organiques telles que les déchets agricoles, les cultures énergétiques et les résidus forestiers. Elle peut être produite de manière durable, ce qui réduit la dépendance aux combustibles

fossiles.

2) Réduction des émissions de gaz à effet de serre : La production d'hydrogène à partir de la biomasse peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Lorsque l'hydrogène est produit à partir de la biomasse par le biais de la gazéification, les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont généralement capturées et stockées, ce qui permet d'éviter leur rejet dans l'atmosphère.

3) Utilisation polyvalente de l'hydrogène : L'hydrogène produit à partir de la biomasse peut être utilisé comme source d'énergie dans divers secteurs, tels que les transports, l'industrie et les systèmes énergétiques. Il peut être utilisé dans les piles à combustible pour produire de l'électricité sans émissions nocives, et il peut également être utilisé comme combustible dans les véhicules à hydrogène.

4) Valorisation des déchets : La production d'hydrogène à partir de la biomasse permet de valoriser les déchets organiques qui seraient autrement éliminés de manière peu durable. Cela offre une opportunité de réduire les déchets et de les transformer en une source d'énergie utile.



**Figure 2.8** : Les avantages de la biomasse [51].

- **Défis de la production d'hydrogène à partir de la biomasse :**

1) Disponibilité limitée de la biomasse : La disponibilité de la biomasse peut être limitée dans certaines régions. De plus, il peut y avoir une concurrence entre l'utilisation de la biomasse pour la production d'hydrogène et son utilisation dans d'autres secteurs, tels que l'agriculture ou la production alimentaire.



- 2) Coûts de production élevés : La production d'hydrogène à partir de la biomasse peut être plus coûteuse que d'autres méthodes de production d'hydrogène, en raison des investissements nécessaires pour les installations de gazéification et de purification. Cela peut rendre le prix de l'hydrogène produit à partir de la biomasse moins compétitif sur le marché.
- 3) Impact sur l'utilisation des terres : La production de biomasse nécessite des terres pour cultiver les cultures énergétiques. Cela peut soulever des préoccupations quant à l'utilisation des terres agricoles et forestières, ainsi qu'à la concurrence entre l'utilisation des terres pour la production alimentaire et la production d'énergie.
- 4) Complexité de la technologie : La production d'hydrogène à partir de la biomasse nécessite des technologies avancées telles que la gazéification et la purification du gaz. Ces processus peuvent être complexes et nécessiter une expertise technique pour leur mise en œuvre efficace.

#### 2.4.3. Biomasse et production d'hydrogène :

L'hydrogène présente de nombreux avantages environnementaux. En plus de sa consommation déjà élevée, qui nécessite des méthodes de production respectueuses de l'environnement, il peut être utilisé comme carburant pour la mobilité et pour décarbonner plusieurs secteurs industriels, tels que le ciment et l'acier, ainsi que pour stabiliser les réseaux électriques. Bien que l'électrolyse de l'eau à l'aide d'énergies renouvelables soit une option attrayante, elle rencontre des difficultés qui remettent en question sa viabilité. En revanche, la pyrogazéification émerge comme un espoir pour la transition énergétique, car elle permet la valorisation de matières inexploitées et absorbe du CO<sub>2</sub>.

**Hafner Energie**, avec son procédé HYNOCa, se positionne dans ce domaine. Le procédé HYNOCa développé par **Hafner Energie** vise à produire de l'hydrogène à partir de biomasse en utilisant la thermolyse, suivie de la gazéification (également appelée "vapocraquage"). L'entreprise a connu une introduction réussie en bourse au début de l'année, et un démonstrateur de leurs modules est actuellement en cours d'installation à Strasbourg. Ils promettent des coûts de production d'hydrogène compétitifs par rapport à la vaporéformage du méthane, avec un objectif de descendre à 1,5 €/kg H<sub>2</sub>, et un processus carbone-négatif qui permet de capturer l'équivalent de 12 kg de CO<sub>2</sub> par kg d'H<sub>2</sub> produit [52].

L'avenir de l'hydrogène est prometteur, car il est considéré comme un vecteur énergétique clé pour la transition vers une économie à faible émission de carbone. L'hydrogène peut être produit à partir de diverses sources, y compris la biomasse, les énergies renouvelables et même l'électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité renouvelable. Son utilisation dans les transports, les systèmes de stockage d'énergie et les applications industrielles peut contribuer à réduire les émissions de carbone et à promouvoir une utilisation plus durable de l'énergie.

Cependant, il existe encore des défis à relever pour une adoption plus large de l'hydrogène. Certains de ces défis comprennent les coûts de production élevés, les infrastructures de distribution limitées, le stockage sûr et efficace de l'hydrogène, ainsi que des considérations liées à la sécurité. De plus, des avancées technologiques et des investissements supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'efficacité des processus de production et réduire les coûts.

Néanmoins, de nombreuses initiatives et projets de recherche sont en cours pour surmonter ces défis et exploiter pleinement le potentiel de l'hydrogène en tant que solution énergétique propre et durable. L'hydrogène devrait jouer un rôle de plus en plus important dans les années à venir, contribuant à la décarbonation des secteurs énergétiques et à la transition vers une économie basée sur les énergies renouvelables.

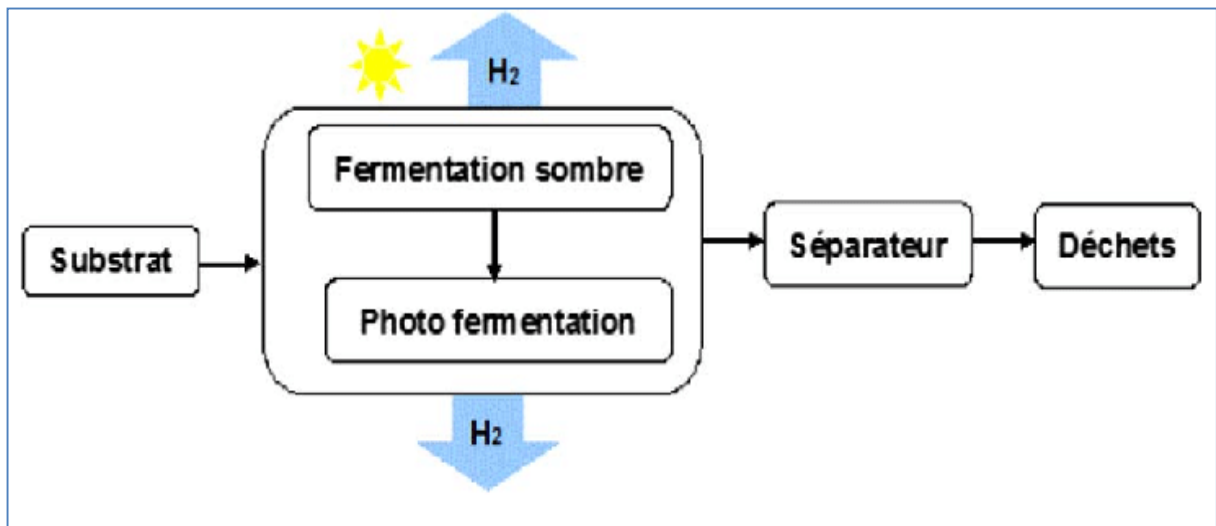
#### 2.4.4. Nouvelles technologies de conversion de la biomasse en hydrogène :

La conversion de la biomasse en hydrogène est un domaine de recherche en constante évolution, visant à développer des technologies plus efficaces et économiquement viables. Voici quelques innovations récentes qui ont contribué à améliorer ces aspects :

**La pyrolyse :** La pyrolyse est un processus de conversion thermochimique de la biomasse en absence d'oxygène. Les avancées dans cette technologie ont permis d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts de production de l'hydrogène. Des catalyseurs innovants et des conditions de réaction optimisées ont été développés pour maximiser la quantité d'hydrogène produite lors de la pyrolyse.

**La gazéification :** La gazéification est un processus qui convertit la biomasse en un mélange de gaz de synthèse (syngaz) contenant de l'hydrogène, du monoxyde de carbone et du méthane. Les progrès récents dans les technologies de gazéification, tels que l'utilisation de lits fluidisés, de réacteurs à plasma et de catalyseurs améliorés, ont permis d'augmenter le rendement en hydrogène et de réduire les coûts de production.

**La fermentation :** Certaines formes de biomasse, telles que les déchets agricoles et forestiers, peuvent être fermentées par des microorganismes pour produire de l'hydrogène. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité des microorganismes utilisés, ainsi que les conditions de fermentation, afin d'augmenter le rendement en hydrogène et de réduire les coûts associés.



**Figure 2.9 :** Schéma de processus de fermentation séquentielle pour la production d'hydrogène à partir de la biomasse [53].

**L'électrolyse biologique :** L'électrolyse biologique est un processus qui utilise des microorganismes électro actifs pour convertir la biomasse en hydrogène directement à partir de l'eau. Des progrès significatifs ont été réalisés dans la compréhension des mécanismes biologiques impliqués et dans le développement de systèmes électrochimiques plus efficaces, ce qui rend cette technologie plus viable économiquement.

**Exemple :** Le nouveau système, élaboré par Brown & Caldwell, est composé de réservoirs dans lesquels transitent mille litres d'eaux usées par jour. Les bactéries qui s'y trouvent transforment la matière organique en électricité : elles absorbent les sucres et rejettent des protons et des électrons. En appliquant ensuite une tension légèrement supérieure à l'aide d'électrodes sans métaux précieux (anode de carbone et cathode d'acier), de l'hydrogène est produit électro chimiquement au niveau de la cathode. « L'hydrogène [...] sera ventilé, sauf une petite quantité qui alimentera une pile à combustible » explique le professeur Logan. Il s'agit en effet seulement d'un prototype pour montrer la faisabilité du processus. L'hydrogène n'est pas encore destiné à être utilisé, sauf pour un projet de véhicules dans l'exploitation vinicole même [54].

Cette électrolyse biologique consomme peu de courant car les bactéries font le gros du travail en séparant les molécules en éléments subatomiques. Le procédé pourra s'adapter à différentes compositions d'eau. « Actuellement, c'est principalement du sucre, mais plus tard on pourra se tourner vers les résidus de fermentation » précise Logan. Il ajoute que la mise à disposition des infrastructures de la compagnie vinicole Nappa offre une vitrine pédagogique à ce projet : de nombreux touristes viennent pour voir des déchets agricoles convertis en énergie du futur.

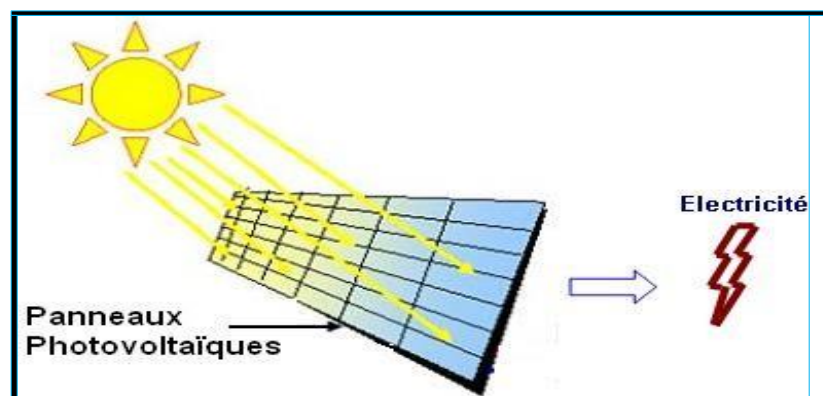
**Les nanomatériaux et les catalyseurs avancés :** Les nanomatériaux et les catalyseurs jouent un

rôle clé dans les processus de conversion de la biomasse en hydrogène. Les avancées récentes dans la conception de catalyseurs plus efficaces, tels que les nanotubes de carbone, les nanoparticules métalliques et les matériaux composites, ont permis d'améliorer la vitesse de réaction, la sélectivité et la stabilité des réactions de conversion de la biomasse en hydrogène.

Ces innovations contribuent à améliorer l'efficacité et la viabilité économique de la conversion de la biomasse en hydrogène. Cependant, il convient de noter que la technologie n'est pas encore largement déployée à grande échelle et que des efforts supplémentaires de recherche et développement sont nécessaires pour optimiser ces processus et les rendre compétitifs par rapport aux méthodes de production d'hydrogène plus traditionnelles.

## 2.5. Production d'hydrogène par Énergie solaire photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [55].



**Figure 2.10 :** conversion de l'énergie solaire en électricité.

### 2.5.1. Utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène

Parmi les pistes explorées dans le secteur des énergies renouvelables, il y a celle de l'électrolyse de l'eau grâce à une cellule solaire. Des ingénieurs belges ont mis au point un nouveau procédé pour produire de l'hydrogène à partir d'un système de panneaux solaires. Ce processus vise à diviser l'eau de l'air en deux parties : d'un côté l'hydrogène, de l'autre l'oxygène. Grâce à des panneaux solaires, ils utilisent 15 % de l'énergie solaire pour obtenir de l'hydrogène gazeux. Chacun peut produire jusqu'à 250 litres d'hydrogène par jour. Les chercheurs ont mené à bien des études, pendant dix ans, pour parvenir à ce que chacun de ces panneaux solaires capables de transformer

l'eau en hydrogène tout en produisant de l'électricité utilisable par ailleurs de 1,6 m2 transforme 15 % de la lumière solaire en hydrogène gazeux à partir de la vapeur d'eau. Pour rappel, un panneau solaire classique transforme 18 à 20 % de l'énergie solaire en électricité [56].

### 2.5.2. Systèmes solaires photovoltaïques

#### •Les systèmes autonomes

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité et sont souvent utilisés dans les régions éloignées [57]. Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (2.12), qui représente les différentes possibilités offertes, telles que le couplage direct à une charge adaptée ou le couplage avec un adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), le fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

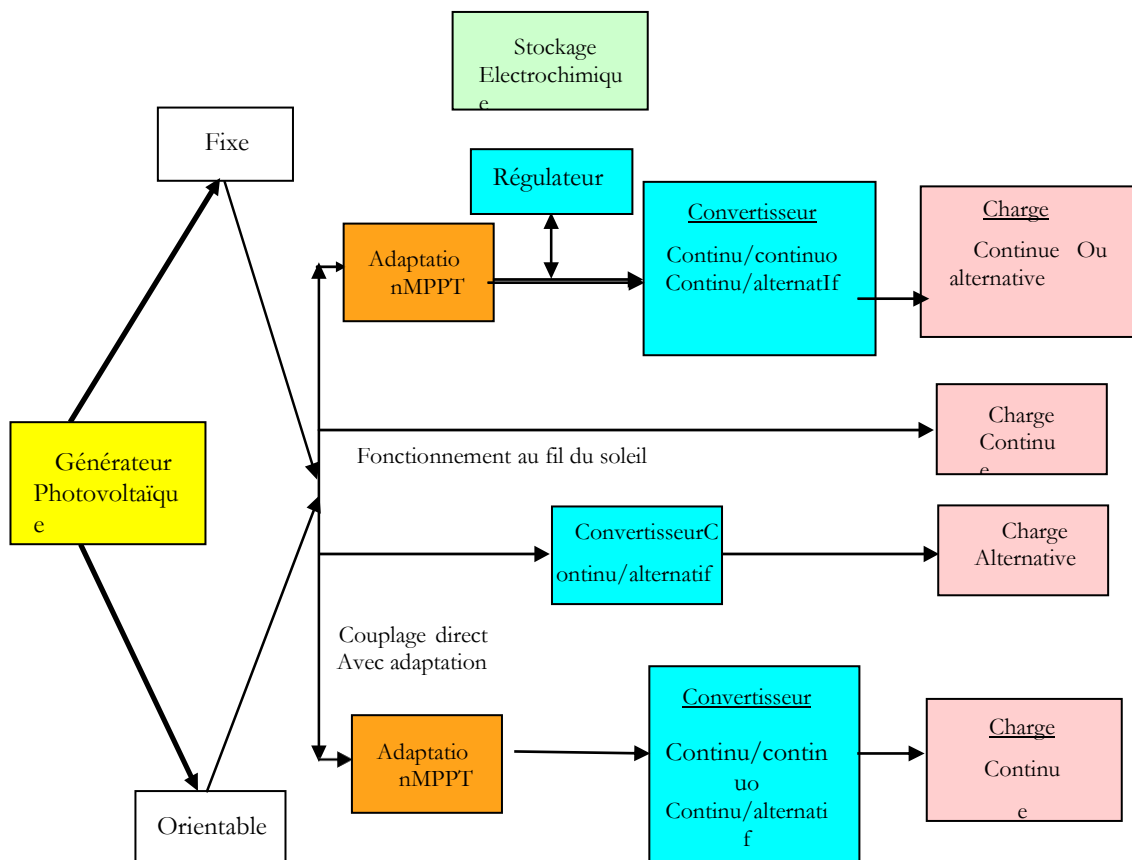
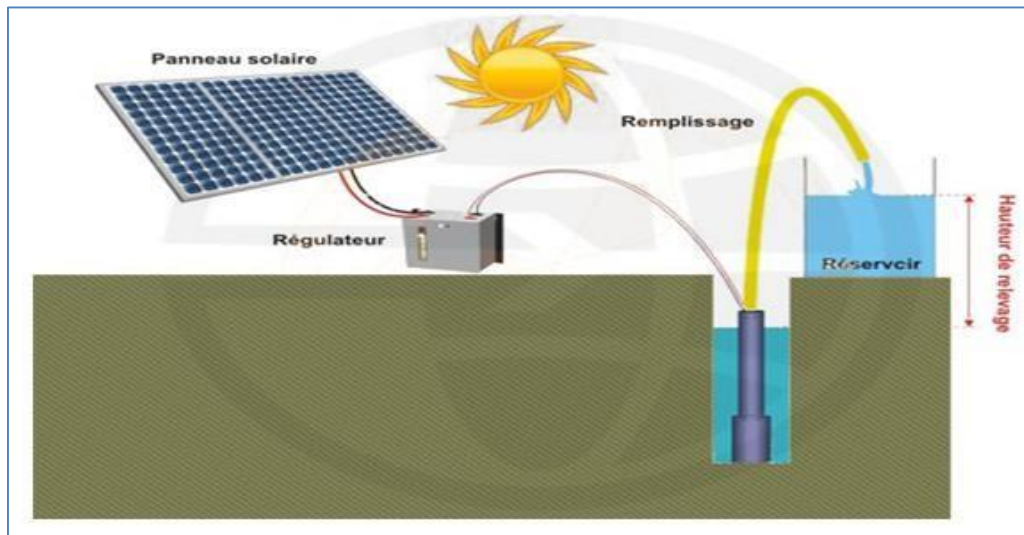


Figure 2.11 : Les différents styles de systèmes photovoltaïques autonomes [58].

Dans la plupart des cas, une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant un dispositif électronique entre le générateur photovoltaïque et sa charge électrique. Ce dispositif permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

**Exemple:** Le pompage au fil du soleil.

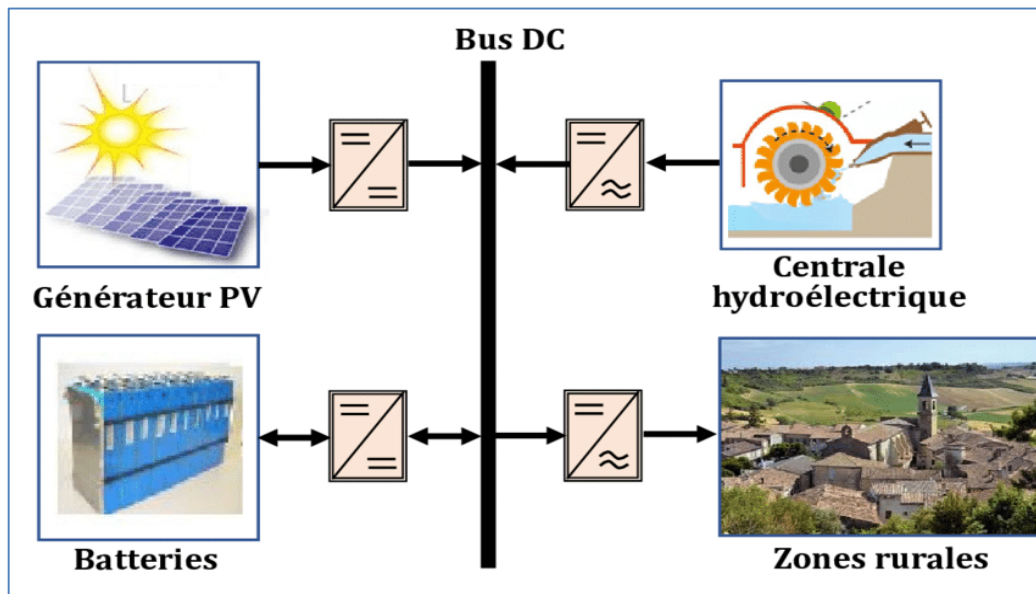


**Figure 2.12:** Schéma d'un système de pompage au fil du soleil.

#### • Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable, ainsi qu'une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, telles que le photovoltaïque et l'éolien, ne fournissent pas une puissance constante. Cependant, en exploitant leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

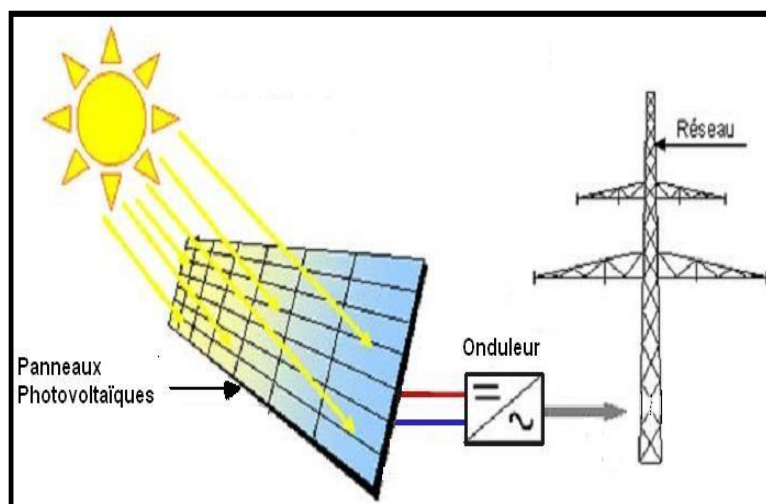
Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées selon deux configurations : une architecture à bus continu ou une architecture à bus alternatif [59].



**Figure 2.13 :** Configuration du système hybride à bus continu [60].

#### • Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont le résultat de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. Ces systèmes sont conçus pour produire de l'énergie plus près des lieux de consommation. En étant connectés au réseau, ils réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système photovoltaïque connecté à un réseau produit sa propre électricité et peut acheminer l'excédent d'énergie vers le réseau, tout en s'approvisionnant auprès du réseau en cas de besoin. Cette configuration élimine le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie de stockage. De plus, ces systèmes peuvent être utilisés comme source d'alimentation d'appoint en cas de panne du réseau électrique.



**Figure 2.14 :** Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

### 2.5.3. Avantages de l'énergie solaire photovoltaïque dans la production d'hydrogène.

La production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque présente plusieurs avantages, tels que :

- **Durabilité:** La production d'hydrogène à partir d'énergie solaire est plus durable car elle utilise une source d'énergie renouvelable [61].
- **Sécurité:** La production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire est plus sûre car elle ne nécessite pas de stockage de gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles
- **Coûts:** La production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire peut être moins coûteuse car elle utilise une source d'énergie gratuite et renouvelable [62].
- **Stockage:** L'hydrogène produit par les panneaux solaires peut être stocké dans un réservoir sous pression, ce qui permet de le stocker pour une utilisation ultérieure
- **Neutralité carbone:** L'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à l'aide de panneaux photovoltaïques est neutre en CO<sub>2</sub>, ce qui en fait une source d'énergie propre [63].

Les systèmes de production d'hydrogène solaire peuvent également être utilisés en complément de batteries pour l'accumulation d'énergie

### 2.5.4. Inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque dans la production d'hydrogène.

Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque dans la production d'hydrogène sont peu nombreux. Cependant, voici quelques éléments à prendre en compte :

- **Sensibilisateur et catalyseur:** Le procédé de production d'hydrogène à partir de la lumière solaire nécessite l'utilisation d'un sensibilisateur pour absorber la lumière et stimuler la réaction photochimique, ainsi que d'un catalyseur pour accélérer la réaction
- **Coûts initiaux:** Les coûts initiaux de l'installation d'un système de production d'hydrogène solaire peuvent être élevés
- **Dépendance à la météo:** La production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire dépend de la disponibilité de la lumière solaire, ce qui peut être un inconvénient si les conditions météorologiques ne sont pas favorables [64].
- **Faible densité énergétique:** L'hydrogène a une faible densité énergétique, ce qui signifie qu'il faut une grande quantité d'hydrogène pour produire une quantité d'énergie équivalente à celle produite par d'autres sources d'énergie



Cependant, ces inconvénients peuvent être atténués par l'utilisation de batteries et d'autres systèmes de stockage d'énergie en complément de l'hydrogène

### 2.5.5. Perspectives futures de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène.

Les perspectives futures de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène sont prometteuses. Voici quelques éléments qui montrent l'importance de l'hydrogène dans le futur :

- **Engagement de la Commission européenne:**

Plan de relance de l'UE - NextGenerationEU la Commission européenne a lancé un plan de relance économique ambitieux appelé NextGenerationEU pour stimuler la reprise après la pandémie de COVID-19. Une part importante des fonds de relance est allouée à des investissements dans les énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire photovoltaïque et la production d'hydrogène vert et le programme-cadre Horizon Europe Horizon Europe est le programme de recherche et d'innovation de l'UE pour la période 2021-2027. Il prévoit des financements importants pour la recherche et le développement de technologies liées à l'énergie solaire photovoltaïque et à l'hydrogène propre [65].

- **Nouvelles technologies:**

Les chercheurs travaillent sur de nouvelles technologies pour produire de l'hydrogène solaire efficacement, à faible coût et impact environnemental, telles que l'utilisation de nouvelles familles de matériaux avec des propriétés photo-électriques tout à fait étonnantes [66].

- **Etude des exportateurs européens d'hydrogène "vert":**

Pour qu'un pays devienne un potentiel exportateur d'hydrogène "vert", il doit disposer de bonnes ressources renouvelables [67], d'eau douce en grande quantité, ainsi que la capacité de développer une infrastructure de production, transport et distribution d'hydrogène. Selon ces trois critères, les pays peuvent être classés en cinq catégories distinctes (Pflugmann and Blasio, 2020). Cette classification est visible que la figure [68].

- **Développement de l'industrie de l'hydrogène:**

L'Algérie a un grand potentiel pour développer une industrie de l'hydrogène verte. Voici quelques éléments qui montrent l'importance de l'hydrogène en Algérie :

Une étude exploratoire montre qu'il est techniquement et économiquement possible de développer

une industrie de l'hydrogène vert en Algérie, contribuant ainsi à la décarbonation de plusieurs secteurs et à la réduction de la dépendance aux hydrocarbures. L'Algérie dispose d'une infrastructure existante dans l'industrie pétrolière et gazière, d'une industrie de gaz industriels, d'un potentiel exceptionnel en énergie solaire et éolienne et d'une proximité géographique avec l'Europe, ce qui en fait un fournisseur potentiel d'hydrogène vert ou d'autres gaz précieux [69].

Une étude de faisabilité sur l'hydrogène vert en Algérie a été lancée en février 2021 pour évaluer le potentiel de l'Algérie dans ce domaine. Cette étude devrait éclairer des aspects tels que la demande internationale pour l'hydrogène vert et la part que l'Algérie pourrait potentiellement couvrir [70].

- **Développement de nouvelles technologies de production d'hydrogène**

Le développement de nouvelles technologies de production d'hydrogène est crucial pour la transition vers une énergie propre. Voici quelques éléments qui montrent l'importance de ces technologies :

- ❖ Les technologies déjà disponibles aujourd'hui permettent à l'hydrogène de produire, stocker, transporter et utiliser l'énergie de différentes manières. Une grande variété de combustibles peut produire de l'hydrogène, y compris les énergies renouvelables, le nucléaire, le gaz naturel, le charbon et le pétrole. Il peut être transporté sous forme de gaz par des pipelines ou sous forme liquide par des camions-citernes. Les investissements dans l'hydrogène peuvent aider à favoriser de nouveaux développements technologiques et industriels dans les économies du monde entier
- ❖ Des scientifiques ont récemment mis au point une nouvelle méthode écoénergétique pour produire de l'hydrogène à partir d'éthanol et d'eau, ce qui pourrait rendre le carburant d'hydrogène plus viable [71].

## 2.6. Production d'hydrogène par Énergie éolienne

La production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne présente l'avantage de produire un vecteur énergétique propre et renouvelable, l'hydrogène, en utilisant une source d'énergie renouvelable, l'énergie éolienne. Cela contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir la transition vers une économie bas-carbone.

En 1957 c'était la première tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des grands vents (Alger). Le 1er prototype était un bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25m conçu par l'ingénieur ANDREAU initialement installer en Angleterre et qui fut rachetée par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [72].

### 2.6.1. **Énergie éolienne pour la production d'hydrogène**

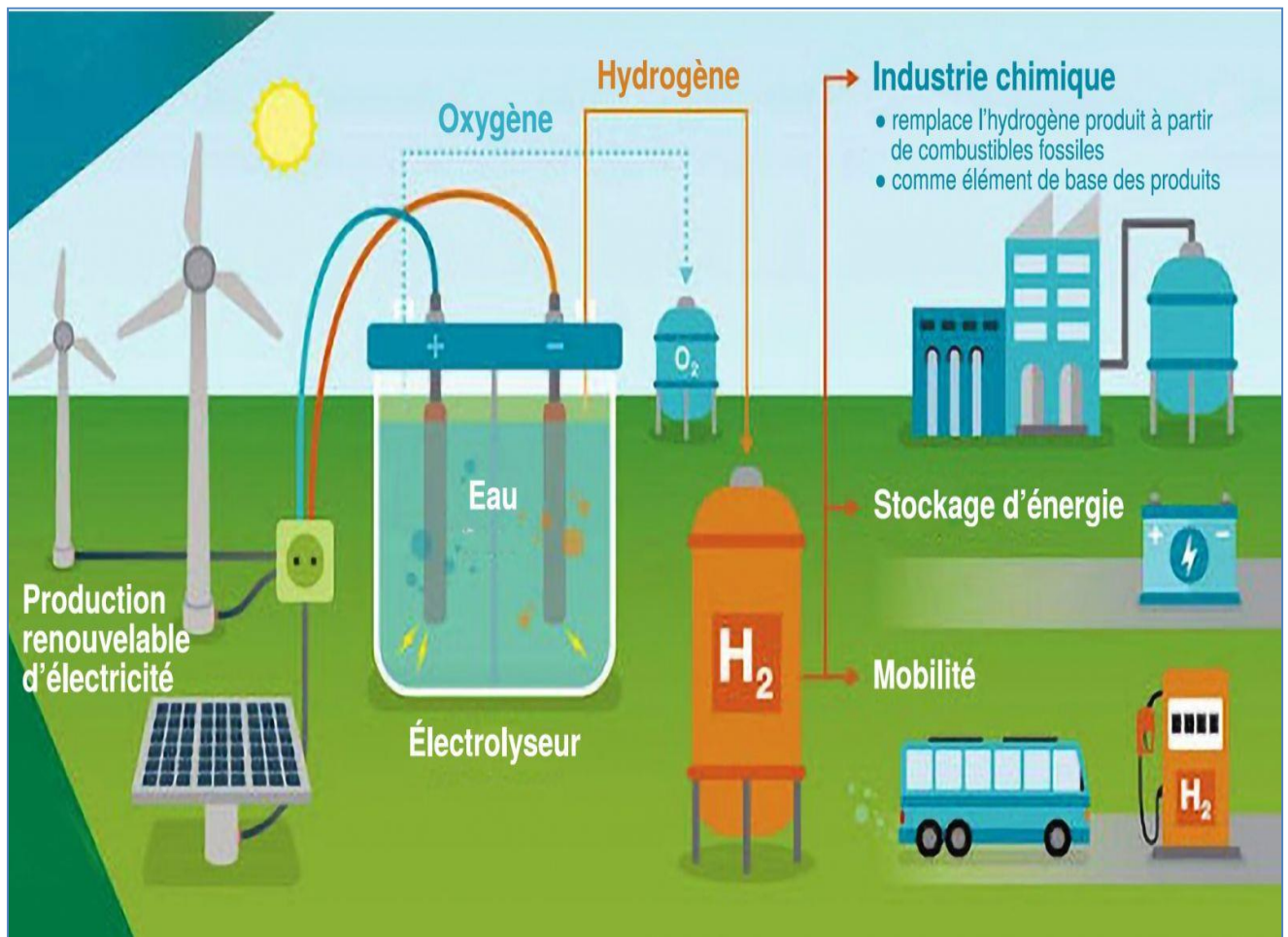
L'énergie éolienne pour la production d'hydrogène est en effet une combinaison puissante d'énergies renouvelables. Cette approche permet de combiner les avantages de l'énergie éolienne, une source d'énergie propre et abondante, avec la production d'hydrogène, un vecteur énergétique polyvalent et respectueux de l'environnement.

L'hydrogène est considéré comme une solution prometteuse pour décarbonner les secteurs de l'énergie et des transports, car il peut être utilisé comme alternative aux combustibles fossiles, en particulier dans les applications nécessitant une grande densité énergétique ou une longue autonomie, comme les véhicules lourds, les avions ou le stockage à grande échelle.

L'énergie éolienne, quant à elle, est une source d'énergie renouvelable mature et largement déployée. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en électricité, sans émissions de gaz à effet de serre ni pollution atmosphérique. En utilisant cette électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, on peut obtenir un cycle de production d'hydrogène sans émissions de carbone.

Cette combinaison offre donc une solution de stockage de l'énergie renouvelable, car l'hydrogène produit peut être stocké et utilisé ultérieurement pour générer de l'électricité lorsque les éoliennes ne produisent pas suffisamment d'électricité. Cela contribue à résoudre le défi de l'intermittence de l'énergie éolienne et à assurer un approvisionnement énergétique stable et fiable.

De plus, cette approche favorise la transition vers une économie bas-carbone en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. En utilisant l'hydrogène produit à partir de l'énergie éolienne, les secteurs qui dépendent actuellement des combustibles fossiles peuvent réduire leur empreinte carbone, améliorer la qualité de l'air et contribuer à l'atténuation du changement climatique.



**Figure 2.15:** la production d'hydrogène par l'énergie éolienne.

L'hydrogène sa combustion produit de l'eau et pas de CO<sub>2</sub>, et son intensité énergétique est considérable : utilisée en transport, il confèrerait une autonomie maximale de 100 km/kg.

L'hydrogène a un contenu énergétique au kilo globalement 2,5 fois supérieur à celui du gaz naturel en revanche, en volume, ce contenu énergétique est 3 fois inférieures à celui du gaz naturel. D'où la nécessité de le compresser – à 350 ou 700 bar – pour le rendre exploitable dans le domaine du transport [73].

### 2.6.2. Avantages de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'hydrogène

Il convient de noter que les avantages économiques et environnementaux peuvent varier en fonction de la situation géographique, des politiques énergétiques et des technologies utilisées dans la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne.

Voici un tableau présentant les avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'hydrogène :

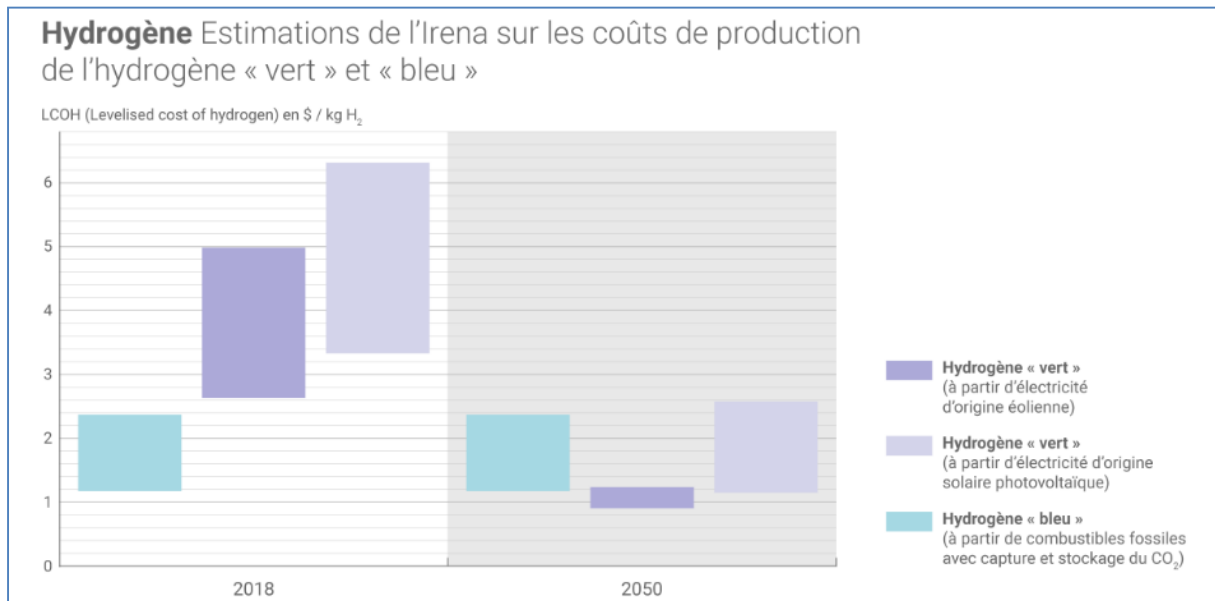
**Tableau 2.5:** les avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'hydrogène.

Avantages économiques	Avantages environnementaux
. Réduction des coûts de production de l'hydrogène grâce à une source d'énergie gratuite et renouvelable.	. Réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de la production d'hydrogène, car l'énergie éolienne ne génère pas de CO <sub>2</sub> lorsqu'elle est produite.
. Création de nouvelles opportunités d'emploi dans le secteur de l'énergie éolienne et de l'hydrogène, contribuant ainsi à la croissance économique.	. Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles, car l'énergie éolienne ne nécessite pas de carburant, ce qui permet de diversifier le mix énergétique et de renforcer la sécurité énergétique.
. Diminution de la volatilité des prix de l'hydrogène, car l'énergie éolienne est une ressource gratuite et abondante, réduisant ainsi la dépendance aux fluctuations des prix des combustibles fossiles.	. Réduction de la pollution de l'air et des impacts sur la santé humaine grâce à la diminution des émissions de polluants atmosphériques provenant de la combustion des combustibles fossiles utilisés pour la production d'hydrogène.
. Promotion de l'innovation et de la recherche dans le domaine des technologies de l'énergie éolienne et de l'hydrogène, ce qui peut conduire à de nouvelles avancées et à une compétitivité accrue.	. Conservation des ressources naturelles et protection de l'environnement, car l'énergie éolienne ne nécessite pas l'extraction de combustibles fossiles, contribuant ainsi à la préservation des écosystèmes et de la biodiversité.
. Développement de systèmes énergétiques plus décentralisés et résilients, car l'énergie éolienne peut être produite localement, réduisant ainsi les besoins en transport d'énergie sur de longues distances.	. Réduction de la consommation d'eau dans la production d'hydrogène, car les technologies d'électrolyse utilisées avec l'énergie éolienne nécessitent moins d'eau que les méthodes traditionnelles basées sur les combustibles fossiles.

### 2.6.3. Défis et opportunités

- **Défis de la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne :**

1) **Coût initial élevé :** Les coûts de construction d'installations de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne peuvent être significatifs. Cependant, il est important de noter que les coûts de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne diminuent progressivement à mesure que les technologies s'améliorent et que les économies d'échelle sont réalisées.



**Figure 2.16:** les coûts de production de l'hydrogène «vert» pourraient être divisés par 3 entre 2018 et 2050. (©Connaissance des Énergies, d'après Irena) [74].

2) **Intermittence de l'énergie éolienne :** L'énergie éolienne dépend des conditions météorologiques et peut être intermittente. Cela signifie que la production d'hydrogène peut varier en fonction de la disponibilité du vent, nécessitant des systèmes de stockage de l'énergie ou une gestion intelligente du réseau pour équilibrer l'offre et la demande.

3) **Besoin d'infrastructures adaptées :** La production, le transport et la distribution de l'hydrogène nécessitent des infrastructures spécifiques qui peuvent ne pas être suffisamment développées dans certaines régions. Il peut être nécessaire de mettre en place de nouvelles infrastructures pour soutenir une production d'hydrogène à grande échelle.

- **opportunités de la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne :**

1) **Réduction des émissions de gaz à effet de serre :** La production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la transition vers une économie à faible intensité de carbone et à la lutte contre le changement climatique.

2) **Diversification de la production énergétique :** L'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de

l'hydrogène permet de diversifier le mix énergétique en utilisant une source d'énergie renouvelable. Cela peut réduire la dépendance aux combustibles fossiles et renforcer la résilience du système énergétique.

3) Intégration dans les secteurs industriels et des transports : L'hydrogène produit à partir de l'énergie éolienne peut être utilisé dans divers secteurs, tels que l'industrie et les transports, offrant ainsi des solutions de décarbonations pour ces secteurs.

## 2.7. Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable qui exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins. Cette énergie peut être utilisée directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être convertie en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique [75]. Les centrales hydroélectriques peuvent utiliser les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.) pour produire de l'énergie mécanique convertie en électricité. En France, l'hydroélectricité est exploitée depuis la fin du 19ème siècle et est la plus ancienne des énergies produites grâce à une ressource nationale. EDF exploite 640 barrages dont 150 d'une hauteur supérieure à 20 m. L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable très économique à long terme, qui n'émet pas de gaz à effet de serre et qui est utilisable rapidement grâce aux grandes quantités d'eau stockée [76].

Cependant, l'exploitation de l'énergie hydraulique peut avoir des inconvénients, notamment en matière de continuité des cours d'eau, car la création d'un barrage représente un obstacle pour la navigation, la migration des espèces aquatiques et le transfert de sédiments [77].

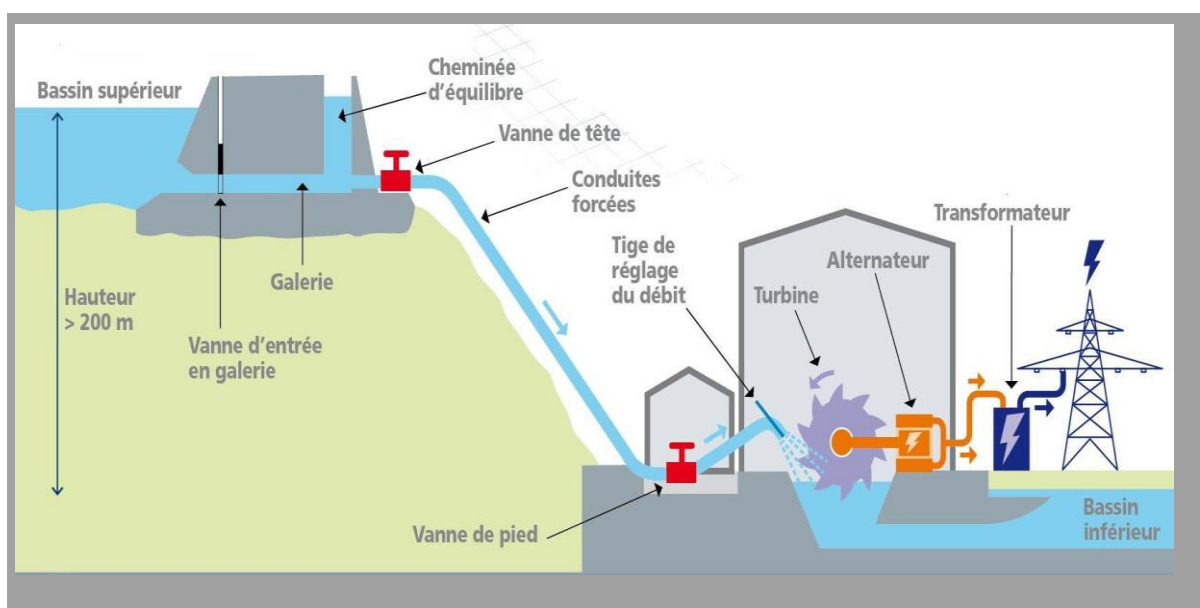


Figure 2.17: Le schéma de procès d'une centrale de haute-chute [77].

### 2.7.1. Production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique peut être utilisée pour produire de l'hydrogène, mais la méthode la plus courante pour produire de l'hydrogène est l'électrolyse de l'eau, qui utilise de l'électricité pour séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau. L'électricité peut provenir de différentes sources, y compris l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie nucléaire. Les électrolyseurs servent à produire de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne, solaire, hydraulique ou nucléaire [78].

Il existe également d'autres méthodes pour produire de l'hydrogène, telles que la dissociation thermochimique de l'eau et la production d'hydrogène à partir d'éthanol et d'eau [79].

#### Fonctionnements de la production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique

La production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique peut être réalisée par électrolyse de l'eau. Cette méthode utilise de l'électricité pour séparer l'hydrogène et l'oxygène de l'eau. L'électricité peut provenir de différentes sources, y compris l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie nucléaire. Les électrolyseurs servent à produire de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne, solaire, hydraulique ou nucléaire. Plus leur coût est faible, plus la demande d'hydrogène devrait augmenter. Les centrales au fil de l'eau permettent à une installation de production d'hydrogène de fonctionner à régime élevé grâce à leurs nombreuses heures d'exploitation. Cependant, la production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique n'est pas très développée car elle requiert une importante quantité d'énergie [80].

### 2.7.2. Barrages hydroélectriques et production d'hydrogène

- ❖ Les barrages hydroélectriques peuvent être utilisés pour produire de l'hydrogène vert, qui est obtenu en séparant des molécules d'eau au moyen d'électricité renouvelable [81].
- ❖ L'hydrogène peut être produit par électrolyse avec l'électricité engendrée par les turbines installées au pied du barrage [81].
- ❖ La production d'hydrogène permet d'absorber les excédents d'énergie, elle évite d'étendre le réseau électrique et contribue à intégrer les nouvelles énergies renouvelables dans le système énergétique.
- ❖ En Suisse, par exemple, l'énergéticien Groupe E envisage la construction d'une centrale de production d'hydrogène au pied du barrage de Schiffen en. Au moyen de la force hydraulique, l'installation devrait produire 300 tonnes d'hydrogène vert par an, à partir de 2023 [82].



- ❖ L'hydrogène peut être transporté et transformé en méthane ou en carburants et combustibles liquides, quel que soit l'endroit [82].

**Tableau 2.6:** Avantages et inconvénient de l'utilisation de l'énergie hydraulique dans la production d'hydrogène.

Avantages	inconvénient
notamment la production d'hydrogène vert avec une empreinte carbone quasi nulle [81].	la difficulté de stockage et de transport, ainsi que le coût élevé de production [84].
Les barrages hydrauliques permettent grâce à la retenue de l'eau en amont d'alimenter des centrales hydrauliques en aval, ce qui peut être utilisé pour produire de l'hydrogène vert	les principaux moyens de production de l'hydrogène utilisent des énergies fossiles pour extraire de l'hydrogène et émettent donc du gaz carbonique, ce qui noircit la page de cet élément énergétiquement prometteur [85].
La production d'hydrogène permet d'absorber les excédents d'énergie, elle évite d'étendre le réseau électrique et contribue à intégrer les nouvelles énergies renouvelables dans le système énergétique [82].	
En outre, l'hydrogène peut être transporté et transformé en méthane ou en carburants et combustibles liquides, quel que soit l'endroit, et peut être retransformé en électricité et compléter ainsi d'autres solutions de stockage, comme des batteries [83].	

### 2.7.3. Développement de technologies innovantes pour la production d'hydrogène à partir de l'énergie hydraulique

Est un domaine en pleine expansion. L'énergie hydraulique, provenant des cours d'eau, des marées ou des vagues, offre un potentiel considérable pour la production d'hydrogène propre et durable.

Une des technologies émergentes dans ce domaine est l'électrolyse de l'eau alimentée par l'énergie hydraulique. Dans ce processus, l'énergie hydraulique est utilisée pour produire de l'électricité, qui

est ensuite utilisée pour alimenter l'électrolyseur. L'électrolyseur divise l'eau en hydrogène et en oxygène par le biais d'une réaction chimique. L'hydrogène ainsi produit peut être capturé et utilisé comme une source d'énergie propre et polyvalente.

Une autre technologie prometteuse est l'utilisation de turbines hydroliennes pour produire de l'électricité, qui est ensuite utilisée pour alimenter des électrolyseurs. Les turbines hydroliennes sont placées dans les cours d'eau ou les zones marines où le mouvement des marées ou des vagues est significatif. Elles captent cette énergie cinétique pour générer de l'électricité, qui est ensuite convertie en hydrogène.

Ces technologies innovantes offrent de nombreux avantages, notamment la production d'hydrogène décarboné et renouvelable, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la diversification des sources d'énergie. De plus, elles contribuent à l'émergence d'une économie de l'hydrogène, où l'hydrogène peut être utilisé comme combustible propre dans divers secteurs, tels que les transports, l'industrie et l'alimentation en énergie des bâtiments. Il est important de continuer à investir dans la recherche et le développement de ces technologies afin d'améliorer leur efficacité, leur rentabilité et leur intégration au sein des systèmes énergétiques existants. Ce faisant, nous pouvons exploiter pleinement le potentiel de l'énergie hydraulique pour une production d'hydrogène durable et contribuer à la transition vers une économie basée sur les énergies propre.

## 2.8. **Électrolyse assistée par plasma**

L'électrolyse assistée par plasma est une méthode relativement nouvelle de production d'hydrogène qui combine l'électrolyse de l'eau avec l'utilisation du plasma. Le plasma est un état de la matière constitué de gaz ionisé à haute température.

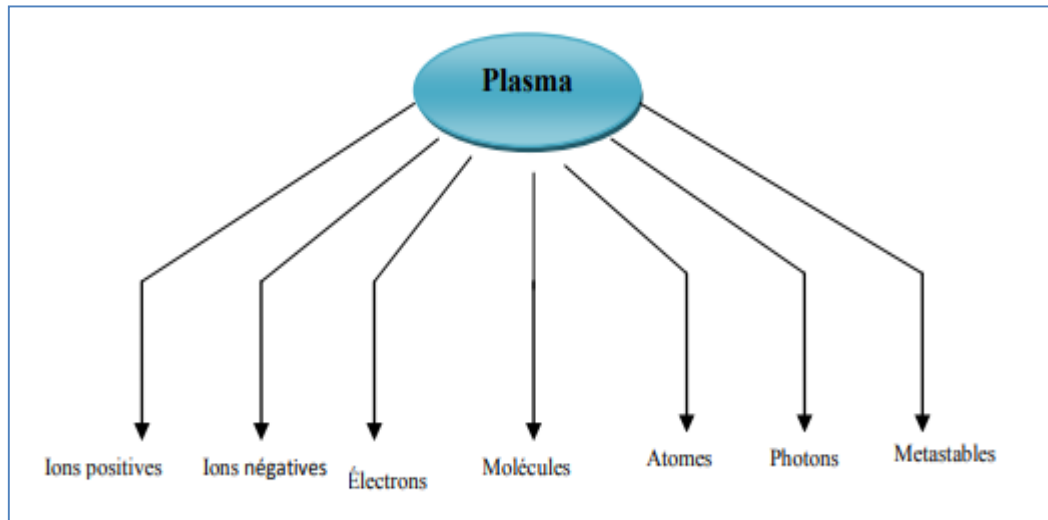
L'utilisation des plasmas froids est considérée comme un complément voir comme une alternative aux procédés classiques de traitement des gaz. Les technologies plasmas froids sont particulièrement intéressantes pour la production d'hydrogène et autres hydrocarbures [87].

### 2.8.1. **La théorie de plasma**

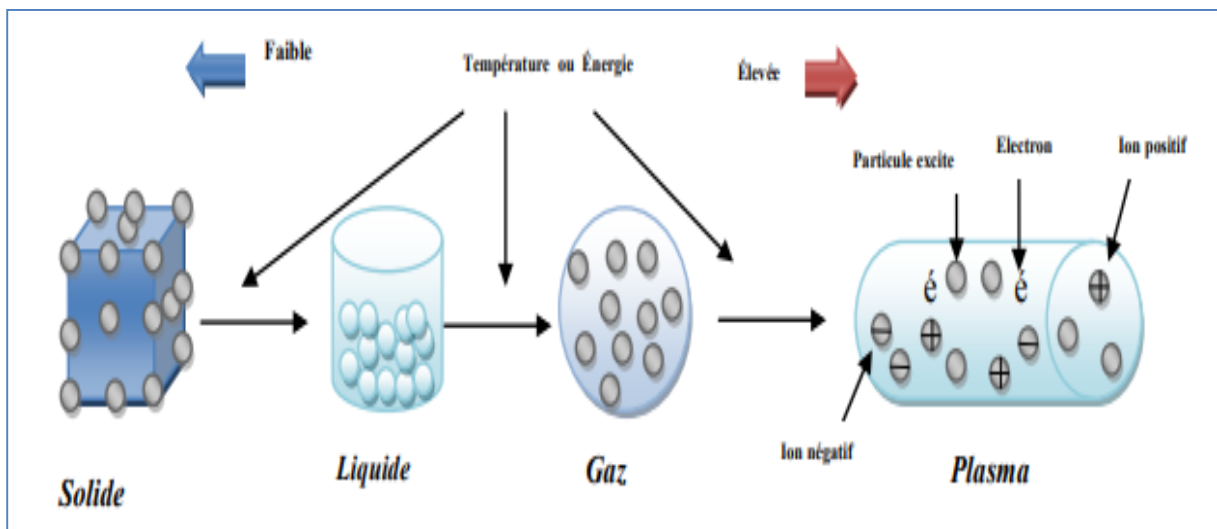
C'est en 1923 que les physiciens Langmuir et Tonks, ont introduit la première fois le mot plasma [87] le plasma est utilisé pour décrire un assemblage de gaz partiellement ou totalement ionisés composés des particules chargées: des électrons, des ions, des atomes neutres et éventuellement des molécules, 99 % de la matière dans l'Univers connu aujourd'hui est sous la forme de plasma. Le milieu interstellaire, le vent solaire, les éclairs ou les aurores boréales. La conductivité électrique d'un plasma est la propriété principale qui le différencie du gaz neutre qui

est un isolant électrique.

D'une manière générale, à mesure que la température augmente, les molécules deviennent plus énergétiques et transfèrent la matière dans la séquence: solide, liquide, gazeux et finalement plasma, ce qui justifie le nom de quatrième état de matière [88].



**Figure 2.18:** Les particules existant dans le plasma [81].



**Figure 2.19:** Représentation schématique des quatre états de la matière [89].

### 2.8.2. Production d'hydrogène par le Reformage Plasma

Le reformage plasma consiste à provoquer une décharge électrique dans un milieu réactif d'hydrocarbures afin d'y créer un état ionisé. Dans la recherche de solutions plus compactes de reformage, des études ont été menées sur le reformage plasma [90].

Un plasma est un gaz ionisé qui peut être obtenu de différentes manières : par combustion ou décharge électrique par exemple. Les plasmas sont caractérisés par une conductivité électrique élevée et une très forte réactivité. Ce sont le haut niveau énergétique de plasmas et sa réactivité qui l'ont désigné comme des candidats possibles pour le reformage des hydrocarbures. Selon leur niveau énergétique, leur température et leur densité électronique, les plasmas sont qualifiés de plasma haut température ou de plasma froid. Les éclairages de type néons par exemple sont des plasmas froids. Cohn et al [91]. Ont montré que des rendements comparables en hydrogène peuvent être obtenus avec les deux types de plasmas. Evidemment, un plasma froid est moins consommateur d'énergie [92].

Notre travail concerne plus particulièrement la production de gaz de synthèse (H<sub>2</sub>) assistée par plasma hors équilibre à partir d'hydrocarbures, Les méthodes de plasma devraient permettre une production d'hydrogène à basse température. Des expériences sur le reformage à vapeur du méthane pour produire de l'hydrogène par un réacteur à décharge à barrière diélectrique (DBD) ont été effectuées [93].

### 2.8.3. Perspectives futures de l'électrolyse assistée par plasma dans la production d'hydrogène

L'électrolyse assistée par plasma est une technologie émergente qui présente un fort potentiel dans la production d'hydrogène. Elle combine les principes de l'électrolyse et du plasma pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts de production de l'hydrogène. Bien que cette technologie en soit encore aux premiers stades de développement, elle suscite un intérêt croissant en raison de ses avantages potentiels.

Voici quelques perspectives futures de l'électrolyse assistée par plasma dans la production d'hydrogène :

**1) Efficacité accrue :** L'électrolyse assistée par plasma pourrait permettre d'améliorer l'efficacité globale du processus de production d'hydrogène. Le plasma généré facilite la dissociation des molécules d'eau, ce qui réduit la quantité d'énergie nécessaire pour réaliser l'électrolyse. Cela pourrait conduire à des rendements plus élevés et à une consommation d'énergie réduite par rapport aux méthodes d'électrolyse conventionnelles.

**2) Réduction des coûts :** En améliorant l'efficacité énergétique, l'électrolyse assistée par plasma pourrait contribuer à réduire les coûts de production de l'hydrogène. Une consommation d'énergie réduite signifie une dépense moindre en termes de sources d'alimentation électrique, ce qui pourrait rendre l'hydrogène produit par cette méthode plus compétitif sur le plan économique.

**3) Flexibilité accrue :** L'électrolyse assistée par plasma peut être réalisée à température ambiante,

contrairement à l'électrolyse traditionnelle qui nécessite souvent des températures élevées. Cela ouvre de nouvelles possibilités pour l'intégration de cette technologie dans différents environnements et applications. Par exemple, l'électrolyse assistée par plasma pourrait être utilisée de manière plus pratique dans les véhicules à hydrogène, les installations de stockage d'énergie ou les applications industrielles.

**4) Amélioration de la durabilité :** L'électrolyse assistée par plasma pourrait offrir des avantages en termes de durabilité environnementale. Étant donné que cette méthode peut potentiellement réduire la consommation d'énergie, elle pourrait contribuer à une production d'hydrogène plus respectueuse de l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre associées.

Il convient de noter que l'électrolyse assistée par plasma en est encore aux premiers stades de développement et doit faire l'objet de recherches supplémentaires pour valider pleinement son potentiel. Cependant, les perspectives futures semblent prometteuses et cette technologie pourrait jouer un rôle important dans la transition vers une économie de l'hydrogène propre et durable.

## 2.9. CONCLUSION

La production d'hydrogène à base d'énergies renouvelables représente une opportunité majeure pour la transition vers une économie décarbonnée et durable. En utilisant des sources d'énergie renouvelables, nous pouvons produire de l'hydrogène de manière propre et contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette approche ouvre la voie à de nouvelles possibilités dans de nombreux secteurs et peut jouer un rôle crucial dans la construction d'un avenir énergétique plus respectueux de l'environnement.

## Chapitre 03

# POTENTIEL DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE A BASE D'ENERGIES SOLAIRE EN ALGERIE

---

### 3.1. Introduction

L'Algérie dispose d'un potentiel considérable dans le domaine de la production d'hydrogène solaire. Grâce à un ensoleillement abondant et régulier, le pays bénéficie d'une ressource solaire exceptionnelle qui favorise la production d'hydrogène propre et durable. La combinaison du potentiel solaire et des avancées technologiques offre à l'Algérie une opportunité unique de développer une industrie de l'hydrogène. L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique polyvalent et respectueux de l'environnement, est devenu un sujet de préoccupation majeur. En utilisant l'énergie solaire pour alimenter des électrolyseurs, l'Algérie peut produire de l'hydrogène vert, c'est-à-dire de l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables qui n'émet pas de gaz à effet de serre. Cette démarche contribue à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et contribue à une transition énergétique durable. Le potentiel de l'Algérie à produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire présente de nombreux avantages. Tout d'abord, il contribue à diversifier le mix énergétique du pays, réduisant sa dépendance aux énergies fossiles. En outre, il ouvre de nouvelles opportunités économiques telles que la création d'emplois et le développement des compétences dans la recherche, la technologie et l'industrie de l'hydrogène. Cependant, pour exploiter pleinement ce potentiel, des investissements substantiels dans les infrastructures et les installations de production d'hydrogène sont nécessaires. Il est également crucial d'élaborer des politiques et des réglementations favorables pour soutenir le développement de l'industrie de l'énergie hydrogène et assurer sa durabilité à long terme. En exploitant son potentiel de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire, l'Algérie peut jouer un rôle clé dans la transition mondiale vers une économie plus propre et plus durable. Cela peut non seulement avoir un impact positif sur l'environnement, mais aussi stimuler la croissance économique et créer des opportunités pour l'exportation d'hydrogène vert. L'Algérie est donc bien placée pour devenir un acteur majeur dans le domaine de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire, contribuant ainsi à façonner un avenir énergétique plus vert et plus durable tant au niveau national qu'international.

### 3.2. L'hydrogène solaire comme source d'énergie propre

L'hydrogène solaire est une source d'énergie propre qui peut être produite par électrolyse de l'eau en utilisant uniquement de l'électricité provenant de sources renouvelables telles que l'énergie solaire. Pour déterminer si l'hydrogène est une source d'énergie propre, il faut considérer l'ensemble de son cycle de vie, du puits à la roue, de sa génération à son utilisation [94].

L'utilisation d'hydrogène dans les piles à combustible pour produire de l'électricité ne produit que des eaux usées, qui sont sans doute propres.

L'hydrogène peut être utilisé dans plusieurs domaines, tels que le stockage d'électricité, la mobilité, la production d'électricité et de chaleur à faible émission de CO<sub>2</sub>, et la décarbonation de certains secteurs industriels, il doit être comprimé ou liquéfié, comme le carbure de silicium, une nouvelle technologie pour obtenir de l'hydrogène par le biais de cubes et nanoporeux, qui pourrait être un précurseur de la production d'hydrogène propre [95].

#### 3.2.1. Avantages de l'hydrogène solaire en Algérie

Les avantages de l'hydrogène solaire en Algérie sont nombreux et incluent :

- L'Algérie dispose de centres de recherche qui peuvent être utilisés pour développer des technologies pour la production d'hydrogène solaire [96].
- La production d'hydrogène solaire en Algérie permettrait de diversifier les ressources énergétiques du pays et de fournir une source d'énergie propre et durable
- L'hydrogène solaire peut être utilisé pour stocker l'électricité produite à partir de sources renouvelables comme l'énergie solaire pendant les périodes hivernales
- L'Algérie est proche de l'Europe, qui est un marché potentiel pour l'hydrogène solaire [97].
- L'Algérie a adopté une feuille de route pour le développement de l'hydrogène qui vise à faire du pays un pionnier régional et international dans la production et la commercialisation de cette nouvelle énergie, en fournissant au marché européen 10% de ses besoins à l'horizon 2040
- Grâce à son vaste potentiel en énergie solaire, l'Algérie représente une opportunité prometteuse pour exploiter l'énergie solaire et produire de l'hydrogène renouvelable [98].

### 3.2.2. Applications de l'hydrogène solaire

	<p><b>La production d'hydrogène solaire à grande échelle</b> : une nouvelle famille de matériaux avec des propriétés photo-électriques tout à fait étonnantes a été proposée pour produire de l'hydrogène solaire efficacement, à faible coût et impact environnemental. Cette proposition permettrait de produire de l'hydrogène à grande échelle et de diversifier les sources d'énergie.</p>
	<p><b>Stockage d'énergie</b> : l'hydrogène est facilement stocké et peut être utilisé pour alimenter des véhicules électriques ou produire de l'électricité à la demande [100].</p>
	<p><b>Production d'électricité et fourniture de chaleur</b> : L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique, la production d'électricité et la fourniture de chaleur à la demande est une solution de stockage d'énergie presque idéale dans le contexte du réchauffement climatique et du développement durable.</p>
	<p><b>Diversification des ressources énergétiques</b> : La production d'hydrogène solaire permet la diversification des ressources énergétiques d'un pays et fournit une source d'énergie propre et durable [100].</p>



### 3.2.3. Vecteur énergétique d'hydrogène solaire

Les énergies actuelles peuvent déstabiliser notre système écologique, leur disponibilité est par ailleurs limitée. Un système d'énergie basée sur l'hydrogène solaire est proposé comme solution à la fois non polluante et renouvelable. Notre travail porte sur l'étude de ce combustible solaire. Une analyse de la situation vectrice énergétique est présentée. Les différents procédés de production d'hydrogène solaire en Algérie sont détaillés, ainsi que les méthodes de son stockage. L'analyse des perspectives du système à hydrogène solaire montre que sa viabilité économique dépend à la fois des rendements de production, des rendements d'utilisation, mais aussi d'une technologie de stockage rentable.

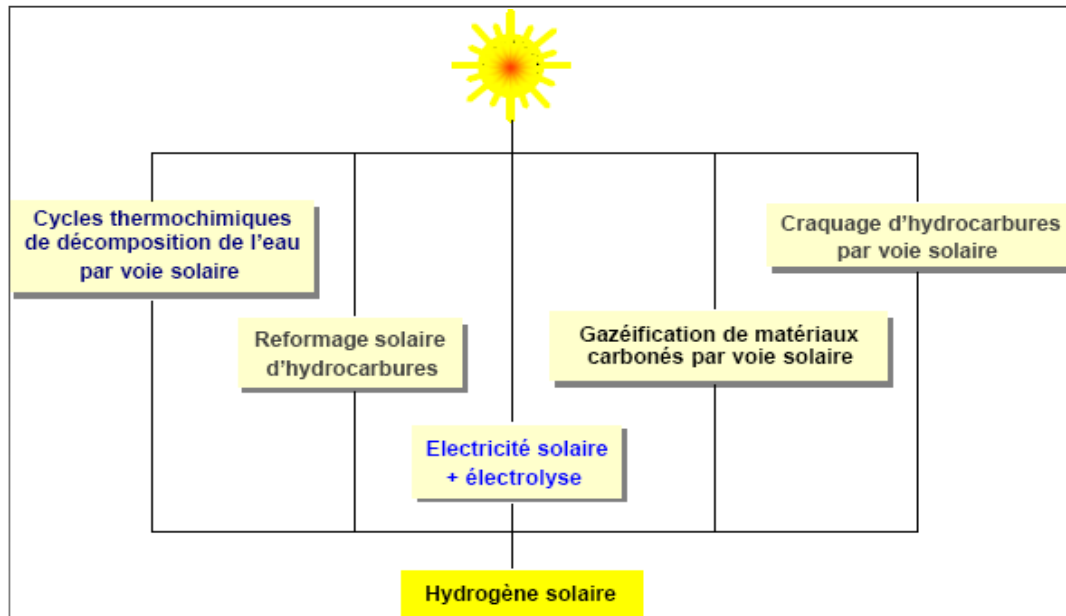
L'hydrogène solaire est considéré comme un vecteur énergétique propre et renouvelable en Algérie. Voici quelques informations pertinentes trouvées dans les résultats de recherche :

- Un système d'énergie basé sur l'hydrogène solaire est proposé comme solution à la fois non polluante et renouvelable
- L'hydrogène est un vecteur énergétique au service de la décarbonations, car il peut être produit à partir de sources renouvelables comme l'énergie solaire et utilisé pour stocker l'électricité produite à partir de ces sources
- La production d'hydrogène solaire en Algérie permettrait de diversifier les ressources énergétiques du pays et de fournir une source d'énergie propre et durable
- L'hydrogène peut être utilisé pour alimenter des véhicules électriques, pour produire de l'électricité à la demande, pour décarboné certains secteurs industriels, pour stocker l'électricité produite à partir de sources renouvelables, pour alimenter des piles à combustible, etc [101].

### 3.2.4. Procédés de fabrication de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire

Il existe plusieurs méthodes pour extraire l'hydrogène, et actuellement, de nombreux projets sont en cours dans le monde pour produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Pour une production intensive d'hydrogène, l'énergie solaire thermique apparaît comme la solution la plus intéressante, et le développement de cette activité à l'avenir dépendra de divers facteurs techniques, économiques et politiques les techniques de production d'hydrogène solaire ont atteint un niveau de maturité et d'efficacité grâce aux nouvelles avancées technologiques et aux nouvelles générations de centrales solaires thermodynamiques. Ces technologies permettent de convertir le rayonnement solaire en chaleur, avec un rendement supérieur à 70%, à des températures allant de 200°C à

2000°C. Cette chaleur primaire peut ensuite être convertie en vecteur énergétique d'hydrogène. Les concentrateurs solaires constituent une alternative intéressante pour les pays dotés de ressources solaires abondantes. La question de l'utilisation de ces concentrateurs d'énergie en Afrique du Nord pour la production d'hydrogène et d'électricité ne date pas d'aujourd'hui. Depuis 1978, l'Algérie a entamé des négociations pour l'achat de la centrale TEMIS, mais celles-ci ont échoué pour diverses raisons [102].



**Figure 3.1:** Les filières de synthèse d'hydrogène par voie solaire [103].

### 3.3. Potentiel solaire en Algérie pour la production d'hydrogène

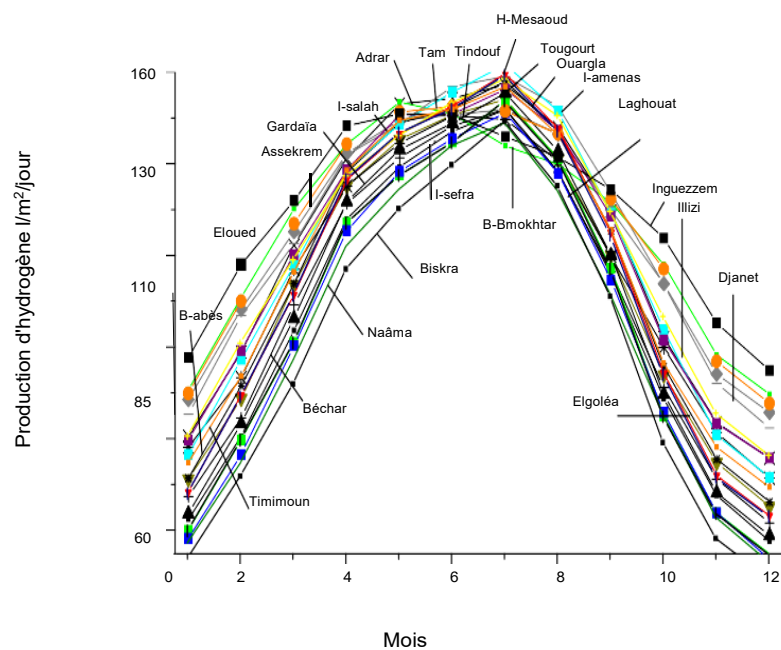
Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables mais à caractère diffus et intermittent. La nécessité de leur conversion en un vecteur énergétique stockable, transportable, versatile dans son utilisation et écologiquement acceptable s'impose. De tous les candidats répondant à ces critères l'hydrogène solaire présente les meilleurs atouts. Dans la présente thèse, une étude des différentes caractéristiques socioéconomiques est d'abord menée. La consommation ainsi que les ressources énergétiques actuelles sont reportées. Les différentes ressources nécessaires à une exploitation viable de l'hydrogène solaire sont revues. Enfin, un système PV - électrolyse est considéré. Les données radiométriques et météorologiques sont utilisées pour déterminer le potentiel hydrogène solaire dans des différents sites du territoire algérien. Une estimation du potentiel d'hydrogène solaire est menée. Tenant compte des technologies du système de collecte et de l'électrolyseur pour la production d'hydrogène et en utilisant des paramètres économiques on a

estimé le coût de la production d'hydrogène dans différents sites en Algérie. L'évaluation du coût d'hydrogène pour différents rendements et coûts unitaires du module photovoltaïque en prenant deux configurations de l'électrolyseur a été menée. Une comparaison a été faite entre le coût des différents carburants conventionnels et le l'hydrogène, ceci a été effectué dans deux cas à la production du carburant et à sa distribution.

### 3.3.1. Évaluation du potentiel solaire en l'Algérie

L'Algérie possède un grand potentiel en énergie solaire, ce qui en fait une opportunité pour le développement économique et social du pays selon une évaluation par satellite effectuée par l'agence spatiale allemande, l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important au monde Un expert en transition énergétique a estimé que le potentiel de production des énergies renouvelables en Algérie atteint les 400 500 térawatts .Si l'on parle uniquement du potentiel solaire photovoltaïque, il est estimé à plus de 235 700 térawatts une étude a évalué le potentiel d'hydrogène solaire en Algérie en utilisant des systèmes de poursuite, et a conclu que le potentiel est important

En résumé, l'Algérie possède un potentiel solaire important et le pays a entrepris des initiatives pour développer l'énergie solaire. Avec la mise en œuvre continue de politiques et de projets solaires, l'Algérie pourrait exploiter davantage son potentiel solaire et contribuer à la transition énergétique vers des sources renouvelables.



**Figure 3.2:** Evolution du potentiel de production d'hydrogène durant l'année pour différents sites [104].

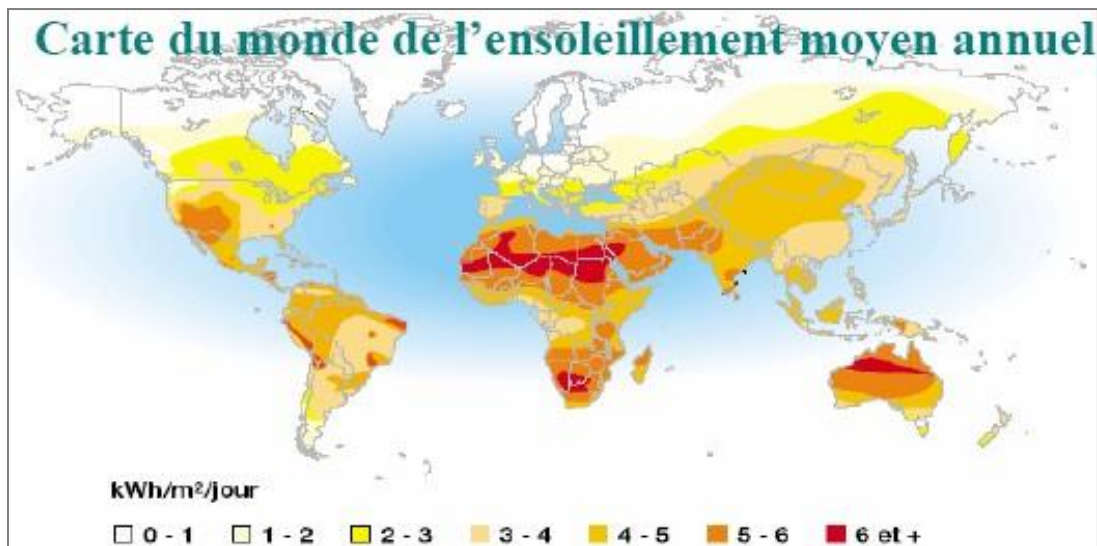
### 3.3.2. Potentiel solaire du Sahara algérien

Le sud de l'Algérie comprend le Sahara algérien et les régions arides. Ce Sahara occupe plus de 85% du territoire du pays, mais abrite moins de 10% de la population algérienne [105]. Cependant, la région est très peu développée. Ceci est probablement dû aux conditions climatiques les plus extrêmes. Cet environnement est soumis à une alternance de chaleur et de froid : les journées chaudes cèdent la place aux nuits glaciales, les hivers rigoureux cèdent la place aux étés torrides. Les terres sont peu arables et les précipitations sont peu abondantes, dépassant rarement 200 mm par an.

C'est aussi une zone très peu peuplée avec une densité d'environ 1,3 habitants/km<sup>2</sup>. Ces villages sont concentrés dans des oasis dispersées, caractérisées par l'enclavement et l'isolement de tout réseau de communication. Pourtant, le Sahara algérien cache une grande richesse au-delà des hydrocarbures.

- **Potentiel solaire**

Le désert du Sahara algérien est l'un des gisements d'énergie solaire les plus importants au monde. Le ciel est clair avec peu de nuages et le Sahara est le domaine du soleil. Avec environ 3 500 heures d'ensoleillement par an, c'est la plus longue du monde. Elle est toujours supérieure à 8h/jour sauf dans l'extrême sud où elle descend à 6h/jour en été. En été, le désert du Sahara central peut connaître plus de 12 heures d'ensoleillement. En raison de sa situation géographique, il n'y a pas de différences significatives dans le nombre d'heures d'ensoleillement quotidien au cours des différents mois de l'année, comme c'est le cas dans les villes du nord du pays. Cela permet une disponibilité égale tout au long de l'année. Le rayonnement solaire annuel reçu est d'environ 2650 kWh/m<sup>2</sup> [106]. L'électricité reçue par jour est toujours supérieure à 5 kWh/m<sup>2</sup> et peut facilement atteindre 7 kWh/m<sup>2</sup>. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de tout le pays. Si toute cette énergie est mise en valeur, cela constituerait une source d'énergie très importante et un revenu inestimable.



**Figure 3.3:** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [107].

Selon une évaluation réalisée par l'Agence spatiale allemande (ASA) à l'aide de satellites, il a été conclu que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus élevé de toute la région méditerranéenne. Les chiffres obtenus indiquent un potentiel solaire de 169 000 TWh/an pour le solaire thermique, 14 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien. La répartition de ce potentiel solaire par région climatique à travers le territoire algérien est présentée dans le tableau n°1, en fonction de l'ensoleillement annuel reçu [108].

**Tableau 3.1:** l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique

Regions	Littoral	Hauts-Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energ, Moy recue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

### 3.3.3. Ressources solaires disponibles pour la production d'hydrogène en Algérie

L'Algérie dispose d'un important potentiel en énergie solaire, avec une estimation de 2000 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie solaire dans le sud algérien. Les chercheurs algériens travaillent sur la production d'hydrogène vert, qui est présenté comme une énergie d'avenir. Selon une étude, l'Algérie dispose d'un potentiel hydrogène solaire important.

L'Algérie prévoit d'investir 20 à 25 milliards de dollars US dans la production d'hydrogène

vert En 2022, la capacité de production d'énergie solaire en Algérie avait atteint 540 mégawatts L'Algérie veut atteindre 15 000 MW d'énergie solaire d'ici à 2035 pour diversifier son mix énergétique En résumé, l'Algérie dispose d'un potentiel solaire important qui peut être utilisé pour produire de l'hydrogène vert. Les chercheurs algériens travaillent sur cette piste prometteuse, et le gouvernement algérien prévoit d'investir dans la production d'hydrogène vert.

#### 3.3.4. Estimation de la production d'hydrogène en Algérie

L'essentiel de l'hydrogène produit, notamment pour l'industrie pétrochimique, est obtenu à partir de gaz naturel, notamment par reformage à la vapeur. Les ressources en gaz naturel peuvent être améliorées en produisant de l'énergie solaire à hydrogène. De tous les systèmes de séparation de l'eau pour produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, la combinaison de modules photovoltaïques pour capter l'énergie solaire et de cellules d'électrolyse pour la séparation de l'eau est de loin la plus attractive et la plus simple. Le système comprend :

- ❖ Un module photovoltaïque composé de panneaux de matériaux photovoltaïques utilisés pour convertir l'énergie solaire en électricité. L'efficacité des modules dépend de la nature des cellules photovoltaïques et des conditions climatiques. Le rendement des meilleurs modules photovoltaïques à ce jour est en effet d'environ 12 % [109].
- ❖ Le système de mise en forme et de conditionnement du signal issu du module photovoltaïque. Dans ce système, des unités de stockage sont aussi à prévoir pour les périodes hors peak. Des études sur ces systèmes [110], ont montré que leur rendement ne dépasse pas les 97 %. Une valeur très conservatrice de ce rendement serait de l'ordre de 85 %.

En plus de ces systèmes, on doit prendre en compte les systèmes auxiliaires tels que les systèmes de contrôle et de séparation des gaz produits et le système d'alimentation et de traitement de l'eau. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Elle peut être prise de l'importante nappe phréatique qui, dans certain cas, n'est qu'à quelques mètres de la surface. Ceci est plus particulièrement vrai dans la région d'El Oued et d'Adrar.

- **Résultat de la production d'hydrogène en Algérie**

En utilisant les performances des divers systèmes solaires et les moyennes annuelles de l'irradiation globale quotidienne sur plan horizontal des dix dernières années, nous avons calculé le potentiel de production estimé par mètre carré et par jour de panneau photovoltaïque. Les résultats révèlent un potentiel de production considérable dans le sud de l'Algérie.

**Tableau 3.2:** Potentiel de Production annuelle d'hydrogène (l/m<sup>2</sup>/j) [104].

sites	Latitude (Nord)	Longitude	Insolation (kWh/m <sup>2</sup> /jour)	Potentiel hydrogène (l/m <sup>2</sup> /jour)
Adrar	27° 49'	00° 11'w	6,04	120,3772
Tam	22° 48'	05° 27'e	6,3	125,559
I-guezzem	19° 34'	05° 46'e	6,45	128,5485
Hassi-Mess	31° 40'	06° 8'e	5,71	113,8003
Biskra	34° 48'	05° 44' e	4,96	98,8528
I-Sefra	32° 45'	00° 36 w	5,35	106,6255
Timimoun	29° 15'	00° 17'e	5,84	116,3912
Laghouat	33° 48'	02° 53'e	5,23	104,2339
Illizzi	26° 30'	08° 28'e	6,04	120,3772
El Goléa	30° 34'	02° 52 e	5,78	115,1954
B.BMokhtar	21° 12'	00° 34'e	6,27	124,9611
Djanet	24° 16'	09° 28'e	6,25	124,5625
Tindouf	27° 40'	08° 09'	5,77	114,9961
Naama	33° 16'	00°18' w	5,13	102,2409
In Amenas	28° 03'	09° 38'e	5,99	119,3807
El oued	33° 30'	06° 47 e	5,29	105,4297
Béchar	31° 38'	02° 15' w	5,48	109,2164
Touggourt	33° 07'	06° 08'e	5,29	105,4297
Ouargla	31° 55'	05° 24'e	5,7	113,601
In Salah	27° 12'	02° 28'e	5,98	119,1814
Ghardaia	32° 24'	03° 48'e	5,48	109,2164
Beni Abès	30° 08'	02° 10' w	5,65	112,6045
Assekrem	23° 16'	05°34'e	6,21	123,7653

### 3.4. Défis et opportunités de développement à la production d'hydrogène solaire en Algérie

La production d'hydrogène solaire en Algérie présente à la fois des défis et des opportunités.

Voici quelques-uns des défis auxquels le pays peut être confronté, ainsi que les opportunités de développement associées

<b>défis et obstacles</b>	<b>Opportunités économiques et environnementales</b>
<p><b>Défis liés à l'infrastructure :</b> L'établissement d'une infrastructure adéquate pour la production, le stockage, la distribution et l'utilisation de l'hydrogène solaire nécessite des investissements significatifs et une planification minutieuse. Il peut être nécessaire de mettre en place des réseaux de distribution d'hydrogène et des stations de ravitaillement, ainsi que de moderniser les infrastructures existantes pour répondre aux besoins spécifiques de l'hydrogène solaire.</p>	<p><b>Opportunité :</b> Le développement de cette infrastructure peut créer des opportunités d'investissement et de création d'emplois dans le secteur de l'énergie propre en Algérie. Il peut également favoriser le transfert de technologie et de savoir-faire, renforçant ainsi les compétences locales dans le domaine de l'hydrogène solaire.</p>
<p><b>Intermittence de l'énergie solaire :</b> L'énergie solaire est une source d'énergie intermittente, dépendant de la disponibilité du rayonnement solaire. Cela pose un défi pour la production continue d'hydrogène solaire, car il est nécessaire de stocker l'énergie solaire excédentaire pour une utilisation ultérieure.</p>	<p><b>Opportunité :</b> L'utilisation de technologies de stockage de l'hydrogène, telles que les réservoirs à haute pression ou les réservoirs cryogéniques, peut permettre de compenser l'intermittence de l'énergie solaire. De plus, la combinaison de l'hydrogène solaire avec d'autres sources d'énergie renouvelable, peut contribuer à une production d'hydrogène plus stable et continue.</p>
<p><b>Coût de production et de distribution :</b> Le coût actuel de production de l'hydrogène solaire peut être relativement élevé par rapport aux méthodes conventionnelles. De plus, la mise en place d'infrastructures de distribution d'hydrogène à grande échelle peut être un défi logistique et économique.</p>	<p><b>Opportunité :</b> L'Algérie dispose d'un important potentiel solaire inexploité, ce qui peut permettre une production d'hydrogène solaire compétitive à long terme. De plus, la réduction des coûts de production et de distribution de l'hydrogène solaire grâce aux avancées technologiques, à l'optimisation des processus et à l'économie d'échelle offre des opportunités pour rendre cette énergie plus abordable et accessible.</p>
<p><b>Cadre réglementaire et politique :</b> Un cadre favorable est essentiel pour encourager le développement de l'hydrogène solaire en Algérie. Cela comprend la mise en place de politiques incitatives, de réglementations claires, de normes de sécurité et de durabilité, ainsi que la promotion de la recherche et du développement dans le domaine de l'hydrogène solaire.</p>	<p><b>Opportunité :</b> La création d'un environnement réglementaire favorable peut attirer les investissements nationaux et étrangers, stimuler l'innovation et encourager le déploiement de projets d'hydrogène solaire en Algérie. Cela peut également contribuer à la transition énergétique du pays vers une économie plus propre et durable.</p>



bien que la production d'hydrogène solaire en Algérie soit confrontée à des défis liés à l'infrastructure, à l'intermittence de l'énergie solaire, aux coûts et au cadre réglementaire, elle offre également d'importantes opportunités de développement économique, technologique et environnemental. Avec un engagement fort, des investissements appropriés et une approche stratégique, l'Algérie peut tirer parti de son potentiel solaire considérable pour devenir un acteur clé dans la production et l'utilisation de l'hydrogène solaire.

### 3.5. Cadre politique et initiatives

En Algérie, il existe un intérêt croissant pour la production d'hydrogène à partir d'énergie solaire en raison de son potentiel en tant que source d'énergie propre et renouvelable. Le gouvernement algérien reconnaît l'importance de diversifier son mix énergétique et de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles. Par conséquent, plusieurs initiatives ont été lancées pour promouvoir la production d'hydrogène à base d'énergie solaire dans le pays.

Le ministre de l'Énergie et des Mines, Mohamed Arkab a affirmé, jeudi 23/03/2023, que les "préparatifs étaient en cours" pour mettre en œuvre la feuille de route relative au développement de l'hydrogène, basée sur la stratégie nationale de cette filière, en réunissant toutes les conditions nécessaires pour créer un environnement économique et écologique qui permette de concrétiser cette démarche. [111].

#### 3.5.1. Politiques et réglementations pour promouvoir la production d'hydrogène solaire en Algérie

L'hydrogène vert étant exclusivement généré à partir d'énergies renouvelables, l'Algérie, avec son abondance de ressources solaires, peut jouer un rôle clé dans l'approvisionnement futur de l'Europe en hydrogène. La politique énergétique européenne, axée sur la neutralité carbone et la promotion des énergies renouvelables, crée une forte dynamique régionale. Des investissements préliminaires et des préparatifs sont déjà visibles dans la région, ce qui indique l'émergence d'un marché concurrentiel dans la production d'hydrogène vert. et c'est en adoptant les politiques suivantes

**Programme national de développement des énergies renouvelables :** L'Algérie a mis en place un programme ambitieux visant à développer les énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire. Dans le cadre de ce programme, des installations de production d'hydrogène à partir d'énergie solaire sont prévues.



**Figure 3.4:** quelques villages qui alimentés et prévus en alimentation solaire en Algérie [112].

**Le potentiel solaire algérien :** est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découvert à **Hassi R'Mel**. En effet, des opportunités exceptionnelles se présentent au niveau de toute la région pour exploiter le gigantesque gisement d'énergie solaire du Grand Sahara, en utilisant l'hydrogène produit à partir de l'énergie solaire, vecteur énergétique propre et sécurisé, afin d'assurer l'approvisionnement énergétique nécessaire [113].

**Projets pilotes :** Plusieurs projets pilotes ont été lancés pour évaluer la faisabilité technique et économique de la production d'hydrogène à partir d'énergie solaire. Ces projets sont menés en collaboration avec des partenaires internationaux et impliquent la construction de centrales solaires photovoltaïques couplées à des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène.

- Le projet « Solari 1000 MW » consiste en la constitution de Sociétés de Projet (SPV) chargées de réaliser un projet de centrales solaires photovoltaïques d'une capacité totale de 1000 MWC réparties sur le territoire national algérien en lots de 50 à 300 MWC chacun, et dont l'échéancier de réalisation est précisé dans les documents de l'Appel d'Offres à Investisseurs.

- Les sites destinés à l'implantation des installations de production de l'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables seront mis à la disposition des sociétés de projet, par la Société Algérienne des Energies Renouvelables dénommée « SHAEMS, Spa »,
- La Société Algérienne des Energies Renouvelables « SHAEMS, Spa » est chargée par le Ministre de la Transition Energétique et des Energies Renouvelables, du traitement de l'Appel d'Offres à Investisseurs du Projet Solari 1000 MW, conformément à la décision n° 07 du 28 novembre 2021, pour la préparation et le traitement de l'appel d'offres à investisseurs, pour la réalisation dudit projet, conformément aux dispositions suivantes :
  - ✓ Les Sociétés de Projets seront chargées du développement, du financement, de la conception, de la fourniture d'équipements, de la construction, de l'exploitation et de la maintenance des centrales solaires photovoltaïques, de la réalisation des installations d'évacuation et de raccordement aux réseaux électriques des dites centrales ainsi que la commercialisation de l'électricité produite à partir de ces centrales et ce, conformément aux lois et réglementations en vigueur en Algérie ainsi qu'aux dispositions des documents contractuels [114].
  - ✓ La société SHAEMS s'associera dans ce Projet avec l'Investisseur retenu par une prise de participation au capital social des Sociétés de Projet, soit seule, soit en association avec des entreprises publiques et /ou privées. Les centrales solaires photovoltaïques de chacun des Lots seront développées par la Société de Projet attributaire du lot concerné.
  - ✓ La commercialisation de l'électricité produite se fera à travers un Contrat de Vente et d'Achat d'Electricité (Power Purchase Agreement PPA), conclu pour une durée d'exploitation de vingt-cinq ans (25) ans pour chacune des centrales, entre la Société de Projet et l'Acheteur désigné.

**Promotion de la recherche et du développement :** Le gouvernement algérien soutient la recherche et le développement dans le domaine de l'hydrogène à base d'énergie solaire. Des initiatives sont en place pour encourager les universités et les centres de recherche à mener des études et des expérimentations visant à améliorer les technologies de production d'hydrogène solaire.

**Sensibilisation et formation :** Des programmes de sensibilisation et de formation sont mis en œuvre pour informer le grand public sur les avantages de l'hydrogène vert et pour former une main-d'œuvre qualifiée dans ce domaine émergent .

### 3.5.2. Exemples de projets de production d'hydrogène solaire en Algérie

- **SONATRACH D'ORN : deux projets pilotes pour la production d'hydrogène vert**

ORAN - Le groupe SONATRACH compte lancer deux projets pilotes de production d'hydrogène vert au sud du pays en 2023 et 2024, a-t-on appris de son représentant au Salon ERA, Mohamed Boutouchent, cadre supérieur à la Direction centrale des ressources nouvelles [115].

"Ces projets pilotes auront pour objectif principal le développement d'une expertise et la maîtrise technologique sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène vert depuis la production, le stockage, le transport, jusqu'aux applications", a expliqué ce responsable, dans une déclaration à l'APS, en marge du Salon des énergies renouvelables, des énergies propre et du développement durable (ERA), qui prend fin mercredi 26 Octobre 2022? Au Centre des conventions "Mohamed Ben Ahmed" d'Oran.

### 3.5.3. Infrastructures nécessaires pour soutenir la production et l'utilisation de l'hydrogène solaire

Pour soutenir la production et l'utilisation de l'hydrogène solaire en Algérie, plusieurs infrastructures sont nécessaires.

**Centrales solaires photovoltaïques :** Les centrales solaires photovoltaïques sont essentielles pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité. Ces installations comprennent des panneaux solaires, des onduleurs et d'autres équipements nécessaires pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.

**Électrolyseurs :** Les électrolyseurs sont des équipements utilisés pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Ils prennent l'électricité générée par les centrales solaires photovoltaïques et l'utilisent pour diviser l'eau en hydrogène et en oxygène.

**Stockage de l'hydrogène :** Étant donné que l'hydrogène a une faible densité énergétique par unité de volume, un système de stockage efficace est nécessaire. Les infrastructures de stockage de l'hydrogène peuvent inclure des réservoirs à haute pression, des réservoirs cryogéniques ou des matériaux d'adsorption pour stocker l'hydrogène de manière sûre et efficace.

**Réseaux de distribution d'hydrogène :** Une fois produit, l'hydrogène doit être distribué vers les utilisateurs finaux. Des réseaux de distribution d'hydrogène doivent être mis en place pour acheminer l'hydrogène depuis les sites de production vers les stations de ravitaillement ou les industries qui l'utilisent.

**Stations de ravitaillement en hydrogène :** Les stations de ravitaillement en hydrogène sont

nécessaires pour fournir de l'hydrogène aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène, tels que les voitures à pile à combustible. Ces stations doivent être équipées d'infrastructures de stockage et de distribution appropriées pour permettre le ravitaillement en hydrogène.

**Réglementation et normes :** Pour soutenir le développement de l'hydrogène solaire en Algérie, il est essentiel d'établir des réglementations et des normes appropriées pour la production, le stockage, la distribution et l'utilisation de l'hydrogène. Cela garantira la sécurité, la qualité et l'interopérabilité des infrastructures liées à l'hydrogène.

Il convient de noter que le déploiement de ces infrastructures nécessite des investissements importants et une planification stratégique. Des partenariats public-privé peuvent être nécessaires pour mobiliser les ressources financières et technologiques nécessaires à la mise en place de ces infrastructures d'hydrogène solaire en Algérie.

### 3.6. Perspectives futures et recommandations

L'avenir de l'énergie solaire en Algérie est prometteur, grâce à son potentiel solaire abondant. Le pays est parfaitement situé pour exploiter davantage cette source d'énergie renouvelable. Voici quelques suggestions et orientations pour maximiser l'utilisation du potentiel solaire en Algérie :

Les perspectives futures pour l'Algérie dans le domaine de l'énergie renouvelable sont prometteuses. Le gouvernement algérien prévoit d'investir entre 20 et 25 milliards de dollars US dans la production d'hydrogène vert

L'Algérie dispose d'un important potentiel en énergie solaire, avec une estimation de 2000 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie solaire dans le sud algérien

L'Algérie veut atteindre 15 000 MW d'énergie solaire d'ici à 2035 pour diversifier son mix énergétique. Les chercheurs algériens travaillent sur la production d'hydrogène vert, qui est présenté comme une énergie d'avenir

L'Algérie a signé un partenariat avec l'Allemagne pour produire et exporter de l'hydrogène vert très demandé. Les recommandations pour l'Algérie seraient de continuer à investir dans les énergies renouvelables, en particulier dans la production d'hydrogène vert, pour diversifier son mix énergétique et réduire sa dépendance aux hydrocarbures.

### 3.6.1. Perspectives de développement de l'hydrogène solaire en Algérie

L'Algérie a de grandes ambitions dans le développement de l'hydrogène solaire. Le potentiel de l'hydrogène solaire dans le sud algérien est énorme. Le gouvernement algérien a proposé un projet dans la déclaration d'Alger sur l'hydrogène pour les énergies renouvelables en 2005, et le nouveau plan d'action "Transition énergétique" prévoit la production d'hydrogène vert. La Feuille de route Hydrogène vise à faire de l'Algérie un pays pionnier dans la production et la commercialisation de cette nouvelle énergie. L'Algérie veut fournir 10% des besoins en hydrogène du marché européen d'ici 2040. L'hydrogène vert est conçu comme un vecteur énergétique capable de stocker l'électricité produite par des panneaux solaires en hiver.

L'Algérie se fixe des objectifs ambitieux pour exploiter le potentiel de l'hydrogène solaire, en mettant l'accent sur la production d'hydrogène vert. Avec ses ressources solaires et éoliennes abondantes, le pays a la possibilité de jouer un rôle majeur dans cette industrie émergente, tout en contribuant à la transition énergétique vers des solutions plus durables.

Le pays peut produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire, ce qui offre plusieurs avantages :

- Utilisation de l'énergie renouvelable
- Diversification du mix énergétique
- Exportation de l'hydrogène
- Développement de l'industrie de l'hydrogène

### 3.6.2. Recommandations pour stimuler la production d'hydrogène solaire en Algérie

Voici quelques suggestions visant à favoriser la production d'hydrogène solaire en Algérie :

- Investir dans la recherche et le développement afin d'améliorer les technologies de production d'hydrogène solaire et de réduire les coûts de production.
- Encourager les investissements étrangers dans la production d'hydrogène solaire en Algérie.
- Mettre en place des politiques incitatives pour encourager les entreprises à investir dans la production d'hydrogène solaire en Algérie.
- Établir des partenariats avec d'autres pays en vue d'exporter l'hydrogène vert produit en Algérie.
- Développer les infrastructures nécessaires à la production, au stockage et à la distribution de l'hydrogène solaire.
- Former des professionnels qualifiés pour travailler dans le secteur de l'hydrogène solaire.

- Sensibiliser la population aux avantages de l'hydrogène vert et encourager son utilisation dans les secteurs des transports et de l'industrie.
- Mettre en place des réglementations favorables pour promouvoir l'utilisation de l'hydrogène vert dans l'industrie et les transports.
- Encourager la coopération entre les différents acteurs du secteur de l'hydrogène solaire en Algérie afin de stimuler la production et la commercialisation de cette nouvelle forme d'énergie.
- Promouvoir l'hydrogène vert en tant qu'alternative propre et durable aux combustibles fossiles.

# CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

---

En conclusion, ce mémoire a examiné le potentiel de production d'hydrogène solaire en Algérie en mettant l'accent sur trois aspects clés : les généralités sur la production d'hydrogène, les techniques de production d'hydrogène à base de toutes les énergies renouvelables, et la production d'hydrogène à base d'énergie solaire en Algérie.

Nous avons constaté que l'hydrogène solaire présente un grand potentiel en tant que vecteur énergétique propre et durable. L'utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène permet de minimiser les émissions de gaz à effet de serre et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. L'Algérie, avec son ensoleillement optimal et son potentiel solaire abondant, est bien placée pour tirer parti de cette source d'énergie renouvelable.

Les différentes techniques de production d'hydrogène à base de toutes les énergies renouvelables ont été étudiées, mettant en évidence les avantages et les inconvénients de chaque méthode. Cependant, la production d'hydrogène solaire se distingue par son aspect écologique et durable, offrant des opportunités de développement économique et technologique.

En se concentrant spécifiquement sur la production d'hydrogène solaire en Algérie, nous avons souligné l'importance de l'évaluation du potentiel solaire du pays. L'Algérie dispose d'un environnement propice à la mise en place de centrales solaires photovoltaïques et de centrales solaires thermiques pour la production d'hydrogène. Cependant, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour développer les infrastructures nécessaires, telles que les électrolyseurs, les systèmes de stockage et les réseaux de distribution, afin de soutenir la production et l'utilisation de l'hydrogène solaire.

En fin de compte, l'Algérie peut jouer un rôle clé dans la transition mondiale vers une économie de l'hydrogène durable en exploitant son potentiel solaire considérable. La production d'hydrogène solaire peut contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la création d'emplois verts et à la promotion de l'indépendance énergétique. En poursuivant les efforts dans ce domaine, l'Algérie peut devenir un acteur majeur dans le secteur de l'hydrogène solaire, tout en contribuant à un avenir énergétique plus propre et plus durable.



## Références Bibliographiques

- [1] Université Libre de Bruxelles, Institut de Gestion de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, Faculté des Sciences, «Mémoire de Fin d'Etudes» Etude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie», présenté par VISEUR, Mathieu .
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification\\_du\\_charbon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification_du_charbon)
- [3] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/elevés/bv/chimie/1-electrolyse-de-l-eau-c1057>.
- [4] <https://demaco-cryogenics.com/fr/blog/du-reformage-du-methane-a-la-vapeur-a-lhydrogene-vert/>
- [5] <https://books.openedition.org/igpde/4951?lang=fr>.
- [6] [https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/full\\_html/2019/01/ogst180300/ogst180300.html](https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/full_html/2019/01/ogst180300/ogst180300.html).
- [7] MelleMaouche Rima « Production de l'hydrogène à base d'un système de conversion éolienne» ,Mémoire de master, université A. Mira, Bejaia 2021/2022.
- [8] <http://énergies.airliquide.com/sites/abt>.
- [9] Pasquale Corbo, Fortunato Migliardini, and Ottorino Veneri. Hydrogen fuel cells for road vehicles. Springer London, London, 2011.
- [10] <https://coordinationsud.org/wp-content/uploads/Rapport-H2-DVLPmt-Final>.
- [11] R. Benchrif, D. Zejli, A. Bennouaet K. Zazi, « L'hydrogène combustible du futur CNRST», Disponiblesur, <HTTP://WWW.CNRST.MA/TEER/PUBLICATIONS/HYDROGENE.HTM>, 2009.
- [12] Zhiming ZHANG. Modélisation mécanique des interfaces multi-contacts dans une pile à combustible, thèse de doctorat, UEVE, 2010.
- [13] <HTTPS://ENERGIES.AIRLIQUIDE.COM/FR>.
- [14] Par BASSEM OURANE Recherche exploratoire de nouveaux intermétalliques ternaires à base de magnésium. Application au stockage d'hydrogène. THÈSE EN COTUTELLE PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX ET DE L'UNIVERSITÉ DE SFAX\_TUNISIE le 20/05/2014.
- [15] Youcef Bouhadda. Etude des hydrures pour une application de stockage de l'hydrogène Modélisation des propriétés électroniques et thermo-dynamiques par calcul ab initio. 06- 11-2014, 2014.
- [16] <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [17] Mémento de l'Hydrogène « liquéfaction, stockage et transport de l'hydrogène sous forme cryogénique » fiche 4.3 – révision de juillet 2011 source : afh2.
- [18] <https://coordinationsud.org/wp-content/uploads/Rapport-H2-DVLPmt-Final>.
- [19] International Journal of Hydrogen Energy, Volume 43, Issue 8, 2022 .<HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.IJHYDENE.2021.11.197>.
- [20] crowcon.com a été indexé pour la première fois par Google il y a plus de 10 ans. <https://www.crowcon.com/fr/blog/the-dangers-of-hydrogen>.
- [21] la base de données ARIA : <HTTPS://WWW.ARIA.DEVELOPPEMENT-DURABLE.GOUV.FR/>.
- [22] <https://www.workerslaw.com/posts/what-causes-workplace-explosions/>.
- [23] [http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/documents/Power\\_trains\\_for\\_Europe.pdf](http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/documents/Power_trains_for_Europe.pdf).
- [24] <https://www.energymagazine.dz.com/>. WORKSHOP A ALGER : « Le développement de l'hydrogène vert est l'une des priorités du gouvernement ».

- [25] [HTTPS://WWW.H2LIFE.ORG](https://www.h2life.org).
- [26] Recherche et développement Les méthodes de production d'hydrogène. [HTTPS://NEW.SOCIETECHIMIQUEFRANCE.FR](https://new.societechimiquefrance.fr).
- [27] [HTTPS://HYDROLUX.CA/50-NUANCES-DHYDROGENE/](https://hydrolux.ca/50-nuances-dhydrogene/).
- [28] <https://demaco-cryogenics.com/fr/blog/la-densite-energetique-de-lhydrogene-une-propriete-unique/>.
- [29] Chaire Développement durable Environnement, Énergie et Société, Chaire annuelle – Année académique 2010-2011, L'hydrogène est un excellent carburant, [HTTPS://WWW.COLLEGE-DE-FRANCE.FR/MEDIA/JEAN-MARIE-TARASCON/UPL58650\\_HYDROGENECOLLEGE.PDF](https://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL58650_HYDROGENECOLLEGE.PDF).
- [30] Bicakova O, Straka P.: Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness, *Int J Hydrogen Energy*, 37:11563e78(2012).
- [31] Abbas, H. F., and Daud, W. M. A. W. Thermocatalytic decomposition of methane for hydrogen production using activated carbon catalyst: Regeneration and characterization studies. *Int.J. Hydrogen Energy*, vol. 34, p 8034 (2009).
- [32] [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://theses.hal.science/tel-00923169/document](https://theses.hal.science/tel-00923169/document) PAGE 15
- [33] Pierre MILLET, Électrolyseurs de l'eau à membrane acide, *Technique de l'Ingénieur*, Référence J4810
- [34] SGC, 2013. Power to Gas - a technical review (No. 2013:284). SGC, Malmö.
- [35] J.Ivy - Summary of Electrolytic Hydrogen Production- Milestone Completion Report – NREL Appendix A: Overview of current Electrolysis Systems- p18 -21
- [36] Müller-Syring, G., Köppel, W., Mlaker, H., Sterner, M., Höcher, T., 2013. Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. DVGW
- [37] Baurens, P., 2013. Interview CEA-Liten.
- [38] Petitpas, F., 2013. Electrolyseurs du futur (SOEC). *La Recherche – Hydrogène*- Franck Barnu- Novembre 2013/ N°481/3
- [39] De Saint Jean, M., 2013. Power-to-gas process with high temperature electrolysis and CO<sub>2</sub> methanation - CEA. / Wix, C., 2013. Power upgraded biogas - the catalytic way.
- [40] Site internet : <https://www.hydrogene.com/>
- [41] EASE, EERA, 2013. Joint EASE/EERA recommendations for a European Energy Storage Technology Development Road map towards 2030
- [42] Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire- Septembre 2014- 11 p. - 238 p.- EE Consultant, HESPUL, SOLAGRO
- [43] Gahleitner, G., 2013. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 2039–2061. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.010
- [44] J. Labbé ; "L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés" ; Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [45] A. Labouret et M. Villos ; "Energies solaire photovoltaïque : Manuel du professionnel" ; Dunod, Paris, 2003.
- [46] H. Ibrahim (2010) « Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé » Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi.
- [47] Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Nantes sous le sceau de l'Université Bretagne Loire, "Association d'un procédé de gazéification avec une pile à combustible

- haute température (SOFC) pour la production d'électricité à partir de biomasse". Soutenue le 17 octobre 2016 , file:///C:/Users/sony/Downloads/fix\_8lxi2Udg.pdf.
- [48] <http://www.gazeification.info/>
- [49] <https://soclema.com/applications/gaz-renouvelables/syngaz-issu-de-la-gazeification-de-la-biomasse/>
- [50] article de Mr: Eugene Taylor " Différence entre la pyrolyse et la gazéification" , Date De Création: 12 Août 2021. <https://fr.strephonsays.com/pyrolysis-and-gasification-2745>.
- [51] <https://www.ragt-energie.fr/fr/biomasse/avantages-biomasse.php>.
- [52] <https://www.hydrogene.discoverthegreentech.com/production-hydrogene/pyrogazeification-pyrolyse-thermolyse-biomasse/>
- [53] REGULAR ARTICLE Production d'hydrogène par procédés biologiques "Sabah Menia , Ilyes Nouicer , Yasmina Bakouri , Abdelhamid Mraoui , Hammou Tebibel , and Abdallah Khellaf " . Centre de Développement des Energies Renouvelables , BP 62 , Route de l'Observatoire , Bouzareah , 16340 Alger, Algérie. Recevriez : 19 Septembre 2018 / Accepté: 10 Décembre 2018. <https://hal.science/hal-02294246/document>.
- [54] article "L'hydrogène renouvelable à partir de biomasse se concrétise". <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-hydrogene-renouvelable-partir-biomasse-concretise-20723/>.
- [55] Ressourcesnaturellesducanada,Lessystèmesphotovoltaïques(guidedel'acheteur) divisiondel'énergierenouvelableetélectrique,n°M92-28/2001F,Ottawa,Canada2002.
- [56] <https://www.futura-sciences.com/>
- [57] A.Labouret,M.Villoz, Energiesolairephotovoltaïque (Lemanuel duprofessionnel), éditionDUNOD,août2003, Paris(France).
- [58] <https://www.ssf-asso.org/systemes-pv-autonomes/>
- [59] Abou El-MaatyMetwallyMetwallyAlyAbd El-Aal. Modelling and simulation of a photovoltaicfuelcellhybridsystem,Thèsededoctoratdel'UniversitédeKassel,Germany,2005.
- [60] I.Vechiu,Modélisationetanalysedel'intégrationdesénergiesrenouvelablesdansunréseauautonome, Thèse de doctoratdel'université duHavre,2005.
- [61] Un matériau capable de produire de l'hydrogène à partir de lumière solaire PUBLIÉ LE 01 AVR 2022 À 20H00 MODIFIÉ LE 30 DÉCEMBRE 2022
- [62] <https://www.pv-magazine.fr/2022/11/17/produire-de-lhydrogene-vert-a-partir-de-la-lumiere-du-soleil-et-de-lhumidite-de-lair/>
- [63] STOCKAGE ET PRODUCTION D'ENERGIE : L'HYDROGENE FAIT MIEUX 27 February 2022 Construction durable, Hydrogènesolaire, Microgrid, Publication techniqueCONSTRUCTION& BATIMENT – N°1 – Février – Mars 2022 –
- [64] Article scientifique, by ELENA Martine crée le 4 MAI 2023 « LES BATTERIES ET L'HYDROGÈNE EN COMPLÉMENT DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE » <https://www.narasolar.com/fr/les-batteries-et-lhydrogene-en-complement-de-lenergie-photovoltaïque/>
- [65] Carlos Moedas, Commissaireeuropéen à la recherche, à l'innovation et à la science, crée le 15 octobre 2019 <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/horizon-europe-le-programme-cadre-europeen-pour-la-recherche-et-l-innovation-2021-2027-46399>.
- [66] Une nouvelle famille de matériaux pour la production solaired'hydrogènerenouvelablePublished: June 15, 2022 8.25pm SAST

- [67] L'électrolyse avec de l'eau de mer est compliquée, car le sel entraîne la corrosion des électrodes de l'électrolyseur et diminue le rendement de conversion (IRENA, 2020). D'ailleurs, pour produire de l'hydrogène "vert", des investissements dans des capacités de dessalement sont nécessaires (Pflugmann and Blasio, 2020).
- [68] Vu le manque actuel d'installations d'envelopées pour l'hydrogène, il faut se fier sur l'état de l'infrastructure existante (en gaz naturel par exemple) d'un pays pour estimer sa capacité à construire et à exploiter la production, le transport et la distribution d'un nouveau vecteur énergétique
- [69] Article by Rym Loucif, Partner at Loucif + Co, Algeria, Exploratory study on the potential of green hydrogen for Algeria  
<https://lexafrica.com/2022/02/exploratory-study-on-the-potential-of-green-hydrogen-for-algeria/>
- [70] L'atelier de lancement d'une étude pionnière sur le potentiel de l'Algérie en hydrogène vert s'est tenu le 15 février 2021. Merouane Chabane sur le site <https://www.energy-partnership-algeria.org/home/ptx-green-hydrogen/>
- [71] Hydrogen production method opens up clean energy possibilities Date May 23, 2022 Source Washington State University
- [72] CREG. Programme de Développement des Energies Renouvelables 2015–2030. <http://www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg15mars.pdf>.
- [73] article réalisé par Fabienne LEROY , Le 27/05/2021, " Produire de l'hydrogène décarboné : enjeu industriel ou véritable leurre ? " , <https://www.batirama.com/article/40937-produire-de-l-hydrogene-decarbone-enjeu-industriel-ou-veritable-leurre.html>.
- [74] les coûts de production de l'hydrogène « vert » pourraient être divisés par 3 entre 2018 et 2050. (©Connaissance des Énergies, d'après Irena). <https://www.connaissancedesenergies.org/hydrogene-perspectives-pour-les-energies-renouvelables-220218#notes>.
- [75] L'énergie hydraulique, qu'est-ce que c'est ? Publié le 21/11/2019  
<https://particuliers.engie.fr/pourquoi-choisir-engie/conseils-transition-energetique/conseils-energies-renouvelables/l-energie-hydraulique--qu-est-ce-que-c-est----.html>  
L'énergie hydraulique .
- [76] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-hydraulique-6659/>
- [77] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique>
- [78] article « L'hydrogène – une source d'énergie alternative exempte de CO2 »  
<https://www.alpiq.com/fr/production-denergie/production-dhydrogene>
- [79] article « Les cinq choses que les investisseurs devraient savoir à propos du potentiel de l'hydrogène à l'échelle mondiale » publié le 20/04/2021
- [80] <https://www.ecosources.org/production-hydrogene>
- [81] article « Voici comment ce barrage suisse produira de l'hydrogène » écrit par Lorraine VERON le 15 Avril 2022
- [82] L'hydrogène – une source d'énergie alternative exempte de CO2  
<https://www.alpiq.com/fr/production-denergie/production-dhydrogene>
- [83] Hydrogène vert

- <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/production-appvisionnement-distribution/hydrogene-vert>
- [84] Article mis à jour le 27 septembre 2022 « L'ÉNERGIE HYDROGÈNE EST-ELLE UNE ALTERNATIVE AUX ÉNERGIES FOSSILES ? »
- [85] Energy Stream Le blog énergie des consultants Wavestone
- [86] Umran Inan, M. G, Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists. Cambridge, p286 (2011).
- [87] I. B. Denysenko, S. Xu, J. D. Long, P. P. Rutkevych, N. A. Azarenkov et al ,Inductively coupled Ar/CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> plasmas for low-temperature deposition of ordered carbon nanostructures, Appl. Phys., Vol. 95, No. 5(2004).
- [88] Fridman, A. A, Plasma chemistry. Cambridge University Press: Cambridge; New York, p 1-11. (2008).
- [89] thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat , Présentée par : KHADIR Nawal " Production d'Hydrogène par Plasma Froid riche en Hydrocarbure, Application aux Piles d'Hydrogène " , université d'oran , 2017—2018 .page 17.
- [90] M. P. Harold, B. Nair, G. Kolios «Hydrogen generation in pd membrane fuel processor, assessment of methanol-based reaction systems» Chem. Eng. Sci., 58 2551-2571 (2003).
- [91] A. Basile, L. Paturzo «An experimental study of multilayered composite palladium membran reactors for partial oxidation of methane to syngas» Catal. Today, 67 55-64( 2001).
- [92] B. Eliasson et W. Egli, Helv .Phys. Acta, 60, 241-47(1987).
- [93] DOE P UBLICATION: The hydrogen, fuel cells, and infrastructure technologies (hfccit), program multi-year program plan, may 1.Rapport technique, United States Department of Energy (2003).
- [94] Une technique pour obtenir de l'hydrogène "propre" grâce à l'énergie solaire écrit par Colombe Henrion le 14.04.2021
- [95] hydrogène est parfois présenté comme l'énergie propre de demain. Et l'Agence internationale de l'énergie l'a assuré en 2019, il doit jouer un rôle clé dans la transition énergétique. Associé à une pile à combustible, il apparaît en effet sans émission locale de CO<sub>2</sub>. Mais le bilan de son utilisation n'est pas aussi simple.
- [96] Article « Vers une production algérienne de l'hydrogène vert à coûts compétitifs? » écrit par Hakima Bedouani est Publié le 11 mai 2022
- [97] Par Cyril Fournieris • Mise à jour: 05/10/2022 article Énergies renouvelables : les grandes ambitions de l'Algérie dans le solaire et l'hydrogène vert
- [98] <https://elwatan-dz.com/developpement-de-lhydrogene-lalgerie-affiche-ses-ambitions>
- [99] article « Produire de l'hydrogène avec l'énergie solaire » publié le 5 mai 2019  
<https://www.transitionsenergies.com/produire-hydrogene-energie-solaire/>
- [100] Une nouvelle famille de matériaux pour la production solaire d'hydrogène renouvelable Published: June 15, 2022 8.25pm SAST
- [101] PDF « L'hydrogène, vecteur énergétique solaire » fait le janvier 2007
- [102] article Un panneau solaire divise l'eau pour produire de l'hydrogène le Janvier 11, 2021
- [103] A. Ferriere et G. Flamant : 'Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration'. IMP-CNRS, Centre du Four Solaire, 2004.
- [104] Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003) 73-77 Estimation de la Production de l'Hydrogène Solaire au Sud Algérien
- [105] ONS, "Rapport synthétique 1960-1990", 1990

- [106] A. Mefti et M. Bouroubi, “Estimation et cartographie du Rayonnement solaire”, Rapport technique (1992) CDER, Bouzareah, Alger
- [107] LH2R: ‘*Cycle H2 Renouvelable*’. Projet de Coopération entre Structures de Recherche du Centre de Développement des Energies Renouvelables Et Ministère de l’Aménagement du Territoire et de l’Environnement, Janvier 2005, Algérie.
- [108] A. Ainouche: ‘*Natural gas and Algerian strategy for renewable energy*’. 23rd World GAS Conference, Amsterdam, 2006.
- [109] M. A. Elhadidy, “Performance evaluation of hybrid (wind/solar/diesel) power systems”, *Renewable Energy* 26(2002)401-413.
- [110] J. H. R. Enslin and D. B. Snyman, “Combined low-cost, high efficiency inverter, peak power tracker and regulator for PV applications”, *IEEE Trans. Power Electron* 6, 2(1991)73-82
- [111] Algérie presse service ,le 23/03/2023 ,Article ( Energie: réunir les conditions nécessaires au développement de la filière de l’hydrogène). <https://www.aps.dz/economie/153610-energie-reunir-les-conditions-necessaires-au-developpement-de-la-filiere-de-l-hydrogene>.
- [112] Fiche pays Algérie État : octobre 2014 réalisé par Karl Kramer <https://docplayer.org/114596594-Laenderprofil-algerien.html>.
- [113] *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2 (2007) 181 – 190 ,Les potentialités d’exploitation d’hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro – maghrébin ,Partie I: Phase d’étude d’opportunité et de faisabilité, Laboratoire de Mécanique, Université 8 Mai 45, Guelma, Algérie. Centre de Développement des Energies Renouvelables,
- [114] Le marché solaire PV en Algérie. [https://www.energypartnershipalgeria.org/fileadmin/user\\_upload/algeria/220323\\_Brochure\\_de\\_march%C3%A9\\_PV\\_en\\_Alg%C3%A9rie\\_FR\\_rev03.pdf](https://www.energypartnershipalgeria.org/fileadmin/user_upload/algeria/220323_Brochure_de_march%C3%A9_PV_en_Alg%C3%A9rie_FR_rev03.pdf)
- [115] Sonatrach : deux projets pilotes pour la production d’hydrogène vert, article publié le 26 Octobre 2022 sur le site . <https://www.aps.dz/economie/146701-sonatrach-deux-projets-pilotes-pour-la-production-d-hydrogene-vert>

Ce mémoire porte sur le potentiel de production d'hydrogène solaire en Algérie, une source d'énergie propre et prometteuse pour répondre aux besoins futurs tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Il examine les principes fondamentaux de la production d'hydrogène, les différentes méthodes utilisées, les sources d'énergie renouvelable pour la production d'hydrogène, et met en évidence le potentiel solaire de l'Algérie. L'utilisation d'énergie solaire pour produire de l'hydrogène permet de minimiser les émissions de gaz à effet de serre et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. L'Algérie, avec son ensoleillement optimal, est bien placée pour tirer parti de cette source d'énergie renouvelable. Cependant, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour développer les infrastructures nécessaires à la production et à l'utilisation de l'hydrogène solaire. En exploitant son potentiel solaire considérable, l'Algérie peut jouer un rôle clé dans la transition mondiale vers une économie de l'hydrogène durable, contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la création d'emplois verts et à la promotion de l'indépendance énergétique.

This dissertation focuses on the potential of solar hydrogen production in Algeria, a clean and promising energy source to meet future energy needs while reducing greenhouse gas emissions. It examines the fundamental principles of hydrogen production, the different methods used, renewable energy sources for hydrogen production, and highlights Algeria's solar potential. The use of solar energy to produce hydrogen minimizes greenhouse gas emissions and reduces dependence on fossil fuels. With its optimal sunlight conditions, Algeria is well-positioned to leverage this renewable energy source. However, additional efforts are needed to develop the necessary infrastructure for solar hydrogen production and utilization. By harnessing its considerable solar potential, Algeria can play a key role in the global transition to a sustainable hydrogen economy, contributing to greenhouse gas emissions reduction, green job creation, and the promotion of energy independence.

تركز هذه الأطروحة على إمكانات إنتاج الهيدروجين الشمسي في الجزائر، وهو مصدر نظيف وواعد للطاقة لتلبية الاحتياجات المستقبلية مع تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، تدرس هذه الأطروحة أساسيات إنتاج الهيدروجين، والأساليب المختلفة المستخدمة، ومصادر الطاقة المتجددة لإنتاج الهيدروجين، وتسلط الضوء على إمكانات الجزائر الشمسية. يساهم استخدام الطاقة الشمسية في إنتاج الهيدروجين في التقليل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والاعتماد على الوقود الأحفوري. تتمتع الجزائر بفضل اشعة الشمس المثلى، بإمكانات كبيرة للاستفادة من هذا المصدر المتجدد للطاقة. ومع ذلك تحتاج إلى جهود إضافية لتطوير البنية التحتية اللازمة لإنتاج واستخدام الهيدروجين الشمسي. عن طريق استغلال إمكاناتها الكبيرة من الطاقة الشمسية، يمكن للجزائر أن تلعب دوراً رئيسياً في التحول العالمي نحو اقتصاد الهيدروجين المستدام، والمساهمة في تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وخلق فرص عمل خضراء، وتعزيز الاستقلال الطاقوي.