

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université A.MIRA– BEJAIA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique

Filière : Electromécanique

Mémoire de Fin d'études

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

Spécialité: Electromécanique

Thème:

Etude et production d'hydrogène vert

Présenté par :

Bouzidi Yanis

Founas Anis

Encadré par:

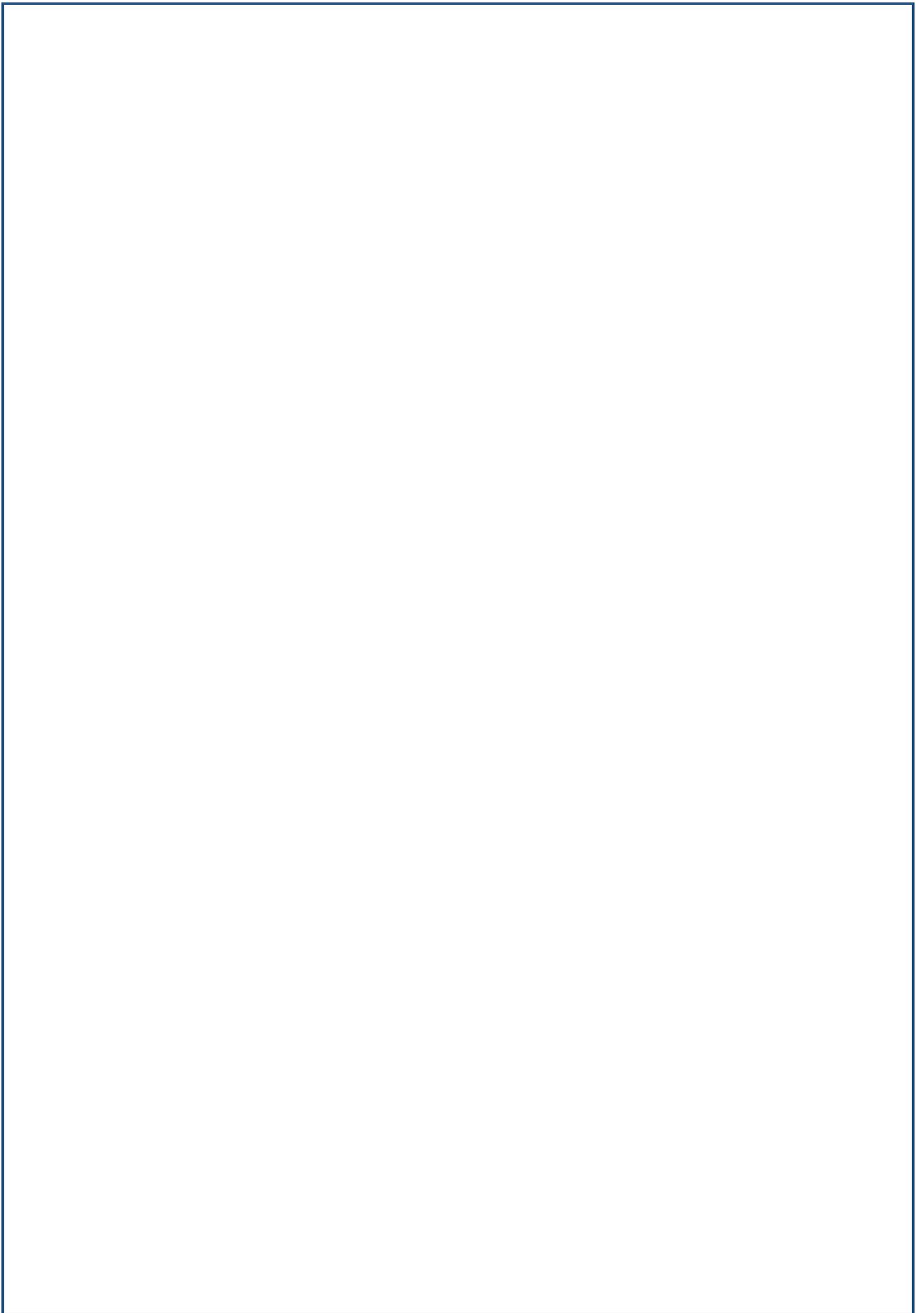
Mr Mebarki Youcef

Soutenu le: 21/09/2022

Devant le jury: Mr Mohamedi (Président du jury)

Mme Mokrani (Jury)

Année universitaire: 2021/2022



Remerciements

En premier lieu, nous remercions le bon Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté durant nos études et pendant la réalisation de ce projet.

Nous sommes reconnaissants envers Mr.Mebarki pour son encadrement.

Comme nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et juger notre travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements particuliers à nos familles pour nous avoir soutenus, accompagnés et nous avoir permis d'en arriver là.

Enfin, un très grand merci à tous nos amis pour leur aide et leurs encouragements, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre modeste travail.

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etude de l'hydrogène

I.1. Généralités	4
I.1.1. Introduction	4
I.1.2. historique	6
I.1.3. L'intérêt a l'hydrogène.....	10
I.2. Production d'hydrogène	12
I.2.1. Vaporeformage du gaz naturel.....	12
I.2.2. Pyrogazeification	13
I.2.3. Electrolyse	14
I.3. Stockage et transport	15
I.3.1. Stockage	16
I.3.1.1 Stockage sous forme gazeux	16
I.3.1.2. Stockage sous forme liquide	17
I.3.1.3. Stockage sous forme solide	17
I.3.2. Transport.....	19
I.4. Difficultés	20
I.4.1. Consommation et perte de rendement.....	20
I.4.2. Dangerosité.....	22
I.4.2.1. Inflammations et explosions	22
I.4.2.2. Risques mécaniques.....	22
I.5. Etude énergétique	23
I.5.1. En tant que carburant.....	23
I.5.1.1. Energie	25
I.5.1.2. Emission.....	25
I.5.1.3. Autres paramètres	25
I.5.2. En tant que pile a combustible.....	26
I.5.2.1. Batteries	26
I.5.2.2. Energies renouvelables	29
I.6. Conclusion partielle.....	30
Chapitre II : Production de l'hydrogène par l'Electrolyse	
II.1. Généralités	32

II.1.1. Introduction sur l'électrolyse	32
II.1.2. Histoire de l'électrolyse.....	32
II.1.3. Procédés de l'électrolyse	33
II.2. Types d'électrolyses.....	34
II.2.1. Alcaline	34
II.2.2. Electrolyse à oxyde solide (SOEC)	34
II.2.3. Membrane échangeuse de protons (PEM)	35
II.2.4. Membrane échangeuse d'anions (AEM)	36
II.2.5. Electrolyse à action capillaire (CFE)	37
II.3. Comparaison et choix de la PEM.....	38
II.3.1. Comparaison et choix	38
II.3.2. Architecture de la PEM.....	41
II.4. Dimensionnement de l'électrolyseur	43
II.4.1. Etat de l'art sur les performances et consommations.....	43
II.4.2. Facteurs influents sur les performances de l'électrolyseur.....	44
II.4.2.1. Effets de la température	44
II.4.2.2. Effets de la pression.....	45
II.4.3. Dimensionnement de l'électrolyseur.....	46
II.4.3.1 Production d'hydrogène	47
II.4.3.2 Production d'hydrogène à haute pression	47
II.4.3.3 Production d'hydrogène à haute température	48
II.4.3.4 Rendement faradique.....	48
II.4.3.5 Estimation du taux de production d'hydrogène	51
II.4.4. Bilan de consommation électrique de l'électrolyseur	54
II.4.4.1 Equations thermodynamiques	54
II.4.4.2 Equations des potentiels électriques.....	56
II.4.4.3 Rendement énergétique	57
II.5. Conclusion partielle.....	58

Chapitre III : source d'alimentation électrique de l'électrolyseur

III.1. Généralités.....	60
III.1.1. Introduction	60

III.1.2. Définition de l'énergie photovoltaïque	60
III.1.3. Histoire de l'énergie photovoltaïque.....	61
III.1.4. L'intérêt au photovoltaïque	63
III.1.5. Fonctionnement des panneaux photovoltaïques.....	65
III.1.5.1. Matériaux utilisés	65
III.1.5.2. De la lumière a l'électricité.....	66
III.2. Types de technologies photovoltaïques	67
III.2.1. Monocristallin	67
III.2.2. Poly cristallin.....	68
III.2.3. Amorphe	69
III.2.4. Pérovskite.....	70
III.3. Groupements.....	71
III.3.1. Montage série	71
III.3.2. Montage parallèle	72
III.4. Production de panneaux solaires.....	73
III.5. L'énergie solaire en Algérie.....	74
III.6. Conclusion partielle	76

Chapitre IV : Couplage et dimensionnement du système PV-ELC

IV.1. Introduction	78
IV.2. Couplage	78
IV.3. Besoins en puissance.....	79
IV.4. Choix du panneau photovoltaïque	81
IV.5. Site et installation	82
IV.6. Conclusion partielle	84

Chapitre V : Utilisations de l'hydrogène dans le monde moderne

V.1. L'hydrogène dans l'industrie.....	86
V.1.1. Dans l'industrie chimique	86
V.1.2. Dans la métallurgie	86
V.1.3. En tant qu'apport en chaleur.....	87

V.2. L'hydrogène dans le stationnaire	87
V.2.1. Dans les piles à combustible	87
V.2.2. Dans les turbines	88
V.3. L'hydrogène dans la mobilité.....	90
V.3.1. Dans les piles à combustible	90
V.3.2. En tant que carburant.....	91
V.4. Conclusion partielle	93
Conclusion générale.....	94
Bibliographie	96
Annexes.....	101
Nomenclatures.....	103
Liste des figures.....	105
Liste des Tableaux.....	107

Introduction générale

L'approvisionnement énergétique mondial est aujourd'hui essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossiles et nucléaire. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques, les gazes à effet de serre, et les retombées radioactives liées au nucléaire, sont des phénomènes mis en cause dans le réchauffement climatique. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le moyen et long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la santé et le bien-être humain et sur l'économie mondiale.

L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable, provoquent une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergies renouvelables et non polluantes [1]. Ces dernières pourraient répondre à ce besoin mais leur attrait est limité par leur disponibilité intermittente et par l'absence d'un moyen de stockage adéquat de l'électricité. En effet, les batteries ne sont pas adaptées au stockage à long terme d'énergie car leurs processus de fabrication est polluant et leurs durée de vie laisse à désirer [2]. L'hydrogène associé aux piles à combustibles pourrait donc les remplacer partiellement ou totalement comme tampon énergétique. Surtout s'il est produit a partir d'énergies vertes.

L'objectif de notre mémoire est d'expliquer le fonctionnement de la méthode de production d'hydrogène la plus propre et la plus prometteuse du marché actuel. Cette méthode qui n'est autre que l'électrolyse de l'eau, requiers une certaine quantité d'énergie électrique que nous allons produire en utilisant le rayonnement solaire.

A travers les cinq chapitres que comprend notre mémoire, nous évoqueront en premier lieu l'intérêt que suscite l'hydrogène et les raisons qui nous ont poussé a choisir ce gaz. L'électrolyse sera le centre du deuxième chapitre, s'en suivra une comparaison entre les différentes technologies de cette dernière. Au 3eme chapitre, nous traiterons du domaine de l'énergie solaire, plus précisément du photovoltaïque. Le 4eme chapitre sera donc, dans la continuité des idées, le couplage du système photovoltaïque avec l'électrolyseur. C'est donc dans ce chapitre- là, que la modélisation de notre installation aura lieu. Le dernier chapitre

quant a lui, sera consacré à l'utilisation de l'hydrogène et ses applications dans les différents secteurs d'activité.

CHAPITRE I : Etude de l'Hydrogène

I.1 Généralités

I.1.1 Introduction

L'hydrogène (H) est l'élément le plus simple, le plus léger et le plus abondant qui soit dans l'univers. Sa structure atomique se compose d'un proton dans son noyau et d'un électron dans son atome, il peut donc se lier à pratiquement tous les éléments tels que l'oxygène dans le cas de l'eau, le carbone dans le cas du gaz naturel, l'azote dans le cas de l'ammoniac, et d'abord à lui-même pour former la molécule de dihydrogène (H₂). De par sa nature, il n'existe pas seulement sur la Terre, mais il est aussi abondant dans les planètes et les étoiles. Il compose de 75% la masse de toute la matière dans les galaxies. A titre d'exemple, Jupiter est constitué de 99,8% d'hydrogène et d'hélium. Cependant, il n'existe pas de gisement sur terre, contrairement aux hydrocarbures, permettant d'extraire l'hydrogène directement. L'hydrogène n'est donc pas une source d'énergie primaire mais plutôt un vecteur énergétique [3].

Lorsque l'hydrogène se libère dans l'atmosphère, il est si léger qu'il flotte et se disperse immédiatement. Cela signifie qu'un déversement accidentel d'hydrogène ne produit pas de flaques sur le sol, ne contamine pas les eaux souterraines et n'est pas absorbé par les vêtements. À l'état normal, c'est à dire, gazeux, l'hydrogène est incolore, inodore, sans saveur et non toxique, ce qui le rend différent de tous les carburants d'utilisation courante. Entre autre, il présente divers propriétés qui le caractérisent telles que [4]:

- Incolore, inodore et non toxique;
- Très inflammable dans l'air: 4% à 74,5% (20°C et 1atm);
- Brûle avec une flamme peu visible et détone facilement;
- Plus léger que l'air;
- Réducteur très puissant;
- Masse molaire : 2,016 g;
- Masse volumique : 0,085 Kg/m³ ;
- Densité gazeuse à 20,3°K: 1,34 Kg/Nm³ et à 273°K: 0,08988 Kg/m³ ;
- Température d'ébullition (1atm) : -252,7°C;
- Pouvoir calorifique inférieur : 2570 KCal/m³ (pris à 0°C et 1,013 bar absolue);
- Energie d'évaporation : 445 KJ/Kg;
- Energie théorique de liquéfaction : 14112 KJ/Kg;
- Energie d'inflammation : 0,020 mJ;

- Chaleur spécifique C_p : 14,3 KJ/Kg K;
- Chaleur spécifique C_v : 10,3 KJ/Kg K;
- Température d'auto inflammation dans l'air : 858 K ;
- Electronegativité (Pauling) : 2,1;
- Coefficient de diffusion dans l'air : 0,61 cm/s;
- Vitesse de flamme dans l'air : 260 cm/s;
- Vitesse de détonation dans l'air : 2,0 Km/s
- Distance moyenne entre les nucléons H₂: 0,074nm;
- La température de fusion à la pression de 101,33 kPa : 13,8K;
- La solubilité dans l'eau à 101,33kPa et 298°K : 0,019m³ /m³ ;
- La conductance ionique de la dilution des ions H⁺ dans l'eau à la température de 298°K : 0,035 m³mol⁻¹Ω⁻¹ ;
- 1Kg d'hydrogène correspond à:14,08 litre (volume liquide mesuré à la température d'ébullition et à la pression de 1,013bar) et : 11,74 m³ (volume de gaz mesuré à 1,013bar et 15°C) ;

Pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence il faut 4,6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bars. L'hydrogène possède un large domaine d'inflammabilité (4%-75%). Son énergie d'inflammation est environ 10 fois inférieure à celle des hydrocarbures classiques. Par contre, sa température d'auto inflammation est plus élevée (858°K). La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et très chaude (2000°C). [5]

Sur le plan international, les chefs de file sont le Japon (tant en mobilité qu'en cogénération résidentielle) et les États-Unis (Californie), l'Allemagne et la Corée du sud, puis la France, les autres États apparaissant moins engagés. Depuis une vingtaine d'années, le Japon développe en parallèle toutes les pistes, voyant dans l'hydrogène une source d'indépendance énergétique et de croissance à l'export (comme la Corée) plus que de décarbonation en soi de son économie, au moins à court terme [6]. Il est aujourd'hui leader en matière de véhicules et cogénération résidentielle. L'Allemagne, outre une forte culture en matière de mobilité, considère l'hydrogène comme un moyen de stockage de l'électricité «Excédentaire» issue du développement des énergies renouvelables intermittentes. Le marché de la mobilité est mondial et hautement concurrentiel si bien que les leaders mondiaux ne

cessent de réaliser progressivement les infrastructures afin d'amorcer le développement des véhicules à hydrogène [7].

I.1.2 Historique

La découverte de l'hydrogène gazeux est née des doutes soulevés par les observations des anciens scientifiques et philosophes. En effet, Philippus Theophrastus Aureolus Bombastus von Hohenheim, médecin alchimiste et philosophe qui vécut à Salzbourg (1493-1541), mit en évidence un dégagement de gaz lors de la réaction du vitriol (acide sulfurique) sur du fer.

En 1671, Le chimiste physicien Irlandais Robert Boyle, père de la philosophie naturelle moderne, découvre la réaction entre la limaille de fer et les acides dilués, qui aboutit à la production d'un gaz qui va attiser la curiosité des chercheurs.

Le brillant Henry Cavendish, expose en 1766, un mémoire qu'il intitule "Sur les airs factices" dans lequel il démontre qu'il existe plusieurs types d'airs. Après les avoir isolés, Il nomme alors le plus léger d'entre eux "air inflammable".

En 1783, Antoine Lavoisier nomma alors ce gaz "Hydrogène" (du grec hydro, signifiant "eau", et gènes, signifiant "générateur") quand lui et Pierre-Simon Laplace reproduisirent la découverte de Cavendish selon laquelle l'eau était produite lorsque l'hydrogène était brûlé.

A cette même année fut le premier vol d'un être humain à bord d'un ballon à air chaud inventé par les frères Montgolfier (Joseph-Michel et Jacques-Étienne). Jacques Charles fut alors inspiré par cet aboutissement et décide de créer un ballon à gaz gonflé au dihydrogène avec lequel il survole une distance de 35 kilomètres à 3300 mètres au dessus du sol.

En 1785, Lavoisier arriva à combiner l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau.

Quelques années plus tard, en 1789. Grâce à une machine électrostatique et une bouteille de Leyde (précurseur du condensateur), Deimanet et Troostwijk purent effectuer l'électrolyse de l'eau mais sans parvenir à expliquer le phénomène constaté.

Un an plus tard, William Nicholson effectue la première décomposition de l'eau en oxygène et hydrogène par électrolyse à l'aide de la pile électrique inventée quelques jours auparavant. Cette dernière a pu fournir du courant électrique continu.

En 1838, William Robert Grove développe une batterie liquide qui utilisait une électrode de platine immergée dans de l'acide nitrique et une électrode de zinc dans du sulfate de zinc. Cette batterie a pu générer environ 12 ampères à 1,8 volts.

En 1842, William R. Grove invente la première pile à combustible qui utilisait la formation d'eau à partir d'hydrogène et d'oxygène gazeux pour générer du courant électrique.

En 1895, James Dewar montra que l'hydrogène pré-refroidi à -200°C et comprimé à 200 bar devenait liquide quand il est giclé à travers une buse fine. Il arriva à liquéfier l'hydrogène grâce à son invention: Le Vacuum Flask.

En 1900, le premier "Zeppelin" effectue son vol inaugural. Ce dernier est constitué de cellules contenant de l'hydrogène.

Constantin Tsiolkovski présente en 1903 son ouvrage intitulé "L'Exploration de l'espace cosmique à l'aide d'engins à réaction" dans lequel il met en équation le fonctionnement de la fusée propulsée par réaction, notamment par hydrogène et oxygène liquide.

En 1906 se déroule la première compétition aéronautique de course de ballons à gaz. Ces derniers étaient alimentés en hydrogène.

La première borne fournissant de l'hydrogène a été conçue à l'occasion de la course de ballons à gaz Gordon-Bennet qui eut lieu à Saint-Louis en 1907.

En 1909, l'hydrogène est produit selon le procédé Linde-Frank-Caro dont le principe de fonctionnement se base sur l'extraction par condensation de l'hydrogène et du dioxyde de carbone à partir de gaz à l'eau comprimé à 20 bar pompé dans un réacteur Frank-Caro.

Puis en 1913, les chimistes allemands Fritz Haber et Carl Bosch mettent au point le procédé Haber-Bosch de production industrielle d'ammoniac par reformage du méthane à la vapeur.

1914, les allemands attaquent l'Angleterre avec des zeppelins pouvant transporter jusqu'à 2 tonnes de bombes à une vitesse de 135 km/h.

A partir de 1920, Rudolf Erren convertit un nombre important de camions, bus, sous-marins et autres moteurs à combustion interne pour qu'ils fonctionnent à l'hydrogène dans toute l'Allemagne et l'Angleterre.

Quelques années plus tard, la première application massive d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne a été mise en œuvre par le lieutenant russe Boris Shelishch qui a converti des centaines de voitures à l'hydrogène pendant la Seconde Guerre mondiale.

1937, le zeppelin allemand Hindenburg se crache après avoir survolé l'atlantique vers les Etats-Unis 10 fois de suite. D'après les enquêtes, l'explosion du dirigeable est due à une décharge électrostatique météorologique et non pas à cause de l'hydrogène contenu dans ce dernier.

Lors de cette même année, l'Ohio met en place un système permettant de refroidir un turbo-générateur à l'aide de l'hydrogène.

En 1938, la première canalisation industrielle acheminant du dihydrogène est mise en service en Allemagne. Mesurant 210 km, cet hydrogénoduc est le plus long du monde.

En 1943, l'U.S. Air Force lance un programme de test à l'université de l'Ohio, qui a mené à l'utilisation d'hydrogène liquide comme carburant de fusée dans le programme spatial américain.

1^{er} novembre 1952: Explosion de Ivy Mike, la première bombe H.

1958, Les États-Unis créent la National Aeronautics and Space Administration (NASA) pilier mondial de l'exploration spatiale actuelle. L'utilisation de l'hydrogène liquide

est la plus répondeuse principalement pour la propulsion des fusées et comme carburant pour les piles à combustible.

1959, l'anglais Francis T. Bacon de l'Université de Cambridge construit la première pile à combustible hydrogène-air pratique.

1963, La première mise en pratique de la propulsion cryotechnique a été effectuée lors du vol de Atlas Centaur, une fusée propulsée par un moteur RL-10.

1973, Le développement de piles à combustible à hydrogène pour des applications commerciales conventionnelles a commencé son ascension suite au choc de l'approvisionnement et à l'embargo pétrolier de l'organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP).

1981, premier vol de la navette spatiale américaine grâce à son moteur principal à oxygène et hydrogène liquides.

1990: Première installation d'électrolyse solaire (Bayern, Allemagne)

1998, lancement du sous-marin Unterseeboot type 212 dont le système de propulsion anaérobie utilise des piles à combustible à membrane électrolyte polymère (PEM-FC)

1999: ouverture des premières stations de ravitaillement d'hydrogène européenne à Munich et à Hamburg.

2000, Ballard Power Systems présente la première pile à combustible à membrane polymère (PEM) prête pour la production pour les applications automobiles au Salon de l'auto de Détroit.

2003, George W. Bush met à disposition 1,2 milliard de dollars pour le développement de piles à combustible dans l'espoir de commercialiser des véhicules dont le carburant soit l'hydrogène.

2004: La marine allemande effectue les Essais en eaux profondes du premier sous-marin autonome propulsé par un moteur électrique alimenté par une pile à combustible à hydrogène.

2015: Le constructeur automobile Toyota commercialise à grande échelle la première voiture à hydrogène au monde.

2019: LA biotech française Athéna Recherche et Innovation développe un procédé de production d'hydrogène à partir des eaux usées issues principalement de l'industrie agroalimentaire [8,7,9,10,11,12].

I.1.3 L'intérêt pour l'hydrogène

L'hydrogène représente la forme énergétique la moins nocive pour l'environnement et est pour cela considéré comme le porteur potentiel d'énergie du futur.

Muni d'un cycle énergétique fermé, il rentre dans diverses applications, tels que la production d'électricité, le chauffage des habitats et la fourniture de carburant pour le transport.

Les réserves d'énergies fossiles étant très limitées, les énergies renouvelables sont sans doute le meilleur moyen de recourir à la diversification de production d'énergie. Cependant, ces sources d'énergies telles que le vent pour les éoliennes, et le rayonnement solaire pour les panneaux photovoltaïques; présentent un inconvénient majeur qui n'est autre que l'intermittence de leur disponibilité. Ces dernières n'étant pas constamment exploitables, nous nous trouvons donc face à la nécessité d'effectuer un stockage d'énergie.

Le type de stockage le plus répandu de nos jours est le stockage électrochimique tel que les batteries. Néanmoins, ces dernières sont lourdes, chères à produire et ont une durée de

vie limitée. Mais l'inconvénient le plus important se trouve dans les répercussions environnementales que peuvent engendrer celles-ci. En effet, l'exposition de l'individu aux batteries acide-plomb cause des pertes de mémoire, dégrade le système cardiovasculaire et peut même causer des fausses couches chez les femmes enceintes. [13]

Quant aux batteries lithium, elles sont extraites dans des mines où les enfants sont exploités, et les travailleurs surexploités. De plus, elles entraînent la pollution des sols et le pillage des réserves d'eau car le pompage de la saumure du sous-sol riche en lithium crée un vide qui fait migrer l'eau douce disponible vers les profondeurs, abaissant ainsi le niveau de la nappe phréatique asséchant la terre au détriment de la faune et la flore. [14]

Pour ce qui est du recyclage de ces batteries, la tâche s'avère compliquée due à la dangerosité de l'opération qui présente des risques électriques (l'énergie résiduelle des packs de batteries peut être importante), des risques d'emballement thermique et d'explosion (solvant organique) et des risques chimiques (production de gaz toxiques).

C'est donc face à tout ce que l'on a cité ci-dessus, que l'hydrogène se présente comme l'excellent alternatif dans un premier temps et le parfait substitut par la suite. Cela car il présente l'avantage d'être non polluant car il n'émet aucun gaz à effet de serre. Il contient 2,2 fois plus d'énergie que le gaz naturel, 2,75 fois plus que l'essence et 3 fois plus que le pétrole. L'hydrogène peut donc être utilisé dans de nombreuses applications et, selon l'usage final, être converti en électricité [15].

L'hydrogène peut donc être utilisé comme matière première, comme carburant ou comme vecteur d'énergie et de stockage, et a de nombreuses applications possibles dans les secteurs de l'industrie, des transports, de l'électricité et des bâtiments.

Aujourd'hui, l'hydrogène est quasi exclusivement utilisé dans l'industrie en particulier l'industrie chimique et le raffinage. Mais en tant que vecteur d'énergie, il peut être valorisé dans de nombreux autres usages :

- Carburant propre : une pile à combustible alimentée par l'hydrogène produit de l'électricité et le processus chimique rejette de l'eau. C'est ainsi que l'hydrogène apporte l'énergie nécessaire aux véhicules équipés d'une pile à combustible et permet une mobilité sans émission de polluants. D'autant plus que les véhicules fonctionnant à l'hydrogène présentent une autonomie plus importante qu'une batterie électrique et le

Plein est pour ainsi dire aussi rapide que pour un véhicule équipé d'un moteur thermique équivalent [16].

- Gaz : l'hydrogène produit pourra à terme, quand cela sera nécessaire, être injecté dans le réseau de gaz soit mélangé au méthane, soit pur dans des réseaux dédiés. Des travaux pour évaluer les impacts sur la sûreté sont en cours [4].
- Stockage de l'énergie : l'hydrogène peut être produit par électrolyse puis stocké sous forme gazeuse ou forme liquide avant que de contribuer à produire de l'électricité grâce à une pile à combustible ; l'hydrogène peut être utilisé pour faciliter le déploiement des énergies renouvelables en améliorant la stabilité des réseaux énergétiques [17].

L'hydrogène peut être utilisé sur les mêmes moyens de transport que les énergies conventionnelles. Non seulement il peut subvenir aux besoins énergétiques locaux mais il peut aussi être une importante commodité d'exportation.

L'Algérie présente d'énormes potentialités en énergie solaire et en énergie géothermique. L'existence d'une importante nappe phréatique (70% de la nappe de l'Albien, plus grande nappe d'eau du monde) en combinaison avec une insolation très importante font de ce pays un bon choix pour la production d'hydrogène solaire. Production qui offrira non seulement une énergie propre mais aussi et surtout permettra d'augmenter et de diversifier les ressources énergétiques.

I.2 Production d'hydrogène

I.2.1 Vaporeformage du gaz naturel

Le vaporeformage à partir de combustibles fossiles (essentiellement du méthane), est le procédé le plus dominant (96%) de la production d'hydrogène car de loin le plus économique.

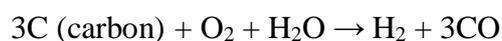
Le reformage de méthane (gaz naturel ou biométhane) est une transformation catalytique qui se réalise en présence d'un gaz réactif (vapeur d'eau ou CO₂). À une température comprise entre 700°C et 1100°C, la vapeur d'eau réagit avec le méthane en donnant du monoxyde de carbone et de l'hydrogène selon la réaction suivante: $(\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2)$. [18]

La purification de l'hydrogène étant plus facile sous forte pression, le reformage est réalisé sous une pression supérieure à 20 bars. Lorsque le but de la réaction de reformage est la production d'hydrogène, le vaporeformage est suivi d'une deuxième étape dite de Water-Gas- Shift afin de transformer le monoxyde de carbone en dioxyde de carbone avec une production supplémentaire d'hydrogène suivant cette réaction: $(\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2)$.

La production de dihydrogène par reformage a l'inconvénient de rejeter des oxydes d'azotes, du monoxyde de carbone, et du dioxyde de carbone; des gazes toxiques pour l'humain et responsables de l'effet de serre dans l'atmosphère. Ce n'est donc pas le procédé approprié pour un développement durable.

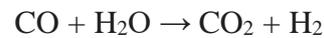
I.2.2 Pyrogazéification

La gazéification (ou pyrogazéification) des déchets est une transformation thermochimique qui consiste à chauffer des solides tel que le charbon à des températures comprises généralement entre 900°C et 1200°C en présence d'une faible quantité d'oxygène (qui peut être apportée par l'air, de l'air enrichi en O_2 , du dioxygène pur (O_2), du gaz carbonique [CO_2] ou de la vapeur d'eau) afin qu'il n'y ait pas une oxydation complète du combustible. Ainsi, Les molécules d'oxygène et d'eau oxydent le charbon et produisent un mélange gazeux. En dehors de la fraction minérale du déchet et d'une petite quantité de carbone fixe non converti qui constituent le résidu solide, l'ensemble du déchet est converti en un gaz appelé syngaz (gaz de synthèse) [19]:



Quand la réaction de gazéification est réalisée à pression atmosphérique, le gaz de synthèse est en général constitué principalement de monoxyde de carbone, du dihydrogène et de quelques pourcents de méthane. Selon les procédés, il contient également une proportion plus ou moins importante de dioxyde de carbone (CO_2) et d'azote (N_2). Il contient également une faible quantité de chaînes hydrocarbonées longues appelées goudrons, dont il est nécessaire de débarrasser le gaz pour certaines applications telles que l'utilisation en moteurs à gaz ou la conversion chimique du syngaz en méthane ou mélange D'hydrocarbure. [19]

Si l'hydrogène est le produit final souhaité, le gaz de charbon (principalement le produit CO) subit la réaction de conversion du gaz à l'eau où plus d'hydrogène est produit par une réaction supplémentaire avec la vapeur d'eau suivant la réaction suivante:



I.2.3 Electrolyse

En dehors de la réformation des gaz, l'électrolyse de l'eau est le procédé le plus développé et le plus utilisé dans l'industrie de production d'hydrogène car c'est la méthode la plus avantageuse écologiquement parlant (pas d'émission de CO₂).

Il s'agit d'une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène par le biais d'un courant électrique circulant entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique. Ce rendement énergétique varie entre 50% à 92% selon la technologie utilisée [19].

Etant donnée la cherté de cette méthode due à l'utilisation de métaux nobles dans les électrocatalyseurs (Platine), seul 4% de l'hydrogène est actuellement produit par électrolyse. Et ce dans les cas où l'électricité est bon marché, ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire. La recherche se concentre donc principalement sur l'utilisation de matériaux moins onéreux et tout aussi performants pour la conception d'électrolyseurs [19].

I.3 Stockage et transport

I.3.1 Stockage

Une fois produit, l'hydrogène doit être stocké pour pouvoir ensuite être distribué. La problématique du stockage est l'un des verrous technologiques pour l'usage de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. D'une part, il doit permettre un haut degré de sécurité et d'autre part, il doit être facile d'utilisation. En effet, l'hydrogène est tellement petit et léger qu'il se faufile partout et il nécessite d'importants moyens techniques pour le stocker [20].

Aujourd'hui, l'hydrogène peut être stocké sous trois formes différentes: gazeux, liquide ou solide. Ces trois méthodes de stockage diffèrent par leurs densités volumiques et gravimétriques par leurs aspects sécuritaires et par leurs coûts. Les différents modes présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients selon des critères économiques, énergétiques, de capacités massique et volumique [20].

Les capacités volumiques de stockage offertes par ces différentes méthodes sont représentées dans la figure (1.1). Cette figure met clairement en évidence la faiblesse du stockage sous pression et au contraire la force du stockage solide dans les hydrures métalliques.

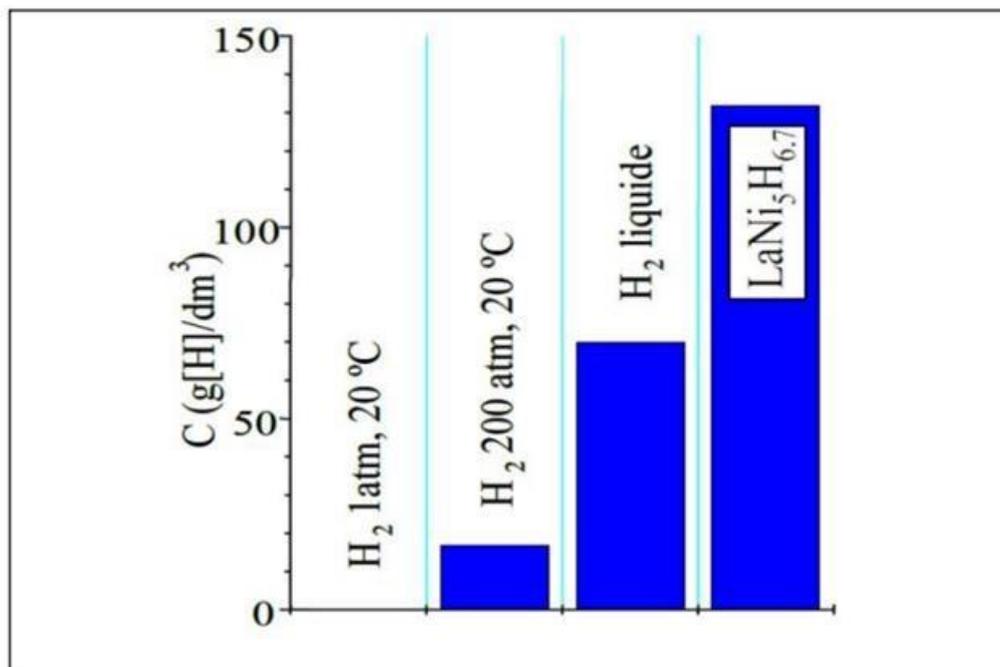


Figure 1.1 : Capacités volumiques des différents modes de stockage de l'hydrogène [20]

I.3.1.1 Stockage sous forme gazeux

La forme la plus courante sous laquelle l'hydrogène est stocké est la forme gazeuse. Cette méthode consiste à comprimer l'hydrogène gazeux en hydrogène haute pression (350-700 bars). L'hydrogène obtenu par cette voie est particulièrement adapté au transport entre le lieu de production et celui de distribution. Pour être intéressant et compétitif face aux hydrocarbures conventionnels, le monde du transport a besoin d'un carburant à la fois plus énergétique et compact. L'hydrogène a une densité énergétique très élevée, mais en tant que gaz il n'est pas compact à pression atmosphérique. En effet, la densité de l'hydrogène à 293°K est de 0,0827 kg/m³ sous une pression de 1 bar, de 14,49 kg/m³ sous une pression de 200 bars et de 23,66 kg/m³ sous une pression de 350 bars. C'est pourquoi le gaz doit être fortement comprimé avant d'être utilisé [21].

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. Cependant la consommation d'énergie liée à cette compression est élevée (22MJ/Kg pour 700 bars). L'idéal est d'augmenter le rapport de la quantité d'hydrogène stockée sur le volume de stockage tout en consommant un minimum d'énergie [21]. De plus, il est nécessaire de concevoir des réservoirs résistants aux chocs et adaptables aux véhicules pour les applications embarquées. Pour pouvoir assurer cette opération, un réservoir à hydrogène doit être constitué de:

- Une enveloppe interne étanche et élastique (aussi appelée liner): Elle a pour rôle de rendre le réservoir étanche à l'hydrogène.
- Une couche de renfort: Généralement constituée de fibre de verre ou fibre de carbone, c'est elle qui va être amenée à supporter la pression au sein du réservoir.
- Une couche de protection : Qui a pour but de protéger le réservoir de l'environnement extérieur. Elle peut être de plusieurs matériaux différents (fibre de carbone, fibre de verre, polymères, structure en mousse, résine).

I.3.1.2 Stockage sous forme liquide

Réduire l'hydrogène de l'état gazeux à l'état liquide fait passer sa densité de 40kg/m^3 sous une pression de 700 bars à une densité de 71kg/m^3 et ce sous une pression de 1bar. Ce mode de stockage est une solution très attrayante. Cependant, l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier (après l'Hélium) car il nécessite de le refroidir à une température de -253°C et de le conserver à faible température afin qu'il ne s'évapore pas en retour. Cette technique de stockage est bien plus énergivore que le stockage sous forme de gaz (environ 10 à 13 kWh par kg). C'est pour ça que l'hydrogène liquide n'est destiné qu'au domaine aérospatial.

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 [22].

Les risques avec l'hydrogène liquide sont liés aux fuites. Si une fuite est présente sur le réservoir, alors l'hydrogène sera évacué. Mais les températures sur Terre sont bien au-delà de la température de liquéfaction de l'hydrogène. Celui-ci se vaporisera instantanément au contact de l'air et gagnera énormément de volume. Le risque de détonation, surtout sur une fusée, est alors inévitable et bien plus important que celui d'un réservoir d'hydrogène gazeux (accident de la navette spatiale Challenger en 1986).

I.3.1.3 Stockage sous forme solide

L'hydrogène peut être stocké dans les hydrures métalliques. En effet, il peut réagir de manière réversible avec certains métaux et alliages. L'hydrogène ne devient donc pas solide en lui-même mais il est soit adsorbé ou absorbé par un matériau qui lui, est sous forme solide.

L'adsorption est un phénomène de surface réversible par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent uniquement sur les surfaces solides des adsorbants grâce à des liaisons électriques. Le matériau le plus à même d'adsorber l'hydrogène est le charbon actif combiné à du graphite. Cependant, stocker de l'hydrogène avec du charbon actif n'est pas très intéressant pour un usage pratique car, à température ambiante, la proportion d'hydrogène est seulement de l'ordre de 2%. L'absorption est un processus réversible qui a la particularité de combiner chimiquement un élément avec un matériau de nature métallique (palladium, magnésium) dans le cas de l'absorption de l'hydrogène [21].

La capacité de stockage est, pour certains métaux, si grande que la quantité d'hydrogène présente dans 1cm^3 d'hydruure (composé chimique constitué d'hydrogène et d'un autre élément) peut doubler celle contenu dans 1cm^3 d'hydrogène liquide. Malheureusement, cela ne dépasse rarement les 10% de la masse totale de la combinaison hydruure métallique. De plus, l'hydrogène utilisé doit être le plus pur possible pour permettre au matériau absorbant d'effectuer plusieurs cycles de charge-décharge [21].

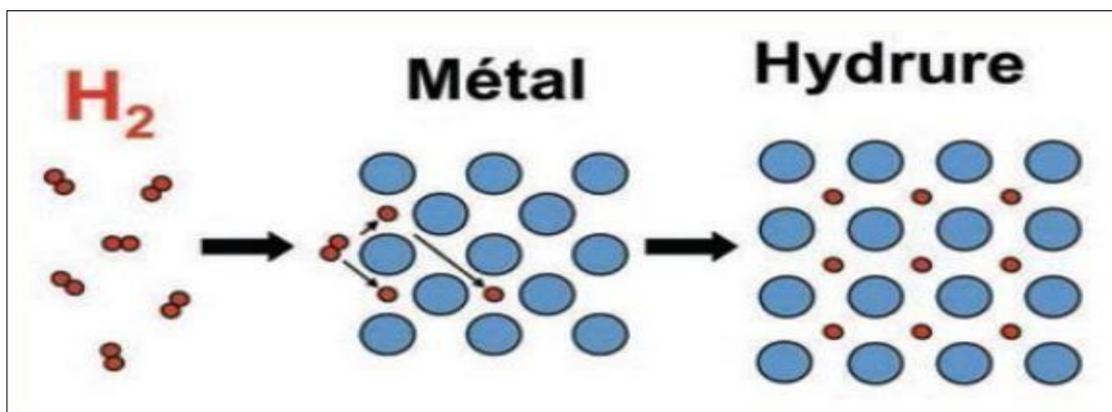


Figure 1.2 : Réaction de l'hydrogène avec le métal

Les hydruures métalliques sont sécuritaires et libèrent, à pression constante de l'hydrogène pur. Il reste que cette technologie soulève quelques difficultés pour être employée dans les véhicules automobiles. D'abord, il y a le poids des hydruures eux-mêmes qui alourdissent considérablement les réservoirs. Puis, il est nécessaire de les chauffer à une température assez élevée pour libérer l'hydrogène de sa "prison" métallique. La cinétique de remplissage est lente à basse température, et le coût de certains métaux (Zr) peut être très élevé.

Dans le **tableau I.1**, une comparaison des conditions d'hydratation de différents composés métalliques est présentée [22]:

Composés métalliques	P (bar)	T (K)	Cm (%)	Hydrure formée
<i>LaNi₅</i>	1,7	298	1,4	LaNi ₅ H ₆
<i>ZrV₂</i>	1E-8	323	3,0	ZrV ₂ H _{5,5}
<i>TiFe</i>	5	303	1,9	TiFeH ₂
<i>Mg₂Ni</i>	1	555	3,6	Mg ₂ NiH ₄
<i>bcc</i>	10	313	2,6	TiV ₂ H ₄

Tableau 1.1: Conditions d'hydratation de différents composés métalliques

I.3.2 Transport

La production centralisée permet de tirer parti de sources d'énergie renouvelables plus compétitives et de réaliser des économies d'échelle. Toutefois, un tel système peut placer la production à des centaines ou des milliers de kilomètres des centres de demande, ce qui nécessite des pipelines d'hydrogène spécialisés. En raison de leurs spécificités géographiques et de leurs choix de politique énergétique, les pays misent également sur un échange intercontinental d'hydrogène. A ce jour, le Japon et l'Allemagne se positionnent notamment comme importateurs nets ; l'Australie, le Maroc, le Chili comme exportateurs nets.

Il existe actuellement trois types de transport d'hydrogène: Le transport routier ou ferroviaire dans des bouteilles, le transport par canalisations dédiées, et le transport maritime. Les coûts de transport et de stockage varient selon le type de transport et peuvent représenter jusqu'à trois fois le coût de l'hydrogène lui-même.

Les remorques à tubes contenant jusqu'à 600 kg d'hydrogène gazeux à 150-250 bars de pression sont l'option la plus adoptée aujourd'hui. Et ce malgré un coût de transport allant de 0,5 à 1,5€ par kg d'H₂ Pour des distances de moins de 400 km [23]

Pour des distances allant jusqu'à 1500km, les pipelines peuvent offrir une option plus compétitive, autour de 0,2 à 0,3€ par kg d'H₂. Toutefois, des difficultés techniques et réglementaires pourraient freiner le mélange des réseaux de gaz naturel actuels avec du H₂ ou leur reconversion complète en pipelines d'hydrogène pur. L'hydrogène est trois fois moins dense que le CH₄ et obligerait les utilisateurs finaux à consommer plus de gaz pour obtenir la même énergie. En outre, les réseaux ont des limites de tolérance de mélange différentes, selon les réglementations nationales.

Au-delà de 1500 km, les routes maritimes apparaissent comme des options plus sûres et plus rentables. L'hydrogène gazeux n'est pas assez dense pour des distances aussi longues, et des solutions de rechange sont envisagées [24] :

- L'hydrogène liquide (nécessite une intensité énergétique élevée pour la conversion et le transport).
- L'ammoniac (toxique et peut poser des problèmes pour le transport maritime).
- Les transporteurs d'hydrogène organique liquide (*LiquidOrganicHydrogen Carriers* ou *LOHC*), molécules dont le but est de transporter de l'H₂ sous forme liquide à température ambiante. (la conversion consomme 35 à 40% de l'énergie initiale).

Actuellement, les trois solutions font grimper le prix de l'hydrogène au port de 100 à 300 %. Cela comprend des coûts de conversion et de reconversion de 1 à 2€ par kg d'H₂ et des frais de transport allant de 0,3 à 1,2€ par kg d'H₂.

I.4 Difficultés

I.4.1 Consommation et perte de rendement

L'hydrogène produit par électrolyse revient aujourd'hui aux environs de 4€/kg à 6€/kg (en fonction de la technologie d'électrolyse) et pour une durée d'utilisation de l'ordre de 4000 à 5000 h par an et un coût de l'électricité autour de 50€/MWh. L'hydrogène gris quant à lui possède un cout production avoisinant les 1,5 €/kg.

La transformation d'électricité renouvelable excédentaire en hydrogène pour le stockage, puis la transformation de l'hydrogène en électricité pour une utilisation ultérieure (power-to-gaz-to-power) présente par exemple des pertes de rendements de l'ordre de 70% à 75%, selon une note de l'Agence de la transition écologique en France. Ainsi, pour produire 1kg d'hydrogène, il faut 58.7 kWh d'électricité, mais l'énergie électrique qui en résulte n'est que de 13.4 kWh comme le montre la figure ci-dessous [25].

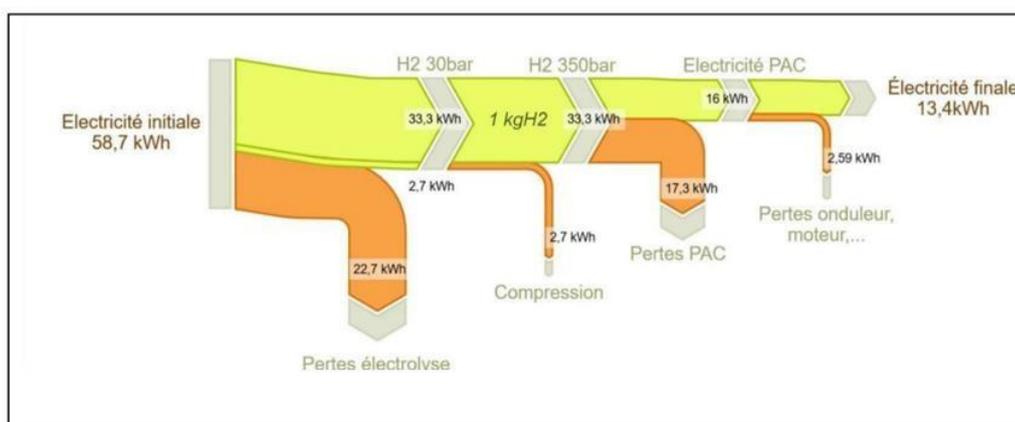


Figure 1.3 : Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire et résultante pour 1Kg d'H₂

Au niveau du cœur de l'électrolyseur, l'énergie nécessaire à la production d'1 Nm³ d'hydrogène est comprise entre 3 et 3,5 kWh ; le rendement énergétique est compris entre 80 et 90 %.

L'emploi de membranes alcalines telles que IMET® proposées par "HydrogenSystems": La pression d'utilisation de tels systèmes est de 4 à 30 bars pour une consommation spécifique de 4,2 kWh/Nm³. Les débits d'hydrogène sont dans la gamme 1 à 60 Nm³/h.

L'énergie requise est typiquement de l'ordre de 50kWh électrique par kilogramme d'hydrogène produit (cas d'un rendement de 66 %) [26].

I.4.2 Dangerosité

I.4.2.1 Inflammations et explosions

Qu'il s'agisse de l'hydrogène ou des gaz utilisés pour le produire notamment par vaporeformage, par oxydation partielle ou à partir de la biomasse, il existe un risque de formation d'une atmosphère explosive dans le procédé ou d'inflammation d'une fuite de gaz. En effet les gaz inflammables en présence sont l'hydrogène (H), le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH₄) et la charge hydrocarbure initiale. Dans le cas des procédés existants, qui sont essentiellement issus de l'industrie pétrolière, les risques existants sont déjà connus et les techniques de prévention et de protection existent. Néanmoins, les nouveaux développements en cours sur ces procédés peuvent induire de nouveaux risques du fait des modifications des conditions de fonctionnement (température, pression, nature des gaz) qui modifient les caractéristiques d'explosivité (limite d'explosivité, vitesse d'explosion) ainsi que du fait de l'utilisation d'atmosphères enrichies en oxygène [27].

Dans le cas de l'électrolyse, le risque d'explosion est plus important dans la mesure où l'on produit simultanément de l'hydrogène et de l'oxygène. Bien que les cellules soient séparées par des membranes, une étanchéité parfaite n'est jamais atteinte et il existe donc un risque non négligeable de formation d'un mélange explosif hydrogène-oxygène.

I.4.2.1 Risques mécaniques

Dans les procédés de reformage ou d'oxydation partielle, les températures et pression sont relativement élevées, respectivement 840 à 950°C et 20 à 30 bars pour le reformage et 1300 à 1500°C pour l'oxydation partielle. Le développement des nouveaux procédés, comme le reformage autothermique va dans le sens de l'augmentation des pressions de travail, de 20 à 60 bar et jusqu'à 100 bar dans le cas du reformage autothermique haute pression [28].

De même, dans le cas de l'électrolyse, les pressions peuvent aller jusqu'à 30 bar pour une électrolyse classique et jusqu'à 700 bar pour les technologies haute pression. Si dans le cas de l'électrolyse classique, la température ne dépasse pas 160°C, du fait de l'utilisation d'un électrolyte aqueux, dans le cas de l'électrolyse haute température elle peut dépasser les 1000°C. Les risques liés à ces paramètres sont donc principalement les risques de défaillance mécanique des réacteurs et les risques d'éclatement ou de fuite [28].

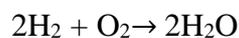
I.5 Etude énergétique

Dans cette partie nous allons comparer le dihydrogène avec d'autres vecteurs énergétiques et sources d'énergies actuelles ainsi que certaines énergies renouvelables en citant les batteries et les carburants fossiles par exemple. Nous allons prendre en considération les caractéristiques de l'hydrogène en tant que carburant (réaction de combustion) ainsi qu'en tant que pile à combustible (oxydoréduction).

I.5.1 En tant que carburant

Le dihydrogène en tant que liquide ou gaz, peut être utilisé en tant que carburant alternatif à l'essence ou autre carburant fossile, ou les biocarburants. Il a la particularité d'avoir une densité énergétique plus importante comparé aux autres carburants utilisés actuellement notamment grâce à sa masse molaire qui est très faible (2 g/mol) si on prend en compte l'isotope le plus présent sur terre [29].

La formule de combustion du dihydrogène avec de l'oxygène s'écrit de la sorte si on prend en compte uniquement l'oxygène présent dans l'air en tant que comburant [30] :



Pour le méthane et le propane, les formules de combustions complètes avec de l'oxygène pur s'écrivent [30]:

- Méthane : $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- Propane: $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$

On remarque, que si l'on prend à titre de comparaison ces carburants ci-dessus (CH_4 et C_3H_8), l'absence de CO_2 dans la combustion de l'hydrogène indique qu'il est beaucoup moins nocif pour l'environnement comparé à ses substituts fossiles.

Pour les carburants liquides tel que l'essence (majoritairement composé d'heptane C_7H_{16}) [30]: $\text{C}_7\text{H}_{16} + 11\text{O}_2 \rightarrow 7\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$

Dans ce cas, si on compare les hydrocarbures entre eux, on remarque que plus l'hydrocarbure est lourd, plus il dégage du CO₂ pour la même quantité (en Mol), donc encore plus polluant. Mais la comparaison ne s'arrête pas là car chacun de ces carburants possède ses propres caractéristiques que nous allons retracer dans ce tableau:

		H2	Méthane	Propane	Essence	Gasoil
Energie de combustion	KJ/M3	10050	32650	86670	31150000	31435800
	KJ/g	141.86	55.53	50.63	47.5	44.8
Emissions CO ₂ (kg/l)		0	~1.05	~1.7	2.3	2.6
Emissions NOx (kg/GJ)		0.10	~0.34	~0.34	~0.34	~0.34
Limite d'inflammabilité (%)		4-75	5.3-15	2.2-9.6	1-7.6	0.6-5.5
Température de flamme		2000-2300	~1900-2000	~1950	~2300	~2300
Energie d'allumage (mJ)		0.02	0.29	-	0.24	0.24
Température d'auto allumage °k		858	810	723	~653	~523
Densité (kg/m ³)		0.089	0.657	493	720-780	830-850
Coefficient de diffusion (m ² /s)		8.5x10 ⁻⁶	1.9x10 ⁻⁶	~6.5x10 ⁻⁷	-	-
Laminar flame speed (m/s)		1.85	0.38	-	0.37-0.43	0.37-0.43
Indice d'octane		130+	125~	105	87-95	30

Tableau 1.2 : Comparaison entre l'hydrogène et certains hydrocarbures aux conditions normales de température et de pression [31, 32, 33, 34, 35, 36,37]

I.5.1.1 Energie

On constate que dans un premier cas, si l'on compare uniquement l'hydrogène aux autres carburant en prenant compte du volume, en d'autres termes une comparaison de densité énergétique, on remarque que l'hydrogène est loin derrière ses concurrents, chose qui est tout à fait normal vu sa légèreté et son état physique dans les conditions de température et de pression normales. Par contre si on prend en compte la masse des carburants, on remarque exactement l'effet inverse que celui du volume, la valeur calorifique du dihydrogène est très importante et contient le rapport énergie/poids le plus important. Ceci est grâce à l'absence d'atome carbone lourd dans la molécule. Cette caractéristique est très importante et très utile dans les secteurs où le poids est un élément crucial dans l'utilisation de l'énergie comme l'aérospatial par exemple [36].

I.5.1.2 Emissions

Les émissions de CO₂ sont pratiquement nulles dans la réaction de combustion du dihydrogène, et ceci est un énorme atout dans le domaine de l'énergie afin d'atteindre la neutralité carbone pour limiter la pollution et le réchauffement climatique.

Pour les gaz NO_x, on voit qu'elles sont considérablement moins importantes que celles émises par les hydrocarbures en général ce qui permet de réduire la pollution également.

I.5.1.3 Autres paramètres

La limite d'inflammabilité étendue de l'hydrogène (annexe 1) permet à ce dernier d'avoir une plage de "air/fuel ratio" très large qui est très importante pour l'économie de carburant ou la réduction d'émissions NO_x par exemple. La température de flamme est assez proche des autres carburants [37]. L'énergie d'allumage est très faible ce qui peut être à la fois dangereux et pratique dépendant de l'utilisation du carburant [36]. La température d'auto allumage est plus importante, ce qui est bénéfique dans le cas d'usage dans les moteurs à combustion internes par exemples ou bien lors des utilisations dans des endroits chauds, ce qui évitera des combustions indésirées [37]. L'indice d'octane élevé appuie parfaitement cet argument, il prouve que l'hydrogène a des propriétés d'anti-détonation ou résistance aux cliquetis supérieures aux hydrocarbures [37, 33].

Le coefficient de diffusion et la vitesse de la flamme élevés permettent d'avoir une combustion bien répartie, homogène, et rapide à la fois dans des milieux fermés tel une chambre de combustion par exemple [33,36].

I.5.2 En tant que pile à combustible

Dans ce cas nous allons comparer l'énergie fournie par l'hydrogène à l'aide de pile à combustible aux autres sources d'énergies ou bien vecteurs énergétiques concurrents à cette technologies. Nous allons citer certains types de batteries les plus répandues et certaines énergies renouvelables à titre de comparaison.

I.5.2.1 Batteries

Si on commence la comparaison par l'énergie spécifique de certains types de batteries aux piles à combustible sur deux pressions distinctes, on remarque une différence très Prononcée entre la quantité d'énergie par unité de masse emmagasiné dans un système PAC et certains types de batteries (figure 1.4) [38]:

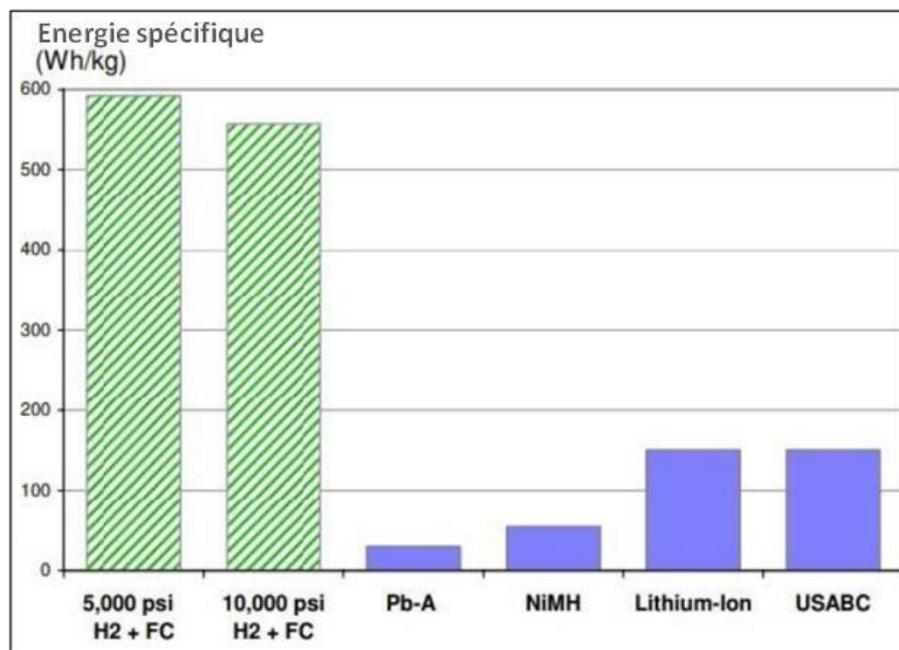


Figure 1.4 : Comparaison de l'énergie spécifique de l'hydrogène à différentes pressions et certains types de batteries les plus répandues dans le marché

On note qu'entre les deux pressions de l'hydrogène (350 bars 700bars) l'énergie spécifique pour les 350bars est supérieure à celle de 700bars car l'augmentation de cette pression nécessite des réservoirs plus résistants et plus lourds [38]. Ceci peut affecter énormément l'utilisation de ces vecteurs énergétiques spécialement pour le domaine du transport.

Or, pour augmenter à titre d'exemple l'autonomie d'une voiture de même gabarit pour les véhicules à pile à combustibles, la différence de poids est très négligeable.

Par contre, les batteries lithium qui sont les plus performantes parmi les autres types de batteries devront augmenter considérablement le poids des véhicules pour augmenter l'autonomie de ces véhicules (environs 500kg pour chaque 150Km d'autonomie)

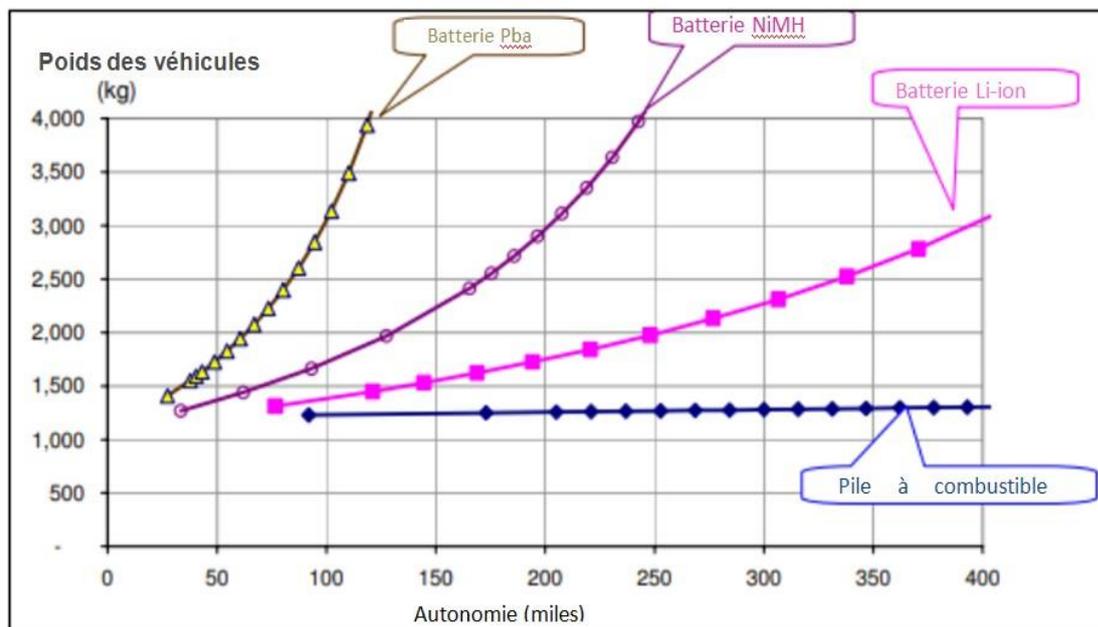


Figure 1.5 : Poids des véhicules selon leur technologie et leur autonomie

En tenant compte maintenant de la densité énergétique des systèmes à pile à combustible, pour la même quantité d'énergie fournie, une batterie en lithium peut prendre le double de l'espace requis pour une PAC, Ce qui n'est pas pratique dans les cas où la densité énergétique est importante comme le transport de marchandise lourde par exemple.

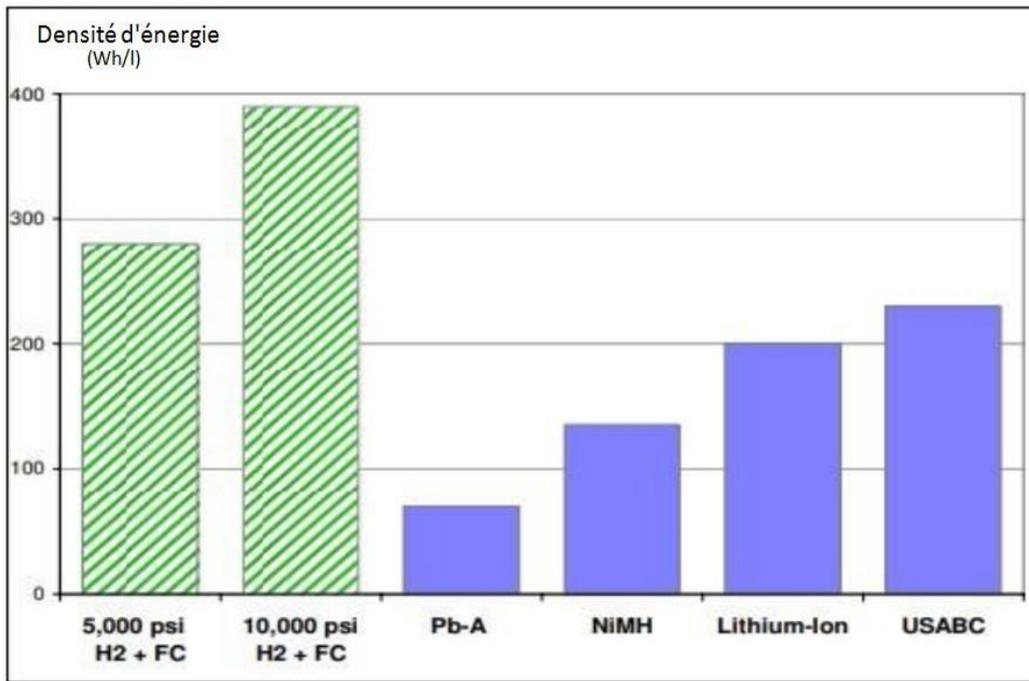


Figure 1.6 : Comparaison de la densité énergétique (Wh/L) de l'hydrogène pour différents types et pressions

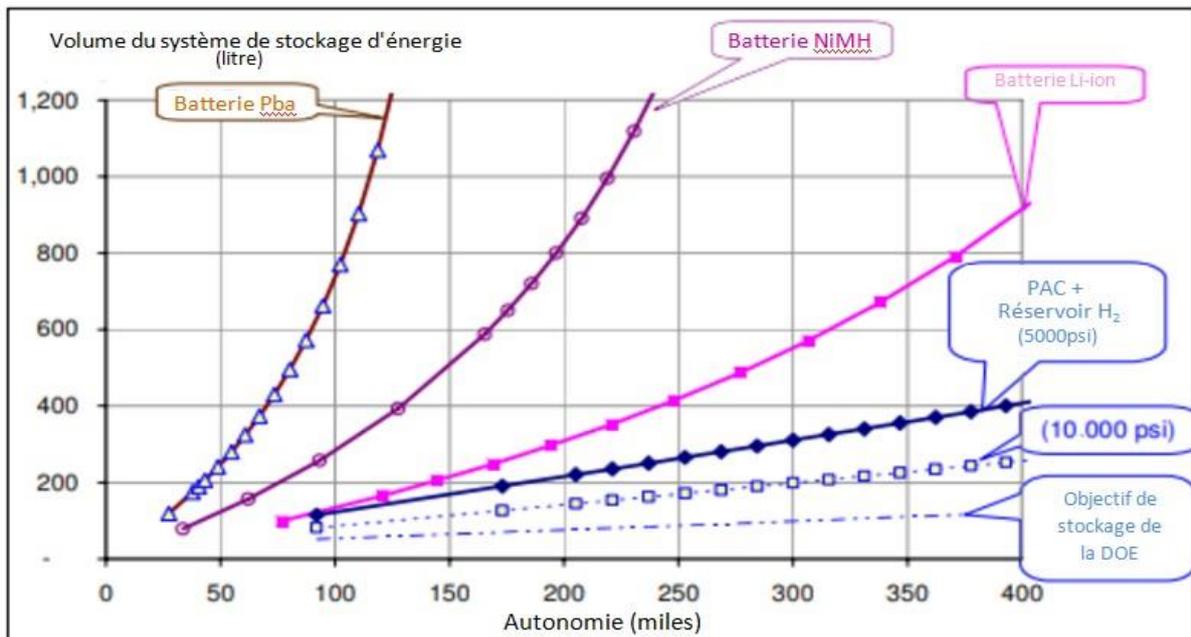


Figure 1.7 : Comparaison de la taille des systèmes de stockage de volume Pour différentes technologies

I.5.2.2 Énergies renouvelables

La comparaison de la pile à combustible aux énergies renouvelables se situe dans le rendement et l'exploitation optimale de ces deux ressources. Or, dans le cas de la production de l'hydrogène nous devons savoir qu'on ne peut pas se passer d'une source d'énergie (notamment électrique pour l'électrolyse) afin de produire de l'hydrogène [38].

Si on utilisait uniquement les énergies renouvelables en prenant exemple du solaire, on constatera l'absence d'énergie le soir et un surplus d'énergie le matin, qui veut dire que il y'a un déséquilibre dans l'alimentation énergétique de cette installation. Certains emploient des batteries électriques pour stocker cette énergie. Néanmoins, ces batteries ne sont pas le meilleur moyen, sauf pour de petites consommations.

Contrairement à un usage direct des énergies renouvelables qui souffrent d'une production à intermittence, l'hydrogène et la pile à combustible interviennent afin de stocker l'énergie non-utilisé pour la réutiliser plus tard quand les sources d'énergies ne sont plus disponibles.

I.6 Conclusion partielle

Nous avons pu, par le biais de nos recherches, définir les spécificités du gaz hydrogène, ses méthodes de production et les difficultés liées à la dangerosité et au stockage. En effet, certaines de ces méthodes sont fortement nuisibles pour l'environnement, c'est pour cela que nous avons opté pour l'utilisation de l'électrolyse. S'en ai suivi une comparaison énergétique entre une application en tant que carburant, et une application via une pile à combustible à hydrogène.

CHAPITRE II: Production de l'hydrogène par Electrolyse

II.1 Généralités

II.1.1 Introduction sur l'électrolyse

De nos jours, la production d'hydrogène est essentiellement effectuée par reformage du gaz naturel. Une très faible proportion d'hydrogène est produite par électrolyse de l'eau (environ 5 % de la production mondiale) [39].

Dans le contexte du réchauffement global de la terre et du développement des énergies renouvelables intermittentes, notamment électriques, le vecteur énergétique hydrogène peut être envisagé comme une ressource alternative à la batterie classique et produire de l'électricité verte au service de la transition énergétique.

La montée en puissance des énergies intermittentes dans les mix électriques, la variabilité des prix de l'électricité et la flexibilité offerte par le recours à l'hydrogène, donneront très probablement une place économiquement viable à la production d'hydrogène par électrolyse. Toutefois, cette démarche n'a pleinement de sens que dans le cadre d'une production décarbonée par électrolyse remplaçant la production actuelle à partir d'hydrocarbures. Cependant cette technique est la plus prisée et la plus étudiée car elle ne produit aucun gaz à effet de serre.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus écologique, constituant ainsi la réponse environnementale à la problématique énergétique mondiale.

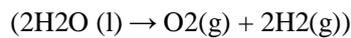
II.1.2 Histoire de l'électrolyse

C'est à William Nicholson, chimiste britannique du XVIII^e siècle, qu'est attribuée la paternité de l'électrolyse de l'eau. Après avoir lu les travaux de Volta sur les batteries électriques, il en construisit une lui-même et découvrit qu'en immergeant les extrémités des conducteurs électriques dans l'eau, cette dernière était décomposée en deux gaz, H_{2(g)} et O_{2(g)}. Avec cette découverte, Nicholson devint le premier à effectuer une réaction chimique à l'aide de l'électricité [40]

II.1.3 Procédé de l'électrolyse

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par l'application d'une différence de potentiel entre deux plaques métalliques appelées électrodes plongées dans un bain électrolytique créant un courant

Électrique (généralisé dans notre cas par les cellules photovoltaïques). Les anions se dirigent alors vers l'anode selon la réaction d'oxydation: ($H_2O \rightarrow 1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^-$), et les cations (H^+) vers la cathode selon la réaction de réduction ($2H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)}$): globale de l'électrolyse est la suivante [41]:



Les rendements couramment obtenus par le procédé électrolytique sont de l'ordre de 65%. Toutefois des rendements jusqu'à 85% sont possible. Les travaux actuels ciblent l'amélioration du rendement électrocatalytique des électrodes, la résistance à la corrosion des matériaux et l'optimisation des conditions du processus.

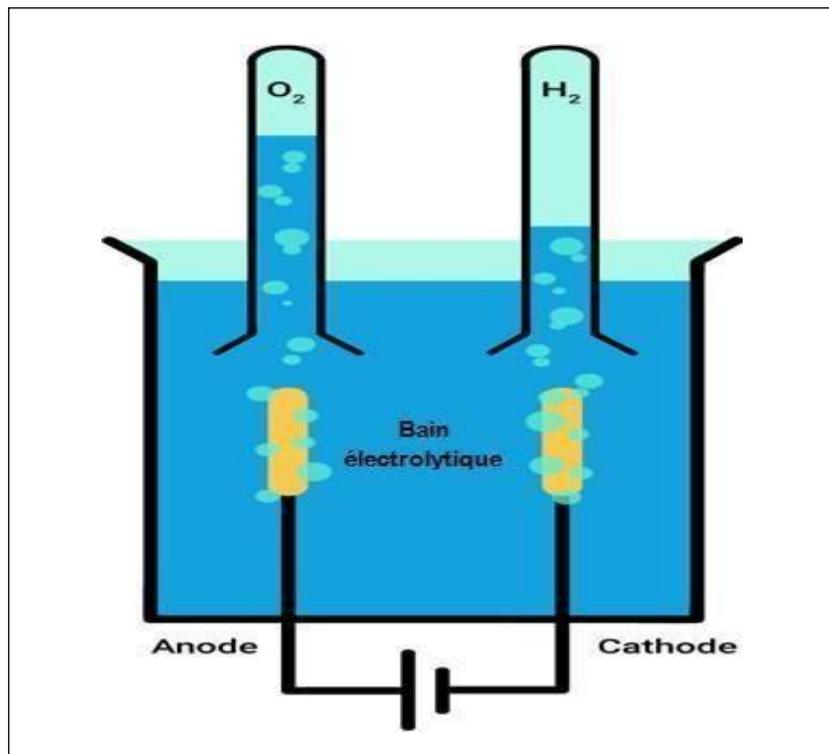


Figure 2.1 : Schéma montrant un système simple d'électrolyse de l'eau

II.2 Types d'électrolyses

II.2.1 Alcaline

L'électrolyse Alcaline est actuellement la forme d'électrolyse la plus courante dans la production de l'hydrogène, elle est aussi l'une des plus vieilles technologies d'électrolyses utilisées. Elle est relativement facile et la plus simple à l'usage. Cette technologie est la plus mature dans l'usage industriel actuel. Sa particularité comparée aux autres technologies, est l'électrolyte utilisée sous forme de solution aqueuse composée généralement de potasse (KOH), d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou bien d'acide sulfurique (H_2SO_4), mais les plus répandus restent la potasse et l'Hydroxyde de sodium.

Les solutions aqueuses utilisées présentent le grand défaut de l'électrolyse alcaline car ce type d'électrolytes sont corrosives et abiment les électrodes, ce qui diminue leur activité catalytique et augmente les coûts du processus au fil du temps diminuant ainsi leur fiabilité ainsi que leur rendement. La disposition des solutions aqueuses retardent aussi la vitesse d'atteinte de la capacité nominale de l'électrolyseur. Dans une autre explication, comparée à une membrane solide, les solutions liquides (ou aqueuses) retardent les molécules à se frayer un chemin afin d'atteindre les électrodes. Ceci dit, la méthode alcaline est la moins adaptée aux énergies intermittentes. En parallèle, sa tension de fonctionnement est relativement élevée par rapport à la densité de courant ce qui fait que la production d'hydrogène est moins importante [42].

Il faudra noter également que sa température optimale de fonctionnement est aux environs de $80^\circ C$. Or si on n'atteint pas cette température, la tension de fonctionnement augmente, ce qui du coup augmente l'énergie consommée et par conséquent fait baisser le rendement de production [43].

II.2.2 Électrolyse à oxyde solide (SOEC)

L'électrolyse SOEC (Solid Oxyde Electrolyse Cell) aussi appelé électrolyse à haute température est une technologie assez récente et les recherches à son sujet sont encore à leurs stades expérimental si bien qu'une version opérationnelle n'est pas encore au point. Elle est issue directement des développements des piles à combustibles SOFC. D'après les recherches

actuelles, cette nouvelle technologie a un avenir assez prometteur où on prévoit un rendement général théorique proche des 100% [44].

L'électrolyse à haute température fonctionne à des températures optimales avoisinant les 1000°C pour but de réduire la consommation en énergie électrique. Elle tire aussi profit lors de l'usage de haute pression. En effet, la diminution de bulles d'air ainsi que la haute température de la vapeur augmente la conductivité électrique de la solution ce qui permet de réduire la tension d'usage tout en gardant une densité électrique importante.

L'EHT (électrolyse haute température) dispose d'une membrane en céramique qui permet de séparer les molécules d'oxygène à l'anode de la vapeur d'hydrogène à la cathode, qui est après séparée de l'eau pour obtenir de l'hydrogène pur. L'usage adéquat pour cette technologie est dans les centrales thermiques ou dans les centrales nucléaires, là où les pertes de chaleurs sont conséquentes.

Sa membrane a l'avantage de ne pas disposer de matériaux nobles (des membranes d'hydroxyde de potassium (KOH) sont utilisées) qui réduisent les couts de production ainsi que d'entretien. Ses principaux inconvénients se résument à sa phase de tests dans les laboratoires, donc pas encore fiable. Sa durabilité est réduite, due aux hautes températures qui détériorent les membranes. Pour finir, l'usage de cette méthode dans les énergies renouvelables comme lesolaire n'est pas très adéquate car il faut pouvoir subvenir le système avec de la chaleur.

II.2.3 Membrane échangeuse de protons (PEM)

Contrairement à d'autres procédés électrolytiques de production d'hydrogène, comme en milieu alcalin ou à haute température avec des électrolytes céramiques, la technologie PEM (Proton Exchange Membrane) utilise une membrane polymère qui joue à la fois le rôle de séparateur de gaz et d'électrolyte. Les électrolyseurs PEM possèdent des temps de réponse très courts, intimement liés au fonctionnement à basses températures et à l'utilisation d'électrolytes solides. Cette caractéristique en fait la technologie la plus à même d'être couplée simplement avec des sources d'énergie intermittentes telles que les centrales solaires dans notre cas [45].

Les électrolyseurs à membrane fonctionnent sur le même principe que tous les systèmes d'électrolyse. Il est basé sur l'utilisation d'un courant électrique pour décomposer

une substance chimique. Dans le cas de l'électrolyse de l'eau, les gaz formés sont le dihydrogène à la cathode et le dioxygène à l'anode. La vitesse à laquelle les réactions se produisent et l'équilibre des réactions à leur température de fonctionnement déterminent les performances d'une cellule d'électrolyse. La densité de courant traversant le convertisseur, ainsi que sa tension de fonctionnement, sont liés au rendement de conversion et donc à la consommation électrique de la cellule d'électrolyse lors de la production d'hydrogène [46].

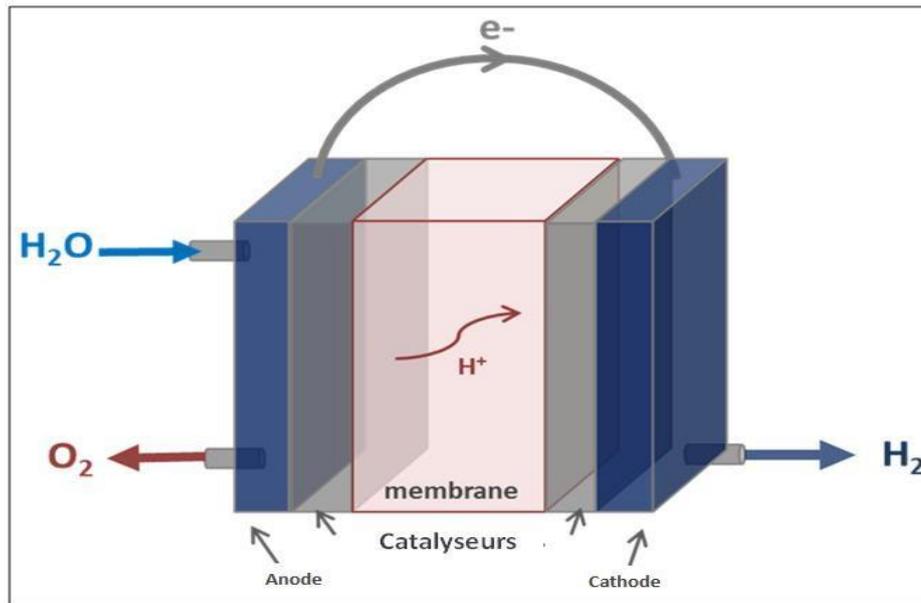


Figure 2.2 : Schémas de l'électrolyse PEM

II.2.4 Membrane échangeuse d'anions (AEM)

La startup italienne "Enapter" avance que son électrolyseur à membrane échangeuse d'anions pourrait produire de l'hydrogène vert à plus bas prix que les technologies alcalines et PEM qui dominent actuellement le marché. Et ce due à sa facilité de manipulation, à l'utilisation de matériaux bien moins coûteux, et à sa supériorité en termes d'économie d'énergie [47].

L'avantage de la AEM, contrairement à la PEM; est qu'elle n'utilise pas une grande acidité d'électrolyte qui requiert l'usage de matériaux chers (titanium) pour protéger le stack et éviter le phénomène de corrosion. Autrement dit, cette technique utilise une solution alcaline à 1% d'hydroxyde de potassium (c'est-à-dire 99% d'eau), de sorte qu'un acier beaucoup moins cher peut être utilisé[48].

Le composant essentiel de la AEM est son stack, où se produit la réaction de séparation de l'eau. La cellule unique est séparée en deux demi-cellules par la membrane échangeuse d'anions. Chaque demi-cellule est constituée d'une électrode, d'une couche de diffusion de gaz et d'une plaque bipolaire. Plusieurs cellules individuelles sont connectées par la plaque bipolaire pour former la pile AEM. Le processus se déroule comme suit:

- L'eau se déplace de la demi-cellule d'anode à travers la membrane.
- L'hydrogène est produit et libéré via la couche de diffusion de gaz.
- L'anion OH^- revient à l'anode via la membrane.
- L'oxygène est produit et libéré via la couche de diffusion de gaz et de liquide.

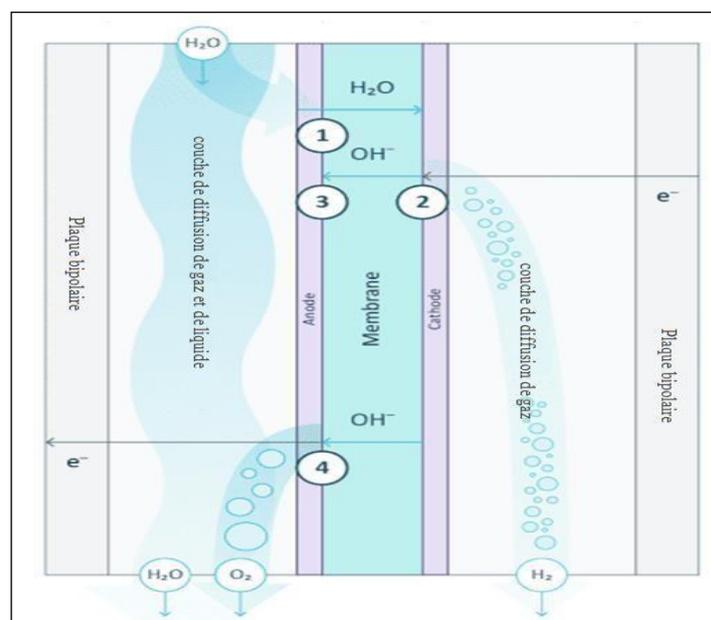


Figure 2.3 : Electrolyse AEM

II.2.5 Capillary Fed Electrolysis (CFE)

A partir des recherches de l'université australienne de Wollongong, la société Hysata a peut-être trouvé le coupable et la réponse: des bulles. En effet, ces bulles se trouvant dans le liquide électrolytique; sont non conductrices et, lorsqu'elles s'accumulent sur les électrodes, bloquent des parties de ces dernières et entravent le processus, ce qui réduit l'efficacité [49].

La PEM permet au côté cathode de continuer à fonctionner vers l'électrolyte (qui peut produire de l'hydrogène gazeux en le faisant barboter dans un liquide), mais l'électrolyseur à alimentation par capillarité d'Hysata va encore plus loin. Ils utilisent un réservoir au bas de la cellule qui maintient l'électrolyte éloignée et hors de contact avec

l'anode et la cathode jusqu'à ce qu'il soit aspiré à travers un séparateur inter-électrodes (qui est à la fois poreux et hydrophile). C'est la «Capillar action»: tout comme de l'eau qui monte d'une paille en raison du changement de pression [49].

Il en résulte que l'électrolyte reste en contact direct, mais d'un seul côté, et les gaz sont toujours produits sans cette action de bouillonnement gênante qui gêne. Étant donné que l'eau n'est pas aspirée du côté de l'électrode, l'autre côté peut continuer à libérer du gaz sans entrave. Au fur et à mesure que l'eau est électrolysée hors du séparateur, l'action capillaire attire naturellement plus d'eau pour la remplacer, ce qui permet à tout de fonctionner correctement avec un rendement exceptionnel de 95 à 98%.

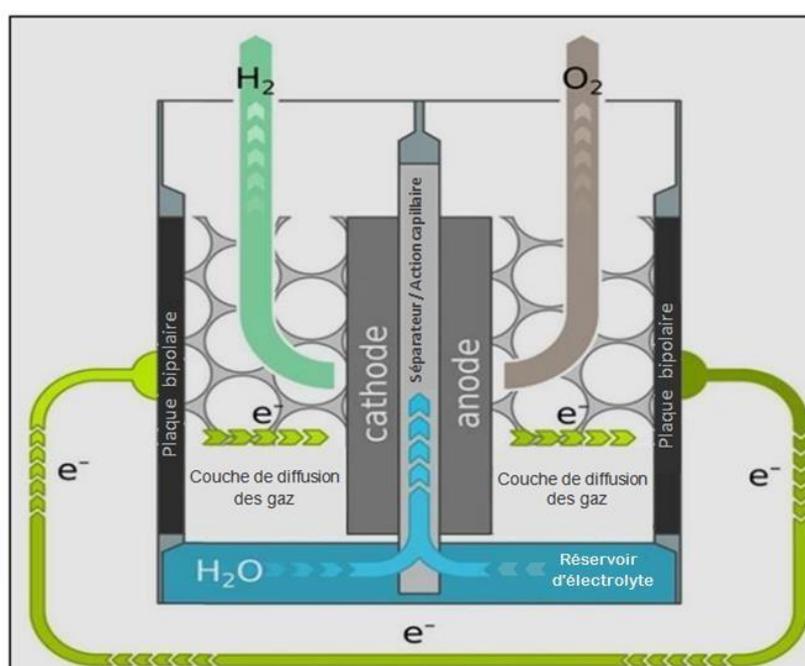


Figure 2.4 : Electrolyse CFE

II.3 Comparaison et choix de la PEM

Alors que la décarbonisation de l'industrie figure en tête des priorités de la plupart des stratégies hydrogène dans le monde, les technologies d'électrolyse de l'eau parées pour l'industrialisation rivalisent pour équiper les industriels désireux de produire de l'hydrogène pour leurs procédés.

L'électrolyse alcaline à électrolyte liquide est la technique la plus mature dans l'industrie. Avec son rendement de 70%, elle domine le marché avec 61% des capacités installées en 2020 d'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Et ce grâce à son

économie et a sa fiabilité qui réside dans la durée de vie de l'équipement. Néanmoins, cette technique présente bien des inconvénients. Elle a la particularité d'utiliser de l'hydroxyde de potassium comme électrolyte ce qui, endommage les électrodes (due à son grand effet corrosif sur ces dernières), irrite le corps humain, et dégage des vapeurs de potassium toxiques lors de sa préparation. De plus, cette technique tarde à atteindre sa capacité nominale; ce qui contraint à chauffer préalablement le réservoir d'électrolyte jusqu'à 90 °C [44].

Pour ce qui est de la AEM (Anion Exchange membrane), les plus grands obstacles à son développement sont la stabilité de la membrane et sa conductivité ionique, son manque de réactivité, et le taux de pureté de l'hydrogène produit. Cette technique reste alors au stade de recherche et développement [47].

Bien qu'elle soit marquée par son rendement élevé (>90%), la SOEC (Électrolyse à oxyde solide) ou "électrolyseur haute température" (HTC), comme son nom l'indique; performe dans des environnements allant de 800°C à 1100°C. Ce besoin en chaleur présente à lui seul un problème face à l'apport en énergie nécessaire pour sa mise en place.

La CFE (Electrolyse à action capillaire) est sans doute la technique qui va révolutionner le monde de l'électrolyse en permettant de produire de l'hydrogène à moins de 2\$ le kg. Mais pour cela, il faudra attendre encore quelques années car cette technologie n'a été mise en place que très récemment, été 2022 [49].

Après avoir étudié ces différentes techniques, nous déduisons que c'est l'électrolyse PEM qui est la plus appropriée pour notre projet de fin d'études. En effet, cette dernière, contrairement aux autres technologies citées précédemment, est la plus adaptée au couplage avec les énergies intermittentes de par sa capacité à atteindre son point de fonctionnement nominal en un instant. De plus, la PEM est très compacte et assure une bonne perméabilité, fonctionne à des températures relativement basses avec un rendement élevé (~85%), et ce en produisant de l'hydrogène comprimé à 30 bar (ce qui limite les frais de compression ultérieurs) avec la pureté la plus élevée (>99.99%) [49].

Cependant l'inconvénient majeur de la PEM reste son coût de fabrication élevé due à l'utilisation de matériaux nobles pour les catalyseurs et les membranes, et son indispensabilité à fonctionner avec de l'eau très pure.

Nous pouvons résumer les caractéristiques de chaque type d'électrolyse dans le tableau suivant:

Technologie	Avantages	Inconvénients
Alcaline	<ul style="list-style-type: none"> • Ne fait pas appel aux matériaux nobles. • Grande fiabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de réactivité. • Chauffage préalable indispensable. • Corrosion des électrodes. • Rendement 70%. • Densité de courant $< 0.4 A.cm^{-2}$.
SOEC	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement théoriquement proche des 100%. • Membrane céramique. • Faible cout de production. 	<ul style="list-style-type: none"> • Température de fonctionnement de 1000°C. • Stade de recherche. • Faible durabilité et fiabilité.
PEM	<ul style="list-style-type: none"> • Grande réactivité. • Grande production d'H₂. • Fonctionnement à basses températures. • Simplicité de couplage avec les énergiesintermittentes. • Rendement de ~85%. • $1.4V < \text{Tension de fonctionnement} < 2.5V$ • $2A/m^2 < \text{Densité de courant} < 2.3A/m^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de métaux nobles. • Requier une grande pureté d'eau.
AEM	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement théoriquement proche des 100% • facilité de manipulation. • grande économie d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins performante. • Manque de fiabilité. • Stade de recherche.
CFE	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de 98% • Bulles éliminées • Ne requiert pas de métaux nobles • Grand potentiel • Pas de système de pompage 	<ul style="list-style-type: none"> • Stade de recherche et développement.

Tableau II.1 : Comparatifs des avantages et inconvénients des technologies d'électrolyse

II.3.2 Architecture de l'électrolyseur PEM

Une fois avoir choisis de porter notre étude sur la PEM, nous pouvons désormais nous pencher d'avantage sur son architecture:

- La cellule élémentaire : Est constituée de deux électrodes, sièges des réactions électrochimiques, et d'un électrolyte qui sépare les deux électrodes et en même temps assure le passage d'un courant ionique empêchant le passage d'un courant électronique.
- La membrane : Les membranes utilisées dans la mise en œuvre des cellules d'électrolyse sont presque exclusivement des membranes de tensioactif fluoré connu sous le nom perfluoro-sulfonées acides communément appelé (PFSA). Ces matériaux sont très résistants mécaniquement, thermiquement et chimiquement et présentent une conductivité protonique très élevée de l'ordre de 0,1 S/cm [50]. La membrane PFSA doit être aussi fine que possible (entre 90 et 200 micromètre) pour limiter la chute résistive et l'encombrement du système. Cependant, cette membrane n'est pas complètement imperméable aux gaz, de sorte qu'une partie du gaz généré peut la traverser. Ce phénomène de perméabilité de la membrane aux gaz est problématique si bien que le mélange H₂/O₂ devient explosif. Il faut donc une épaisseur de membrane suffisamment importante pour limiter ce phénomène de diffusion, notamment lorsque la pression de fonctionnement est très supérieure à la pression atmosphérique. En pratique, les épaisseurs de membrane dans les installations d'électrolyse PEM vont de 50 à 250 micromètres.
- Les électrodes: Les électrodes d'un réacteur électrochimique sont les sièges des réactions d'oxydoréduction. Elles sont conçues de manière à optimiser la surface utile de la cellule. Pour ce faire, le catalyseur est dispersé sur la surface de la membrane et une couche supplémentaire dite couche de diffusion est ajoutée à l'assemblage pour permettre aux réactifs d'être dispersés sur la surface, d'évacuer les produits de réaction, et de collecter ou distribuer les électrons de l'extérieur de la cellule électrochimique vers le siège des réactions d'oxydoréduction. Le platine est le catalyseur le plus couramment utilisé pour la

réaction de réduction du proton (réactions à la cathode). Pour la réaction d'oxydation (réaction à l'anode), l'oxyde d'iridium est le meilleur catalyseur.

- Le stack: pour produire de grandes quantités d'hydrogène, l'électrolyseur doit avoir une grande surface active disponible. Pour réaliser des électrolyseurs de puissance, il faut donc non seulement travailler avec des cellules de grandes surfaces, mais aussi utiliser plusieurs cellules simultanément. Celles-ci sont empilées et connectées entre elles en série grâce des plaques bipolaires en titane.
- Le système: Le stack nécessite un apport continu de réactifs (eau et énergie électrique) et en sortie des produits (H_2 , O_2) et de la chaleur de la réaction, il doit être intégré dans un système pour fonctionner. En général, l'apport de réactifs et l'évacuation de la chaleur sont assurés par une pompe, qui distribue l'eau au compartiment anodique par un échangeur de chaleur qui permet le refroidissement du convertisseur électrochimique. Les gazes produits sur les côtés anode et cathode sortent du stack à des températures similaires à la température de fonctionnement (environ 70-80 °C) et sont saturés en eau. Par conséquent, il est recommandé de les sécher selon l'application envisagée. Tout d'abord, un échangeur de chaleur réduit la température des gaz sortant du stack et condense l'eau contenue dans l'hydrogène et l'oxygène. Dans la seconde étape, il s'agit d'adsorber de l'eau sur des zéolithes (cristal dont les espaces vides reliés sont initialement occupés par des cations et des molécules d'eau) régénérées avec de l'hydrogène sec et pressurisé à l'aide d'un système d'absorption (pressure swing adsorption), ou de chauffage (thermal swing adsorption). Cette régénération est accomplie en consommant une partie de l'hydrogène généré et ayant ainsi un impact sur les performances globales du système. Une source d'énergie électrique est également essentielle pour alimenter le stack et les composants auxiliaires.

II.4 Dimensionnement de l'électrolyseur

II.4.1 Etat de l'art sur les performances et consommations

Selon le degré d'avancement actuel, un électrolyseur PEM à l'échelle système consomme entre 5 et 6,5 kWh pour produire un Nm³ d'hydrogène, et qu'un stack consomme entre 4 et 5 kWh environ pour le même volume d'hydrogène. La consommation du système est donc liée à la performance des stacks. Un grand nombre de systèmes d'électrolyse à membrane échangeuse de protons sont maintenant commercialement disponibles et sont déployés dans de nombreux sites et pour une gamme de production variée. Dans le tableau sont regroupés, pour quelques applications, les débits d'hydrogène produits et la puissance requise des électrolyseurs [51].

	Taille Nm ³ /h	Puissance de l'électrolyseur kW
Générateur d'hydrogène pour bijouterie, laboratoire médical	0,005 - 0,5	0,125 - 12,5
Turbine de refroidissement dans les grands alternateurs	5 - 10	25 - 50
Station à hydrogène	5 - 60	25 - 300
Fabrication de pastilles de UO ₂ à partir de UF ₆	50	250
Industrie électronique (H ₂ comme gaz vecteur de gaz réactif)	100- 400	500 - 2 000
Métallurgie (frittage en atmosphère réductrice)	200 - 750	1 000 - 3 750
Hypothèse, consommation électrique d'un électrolyseur MEP à 5 kWh/Nm		

Tableau II.2 : Exemples de puissances requises pour quelques applications d'hydrogène

II.4.2 Facteurs influents sur les performances

II.4.2.1 Effet de la température

D'après nos recherches [52], nous avons trouvé que le rendement de l'électrolyseur était lié à la température de la cellule. La conductivité de la membrane et la chaleur sont proportionnellement liées. Si bien qu'une augmentation de la chaleur entraîne une diminution des surtensions au niveau des électrodes et augmente la rapidité des réactions. Par conséquent, améliore l'efficacité du système et permet donc un gain d'énergie. Ajoutons à cela que l'optimisation de la température permet de réduire considérablement la perméabilité d'hydrogène à de faibles densités de courant [53].

Cependant, il y a une limite à l'augmentation de la température car au-delà d'une certaine valeur, les matériaux utilisés risquent d'être endommagés. En effet, la résine échangeuse d'ions est instable lorsque la température est augmentée au-dessus de 80 °C. Cela se produit en raison de la dégradation chimique qui conduit à un amincissement de la membrane.

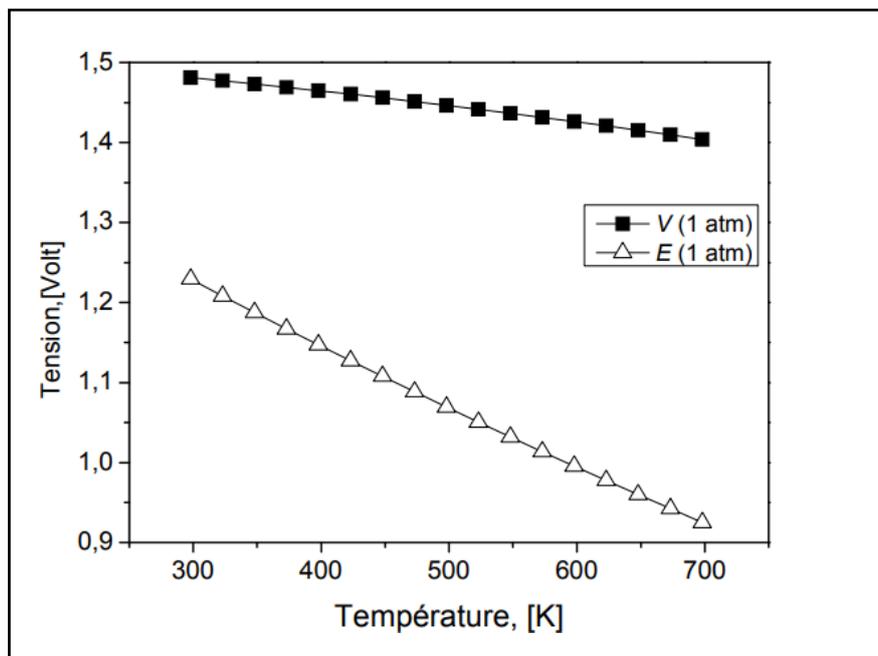


Figure 2.5 : Influence de la température sur la tension d'électrolyse et d'enthalpie.

II.4.2.2 Effet de la pression

Dans le cadre de nos recherches sur l'effet que peut avoir la pression sur les performances de l'électrolyseur, nous avons trouvé plusieurs divergences voir même paradoxes à ce sujet. Certains rapportent que l'augmentation de la pression entraîne une diminution du rendement [54], tandis que d'autres affirment le contraire. Nous allons donc expliquer le phénomène à travers ce graphe:

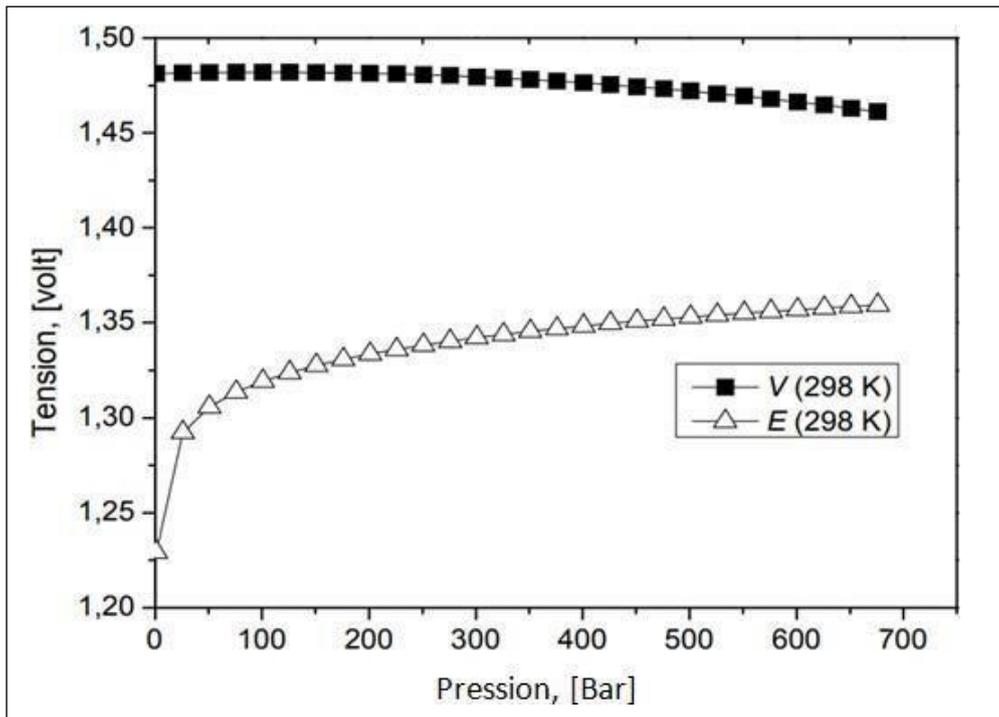


Figure 2.6 : Influence de la pression sur les tensions (E) et (V)

La figure ci-dessus représente la variation de tension en fonction de la pression à température constante (298°K). Nous remarquons qu'il y a deux courbes: "V", étant la tension irréversible (effective), et "E" étant la tension de décomposition réversible.

On observe que la tension "V" diminue avec l'augmentation de la pression, et ce de façon non drastique. En revanche, la tension réversible "E" augmente fortement de 1 à 50 Bar puis continue d'augmenter graduellement.

La diminution de la tension "V" s'explique par la réduction des bulles d'oxygène agrippées à l'anode ce qui maximise le contact entre l'eau et l'anode et par conséquent permet d'avoir une plus grande densité de courant améliorant ainsi le rendement de l'électrolyseur.

L'augmentation de la tension "E" s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la pression, les molécules d'eau deviennent difficiles à être dissociées. Et donc la quantité d'énergie minimale pour que l'électrolyse de l'eau puisse avoir lieu augmente (Enthalpie de Gibbs) causant ainsi une baisse du rendement de l'électrolyseur.

L'avantage d'opérer une électrolyse à haute pression est donc de réduire la phase gazeuse au niveau des électrodes, d'avoir une densité de courant plus optimale, de limiter les pertes d'eau par évaporation lors de l'utilisation à des températures élevées. De plus, l'hydrogène produit est lui même à haute pression, ce qui limite le besoin d'énergie pour le comprimer.

Cependant l'augmentation de la pression engendre des problèmes de corrosion et d'autres instabilités dans les composants de l'électrolyseur, augmente la perméabilité de la membrane qui pourrait causer la recombinaison de l'hydrogène et l'oxygène [55]

Par conséquent, le niveau de pression nécessaire pour optimiser l'efficacité globale du système est un compromis entre la réduction des besoins en chaleur externe et l'augmentation de l'épaisseur de la membrane pour une meilleure perméabilité.

II.4.3 Dimensionnements de l'électrolyseur PEM

Dans cette partie nous présenterons la manière de calculer la quantité produite d'hydrogène aux conditions de pression et de températures normales actuelles et les conditions généralement utilisées actuellement dans les électrolyseurs PEM commercialisés.

II.4.3.1 Production d'hydrogène

La quantité d'hydrogène par un électrolyseur est proportionnelle au courant et au rendement faradique, selon la loi de Faraday [56]

$$n \cdot H_2 = \frac{N_{cel} \cdot I}{N_e} \eta f$$

$$n \cdot H_2 = n \cdot H_2O = 2n \cdot O_2$$

nH_2 : quantité d'hydrogène produite

nH_2O : quantité d'eau consommée

nO_2 : quantité d'oxygène produite

ηf : rendement faradique

N_{cell} : le nombre de cellules

F : constante de Faraday

N_e : nombre d'électrons dans la réaction

I : intensité du courant

II.4.3.2 Production d'hydrogène à haute pression

Pour pouvoir produire de l'hydrogène nous avons besoin d'un compresseur ou d'une pompe à l'entrée de l'électrolyseur ou à sa sortie. C'est-à-dire avoir directement de l'hydrogène comprimé à la cathode ou bien pomper de l'eau à l'anode. Ces deux méthodes peuvent toutes les deux donner de l'hydrogène à haute pression. Cependant d'après certaines recherches [56] le système de pompage d'eau a montré avoir moins de consommation d'énergie pour la même quantité d'hydrogène produite comparé à la compression de ce gaz à la sortie de l'électrolyseur [56,57]

II.4.3.3 Production d'hydrogène à haute température

Pour pouvoir jouer sur la température de l'électrolyseur et ainsi pouvoir augmenter ou diminuer le taux de production d'hydrogène, nous devons apporter une chaleur que ça soit de l'environnement extérieur ou bien par la surtension. L'avantage de l'apport de la chaleur par l'environnement est que cette méthode réduit la consommation d'énergie électrique mais nécessite un équipement supplémentaire pour fournir cette chaleur (eg : les concentrateurs solaires). Si la chaleur est fournie par la surtension de la cellule, la consommation en énergie électrique augmentera [56,57].

Soit en volt la tension appliquée à la cellule d'électrolyse [56], U_{cell}

-si, $U_{\text{cell}} < E^\circ$ il n'y a pas d'électrolyse

- si, $E^\circ < U_{\text{cell}} < V^\circ$ un apport extérieur de chaleur est nécessaire pour assurer une transformation autotherme (tension réversible)

-si, $U_{\text{cell}} > V^\circ$ la chaleur nécessaire est produite par la surtension électrique dans la cellule (tension irréversible)

E° étant la tension thermodynamique ou tension minimale requise pour la dissociation d'une molécule d'eau (V), et V° la tension enthalpique ou thermo-neutre est la tension requise pour que la chaleur soit autoproduite par l'électrolyseur (V). U_{cell} la tension appliquée à la cellule de l'électrolyse.

II.4.3.4 Rendement faradique

Pour comprendre ce qu'est le rendement faradique il faut regarder à l'intérieur de l'électrolyseur plus précisément dans la membrane. Cette dernière permet le transfert des ions H^+ de l'anode à la cathode mais parfois aussi l'inverse, c'est-à-dire reconduire H_2 pour qu'il soit ré-oxydé en protons et ainsi l'oxygène est réduit en eau. Cet effet de réversibilité s'apparente à la porosité des membranes ainsi qu'aux courants parasites qui perturbent l'efficacité du courant principale. En d'autres termes le rendement faradique est le rapport entre la quantité de courant utilisé pour produire une certaine quantité d'hydrogène et la quantité de courant fournie à l'électrolyseur [57].

Une équation empirique résume le comportement du rendement faradique en fonction de la densité de courant et de la température.

$$\eta_F = a_1 \cdot \exp \left[\frac{a_2 + a_3 T + a_4 T^2}{J} + \frac{a_5 + a_6 T + a_7 T^2}{J^2} \right] \quad (2-1)$$

Les paramètres de l'équation :

- a₁ 99.5 %
- a₂ -9.5788 m²/A
- a₃ -0.0555 m²/(A °C)
- a₄ 0
- a₅ 1502.7083 m⁴/A
- a₆ -70.8005 m⁴/(A °C)
- a₇ 0

J : la densité électrique [a/m2]

T : température [°C]

Voici le schéma bloc simulink pour le rendement faradique :

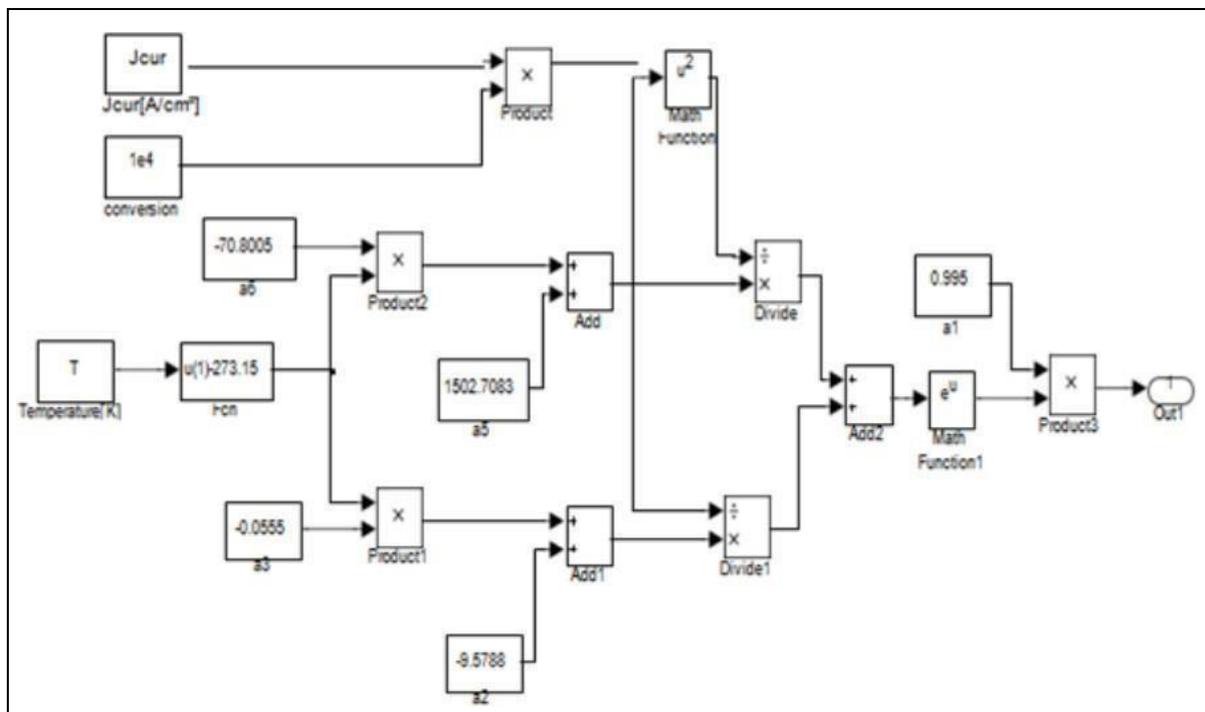


Figure 2.7 : Schéma simulation simulink du rendement faradique

La traduction graphique du rendement faradique :

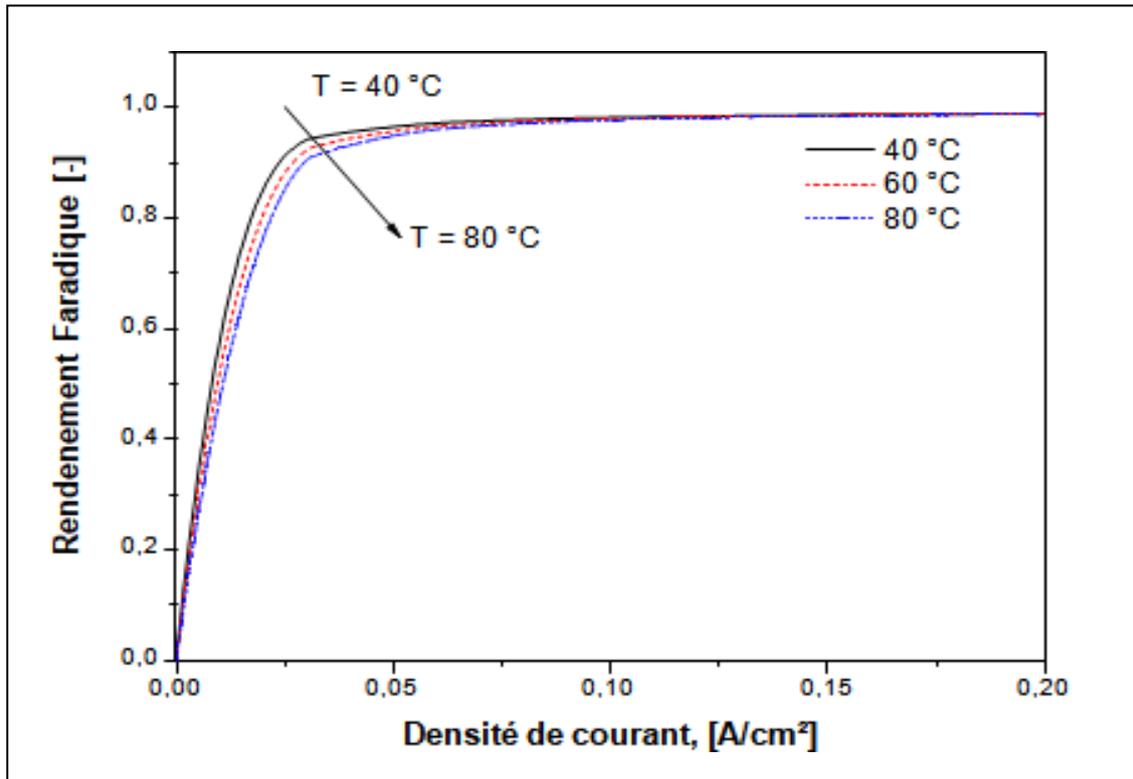


Figure 2.8 : Le rendement faradique en fonction de densité de courant et de la température [57]

On remarque que le graphe si haut que le rendement faradique augmente avec la densité du courant, expliqué par la diminution des courants parasites, tandis que l'augmentation de la température fait baisser le rendement car elle favorise l'apparition de courants parasites

Néanmoins, il faudra noter que même si la température apporte une baisse de rendement faradique, ce qui peut être contradictoire avec ce qu'on a mentionné dans le précédemment (chapitre II-4-2). Elle affecte positivement le rendement énergétique en réduisant la résistivité de la cellule contrairement au rendement faradique qui est affecté négativement par la température. Donc le challenge ici est de trouver la température idéale pour avoir un rendement optimale. Pour la PEM les constructeurs tel Nafion et Cummins utilisent des températures qui varient entre 20°C et 80°C.

II.4.3.5 Estimation du taux de production d'hydrogène

Dans cette partie nous allons faire un schéma Simulink pour pouvoir visualiser la quantité d'hydrogène produite en Nm³/h selon la loi de faraday légèrement modifiée pour pouvoir introduire le rendement faradique en fonction de la température[57] :

$$n_{H_2} = \frac{N_{cell} \cdot S_{cell} \cdot J}{2F} \cdot \eta_F, \quad (2-2)$$

n_{H_2} : quantité d'hydrogène

N_{cell} : nombre de cellules

S_{cell} : surface des cellules

J : densité de courant.

F : constante de faraday

$\eta_{F,pem}$: rendement faradique

Il faudra noter que la quantité d'hydrogène produite est en mol/s, donc il faudra un facteur de conversion pour pouvoir avoir notre donné désiré. On multiplie donc le résultat par 80.6.

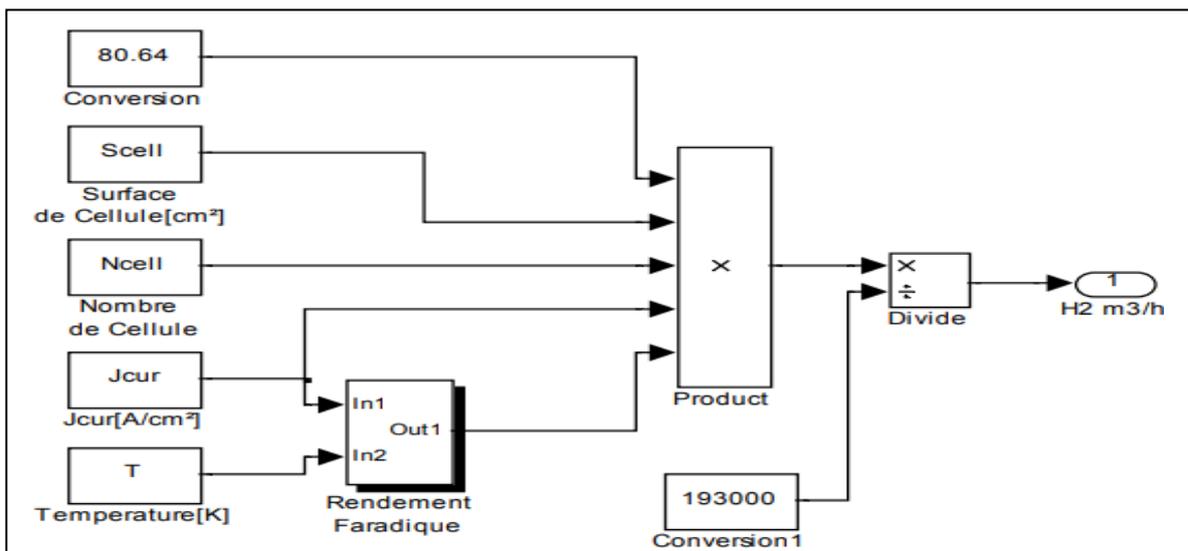


Figure 2.9 : schéma Matlab Simulink de la production d'hydrogène en m³/h

Pour des cellules d'une superficie de $S_{cell}=50\text{cm}^2$ et un nombre de 10 cellules pour 353k et on visualise ces graphes à partir de notre schéma Simulink concernant l'effet de la densité du courant sur la quantité d'hydrogène produit

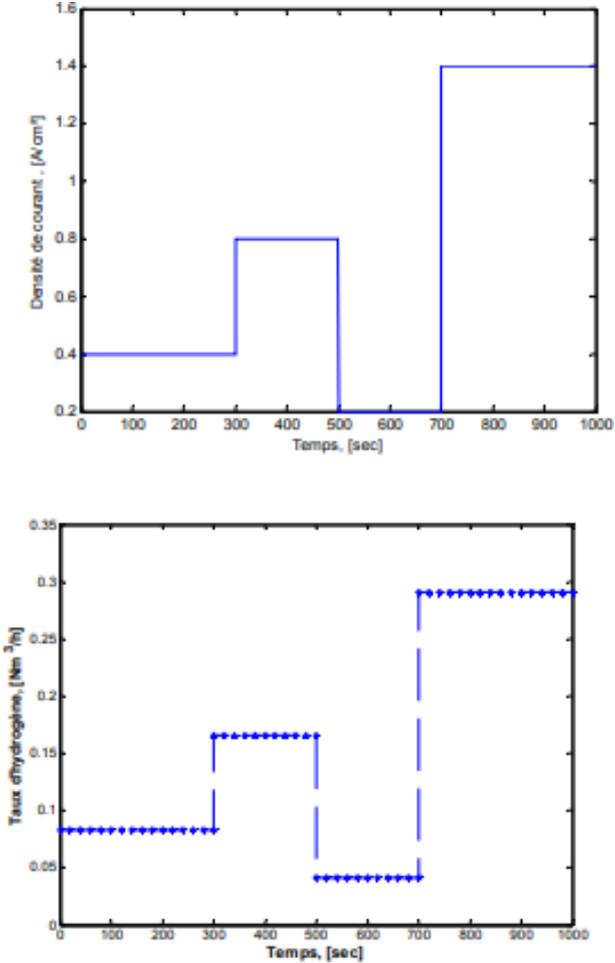


Figure 2.10 : résultat de la simulation pour $N_{cell}=10$

Maintenant nous allons refaire une simulation pour un nombre de 300 cellules

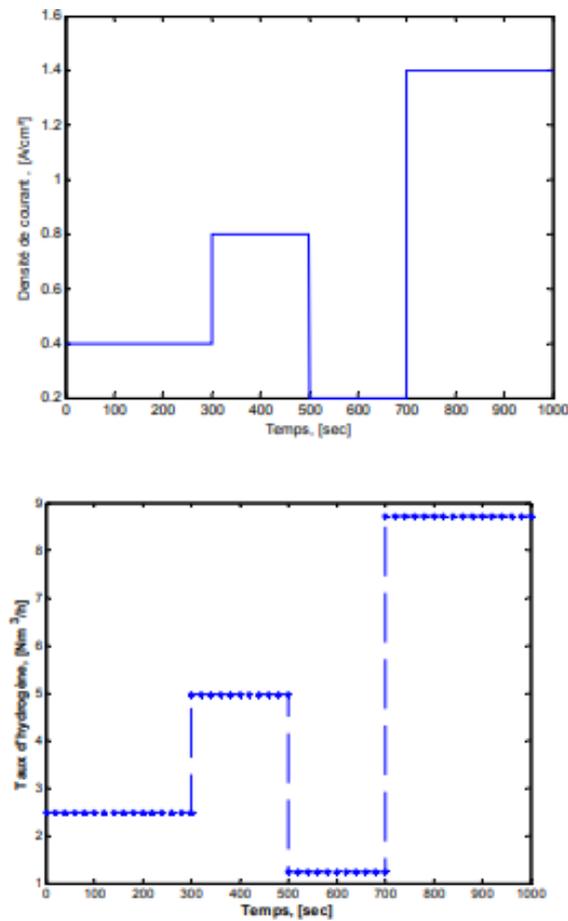


Figure 2.11 : résultats de la simulation pour $N_{\text{cell}}=300$

En visualisant les deux courbes avec des nombres de cellules différents (50 cellules et 300 cellules) nous distinguons clairement que la densité du courant ainsi que le débit d'hydrogène augmentent, ce qui est tout à fait similaire aux résultats de B.Laoun [57].

On conclue alors qu'effectivement, la densité de courant ainsi que la quantité d'hydrogène produite sont proportionnellement liées (annexe3-4). Or la densité de courant est directement affectée par le changement du nombre de cellules, ce qui est expliqué par le montage en série du stack pour un même courant et une même superficie de cellules (le stack a été compacté). Ceci se résume à l'augmentation de la densité du courant.

II.4.4 Bilan de consommation de l'électrolyseur

Nous allons maintenant nous pencher sur la quantité d'énergie électrique consommée par l'électrolyseur dans le cadre de la production d'une certaine quantité d'hydrogène. En premier lieu nous allons négliger les effets de la pression sur les cellules de l'électrolyseur car ces dernières sont négligeables et moins avantageuse que ceux de la température. En premier lieu, nous allons écrire l'équation d'enthalpie en fonction de la température. Ensuite, nous allons estimer les surtensions existantes dans le stack (résistances de la membrane, anode, cathode) pour pouvoir avoir des résultats plus précis sur la quantité d'énergie utilisée. Pour finir nous allons voir le rendement énergétique de l'électrolyseur [56].

II.4.4.1 Equations thermodynamiques

Le principe de l'électrolyse peut être résumé sur une équation d'enthalpie de réaction qui est comme suit :

$$\Delta H_T = \Delta G_T + T\Delta S_T, \quad (3-2)$$

ΔH : l'enthalpie de réaction

ΔG : l'enthalpie libre de

Gibbs T : la température

ΔS : l'entropie

L'enthalpie libre de Gibbs représente la quantité d'énergie minimale apportée pour permettre l'électrolyse (énergie réversible). Elle permet également de calculer la tension réversible ($E_{rév}$). elle se présente de la sorte :

$$\Delta G_T = nFE \quad (3-3)$$

n : nombre d'électrons participant dans la réaction de dissociation de l'eau

F : constante de faraday

E : tension réversible

A cause des irréversibilités dans le processus ainsi que la résistance du stack, la quantité d'énergie nécessaire pour l'électrolyse est toujours supérieure à celle idéale. On parle alors d'un potentiel thermique ajouté :

$$\Delta E_T = \frac{T\Delta S_T}{n.F} \quad (4-2)$$

En additionnant le potentiel thermique et le potentiel réversible, nous allons obtenir le potentiel enthalpique (tension irréversible),

$$V_{T,P} = \frac{\Delta H_{T,P}}{n.F} \quad (5-2)$$

On déduit donc que la tension minimale théorique requise s'écrit :

$$V_T = E + \Delta E_Q \quad (6-2)$$

Ce tableau indique les grandeurs thermodynamiques essentielles de l'électrolyse de l'eau aux conditions normales de pression et de température [56] :

$\Delta G_{T,P}$	237,22 kJ/mol
$\Delta H_{T,P}$	285,840 kJ/mol
$\Delta S_{T,P}$	0.163 kJ/K.mol
E_Q	0.252 V
$E_{T,P}$	1.229 V
$V_{T,P}$	1.481 V

Avec l'emploi de la capacité calorifique de l'eau nous pouvons également écrire l'équation de l'enthalpie de réaction de l'eau sous cette forme [56] :

$$\Delta H_{Tf} = \Delta H_{Tinit} + \int_{Tinit}^{Tf} C_{p,20}^0(T) T \quad (7-2)$$

Remarque : nous avons la variation d'enthalpie uniquement par rapport à la température dans ce cas de figure.

L'équation thermodynamique du changement d'entropie s'écrit [57]:

$$\Delta S_{(Tf)} = \Delta S_{Tinit} + \int_{Tinit}^{Tf} \frac{C_{pH_2}(T)}{T} dT \quad (8-2)$$

II.4.4.2 Equations des potentiels électriques

- Tension thermodynamique: En tenant compte des équations (5-2) et (7-2) nous obtenons la variation de la tension V_T , à la pression atmosphérique :

$$V_{T,atm} = 1.485 - 1.49 \times 10^{-4}(T - 273.15) - 9.84 \times 10^{-8}(T - 273.15)^2 \quad (9-2)$$

- Tension enthalpique: En tenant compte des équations (4-2) et (8-2) nous obtenons la variation de la tension E_T , en fonction de la température :

$$E_T = 1.5184 - 1.5421 \times 10^{-3}T - 9.523 \times 10^{-5}T \ln T + 9.84 \times 10^{-8}T^2 \quad (10-2)$$

Selon [57] ces données sont valables pour des températures allant de 25°C à 327°C.

- Tension de l'électrolyseur: Nous pouvons résumer la tension de l'électrolyseur par une modélisation qui montre le circuit équivalent du potentiel global aux bornes de la cellule [57,58] :

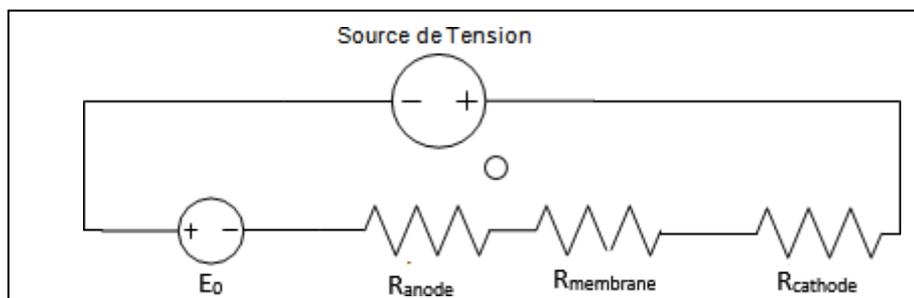


Figure 2.12 : schéma simplifié du circuit équivalent de la tension de l'électrolyseur

L'équation de la tension équivalente est donnée comme suit :

$$U_{cell} = E_0 + R_{cathode} + R_{anode} + R_{membrane} \quad (11-2)$$

Pour la résistance à la cathode et l'anode nous avons :

$$R_{anode} = R_{cathode} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{J}{J_0^{ref}}\right) \quad (12-2)$$

En prenant compte de :

$$J_{cathode} = J_{anode} \text{ et } T_{anode} = T_{cathode}$$

Remarque : Vu que la disposition des éléments de l'électrolyseur sont montés en série, le courant et ainsi la densité du courant sont supposés les même dans tout le système.

L'équation de la surtension de la membrane est donnée par cette équation [58] :

$$R_{membrane} = L \int_0^1 \frac{dx}{\sigma_{pem}(x)} \quad (13-2)$$

Sachant que "x" est la longueur linéaire du circuit en commençant par l'anode, "σ" étant la conductivité ionique de la membrane, et "L" l'épaisseur de la membrane

La puissance totale de la cellule peut être définie de la sorte [56] :

$$P = I \times U_{cell} \quad (14-2)$$

II.4.4.3 Rendement énergétique

On peut maintenant déterminer à travers la tension de la cellule son rendement énergétique :

$$\varepsilon = \frac{W_t}{W_r} \quad (15-2)$$

Or :

$$W_t = V_T \quad (16-2)$$

$$\text{Et } W_r = U_{cell} I t \quad (17-2)$$

On peut aussi écrire la relation du rendement avec la tension uniquement [56] : $\varepsilon = \frac{V_T}{U_{cell}}$

II.5 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous avons abordé le thème de l'électrolyse de l'eau. Nous avons étudié son fonctionnement, les facteurs qui influent sur le rendement, les différents types de technologies ainsi qu'une comparaison de ces dernières. Nous avons donc pu déterminer la technologie d'électrolyse qui convient le mieux à notre projet. Et suite à ce choix nous avons pu dimensionner à travers des équations thermodynamiques et électriques, le modèle d'électrolyseur utilisé ainsi que les équations et relations nécessaires au calcul de ses caractéristiques et performances.

CHAPITRE III:Source d'alimentation électrique de l'électrolyseur (Photovoltaïque)

III.1 Généralités

III.1.1 Introduction

Dans cette partie notre objectif principal est de pouvoir dimensionner une station de panneau solaire afin de produire assez d'hydrogène pour remplacer le gaz naturel ou parfois le gasoil utilisé dans les centrales thermiques, particulièrement les centrales à vapeur comme celle de Jijel notamment. Mais aussi, et principalement employé cet hydrogène dans les piles à combustible pour produire de l'électricité en jonction avec les panneaux photovoltaïques dans un système hybride que nous allons détailler plus tard dans ce chapitre.

III.1.2 Définition de l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par la transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Le terme photovoltaïque un phénomène physique, qui vient de l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Ce mot vient à l'origine du mot grec qui est composé de deux parties : le préfixe « photo », désignant « lumière » ou « clarté », et le suffixe « volt », relatif au pionnier de l'électricité Alessandro VOLTA. On peut donc étymologiquement traduire photovoltaïque par électricité de la lumière [59].

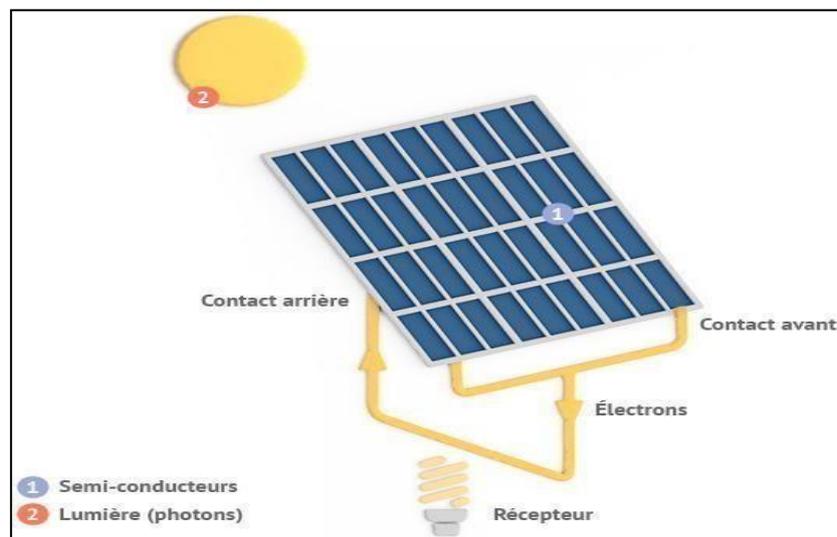


Figure 3.1 : schéma général d'un panneau photovoltaïque

III.1.3 Histoire de l'énergie photovoltaïque

L'histoire des panneaux photovoltaïque comme nous le connaissons actuellement est passé par 3 étapes majeures avant d'en arriver là aujourd'hui.

D'abord il passe par l'étape de sa découverte et du développement des premières cellules photovoltaïques qui constituent actuellement nos panneaux. L'effet photovoltaïque qui se passe à l'intérieur de ces cellules a été découvert pour la première fois en 1839 par le célèbre physicien Alexandre Edmond Bequeret qui grâce à ces cellules a réussi à produire de l'électricité à partir de la lumière à partir de matériaux semi-conducteurs tel le silicium. Ce n'est qu'une trentaine d'années plus tard qu'en 1875, Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la ce phénomène reste encore un phénomène de laboratoire. En 1883 fut la première cellule photovoltaïque créée par Charles Fritts. Elle avait un rendement d'à peu près 1% qui n'avait aucun intérêt d'être exploité à l'époque. En plus de son rendement ridicule les cellules étaient composées d'or qui était et reste un actif rare et très cher pour être utilisé à l'échelle quotidienne. Les premières vraies cellules fonctionnelles sont apparues Après 1913, mais ce n'est qu'en 1916 que Robert Millikan parvient à produire un courant continu. Ce bon dans la conversion de l'énergie solaire a permis à d'autres chercheurs de travailler sur la question du photovoltaïque et de améliorer son rendement jusqu'en 1954 où les chercheurs des laboratoires Bell ont réussi à obtenir un rendement de 6% de leur cellules en remplaçant certains composants semi-conducteurs par d'autres comme le sélénium qui a été remplacé par le silicium par exemple. C'est le premier véritable panneau solaire [59].

Après la naissance des premiers panneaux solaires. On passe à la deuxième étape où ils ont connus un bon à 9% de rendement en 1958 pour être employé dans l'espace afin d'alimenter les satellite qui autre fois utilisé le nucléaire comme source d'énergie dans l'espace. Dès les années 60 cette nouvelle source d'énergie dans l'espace n'avait presque plus de concourants d'où sa partialité et son infinité car alimenté par le soleil. Pendant leurs applications dans le domaine spécial les chercheurs ont travaillé sur la réduction des couts de production ainsi que sur l'amélioration du rendement des panneaux.

Les améliorations apportés à ces panneaux pendant leur exploitation spéciale ont permis d'envisager leur emploie ment sur terre notamment dans les réseaux domestiques ou

dans des environnements difficiles d'accès au réseau électrique. Notamment cette technologie a été sujette à des expériences dans l'espace avant d'être employée sur la surface de notre planète. En 1973, la première maison entièrement alimentée par énergie photovoltaïque est construite à l'université du Delaware. Je cite également la première voiture à énergie photovoltaïque a parcouru 4000 KM en Australie. à la fin du 20ème et à l'aube du 21ème siècle, notamment à partir de 1995, des pays pionnier dans le domaine comme le Japon et l'Allemagne ont commencé à raccorder les installations photovoltaïques à leur réseau électrique. Ce phénomène a commencé à se généraliser à partir de 2001 pour les autres pays.

Aujourd'hui les panneaux photovoltaïques occupent une place assez notable dans le monde (2,1% de la production mondiale de l'électricité) mais pas assez importante comparé aux autres énergies telle le charbon ou le gaz naturel par exemple (37% et 23% respectivement de la production mondiale de l'électricité). Néanmoins cette source d'énergie n'est encore qu'à son début de développement contre les autres sources d'énergies qui sont ancrés dans nos systèmes de production d'énergie de puis déjà plus de deux siècles, et le solaire promet une importante source d'énergie si on parvient à la stocker en employant l'hydrogène par exemple et l'exploiter dans les meilleures conditions.

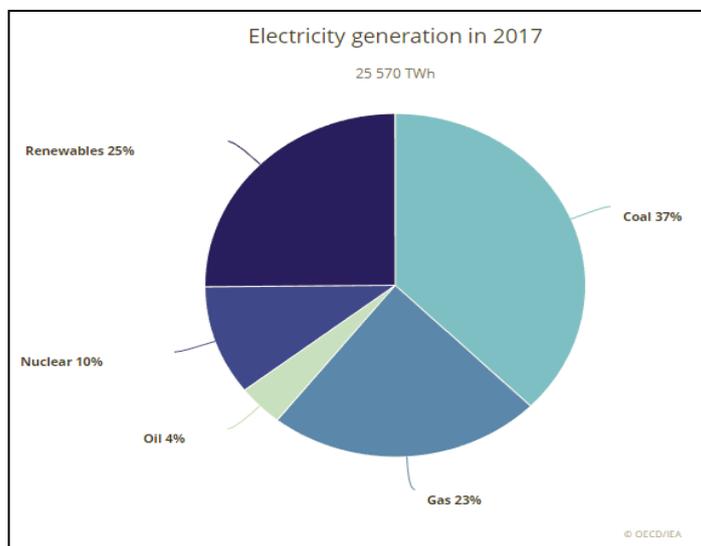


Figure 3.2 : Sources d'électricité à travers le monde en 2017

III.1.4 L'intérêt au photovoltaïque

En Employant l'énergie photovoltaïque nous pourrions à la fois:

- Avoir une énergie gratuite; c'est à dire que nous n'aurons besoin de fabriquer ou de convertir aucune énergie nous même mis appart la fabrication et l'installation des centrales solaires, puis le reste sera fourni par le soleil de manière infinie [60].
- Avoir de très basse voir non-existantes émissions de CO₂. Car même si nous prenons en compte l'énergie nécessaire à la production et à l'extraction des matériaux et leurs émissions de CO₂, cette source d'énergie convertie uniquement les photons en électricité [60].
- garantir la production et le recyclage des panneaux: car pour pouvoir produire ces panneaux on doit avoir suffisamment de matière pour subvenir à nos besoin. Or le silicium matériau qui compose les panneaux photovoltaïques en majeure partie est l'élément le plus abondant sur la surface de notre planète après l'oxygène. Bien qu'il soit très disponible il n'est cependant pas inépuisable, contrairement à l'énergie solaire. Mais cela ne cause pas de problème car le recyclage des panneaux solaires sont bien plus facile et rentable que le recyclage des énergies fossiles par exemple [60].

Nous avons choisis les panneaux solaires au détriment d'autres sources d'énergie renouvelables et vertes par rapport à l'emplacement géographique, et si nous puissions dire, sa richesse en matière de rayonnement solaires car l'Algérie est parmi les pays qui comptent les régions les plus ensoleillées du monde aussi bien en puissance qu'en nombre de jour sans qu'elles ne soient forcément exploitées. L'autre avantage est que l'Algérie possède des ressources très importantes de matériaux nécessaires à la production des panneaux photovoltaïques notamment le silicium [31] et le phosphore qui sont des composants indispensables pour la production de PV pour garantir une production d'énergie au profit de l'utilisation de 100% de ressources locales.

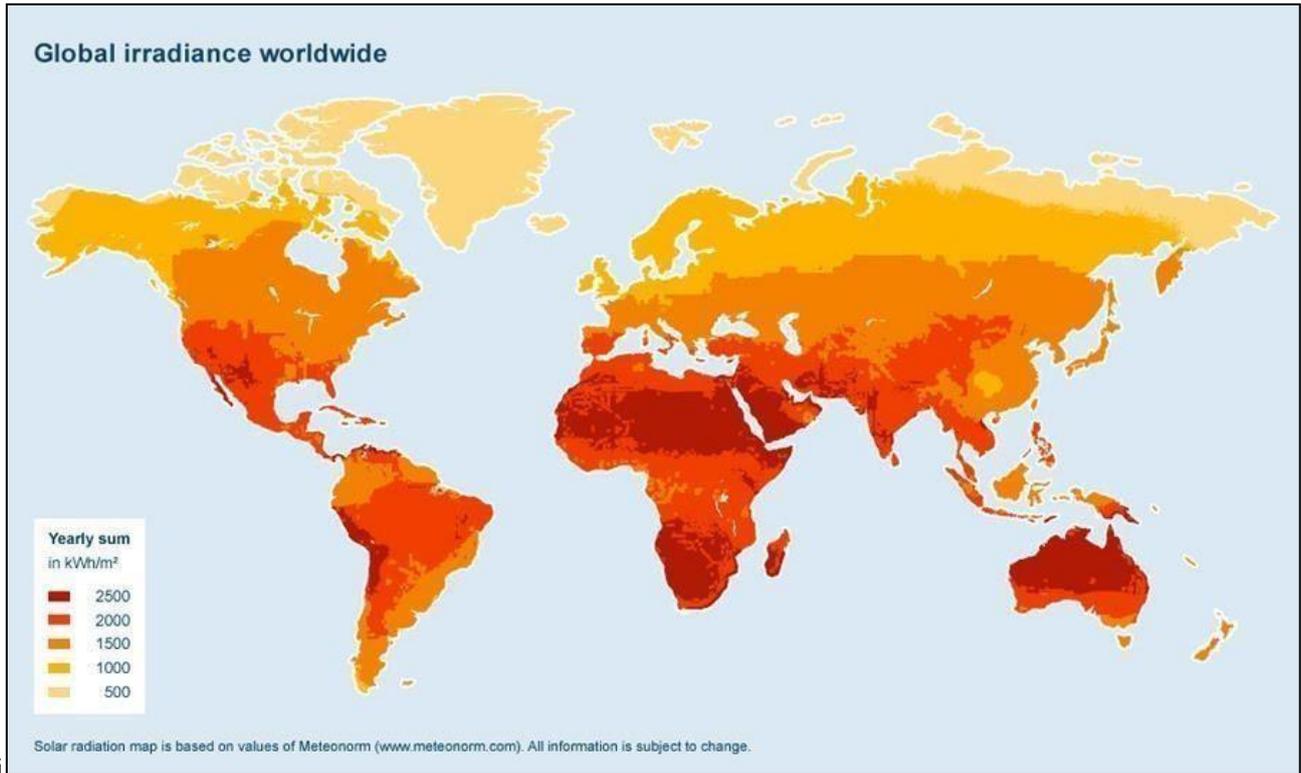


Figure 3: Carte montrant l'énergie d'irradiation dans le monde annuellement

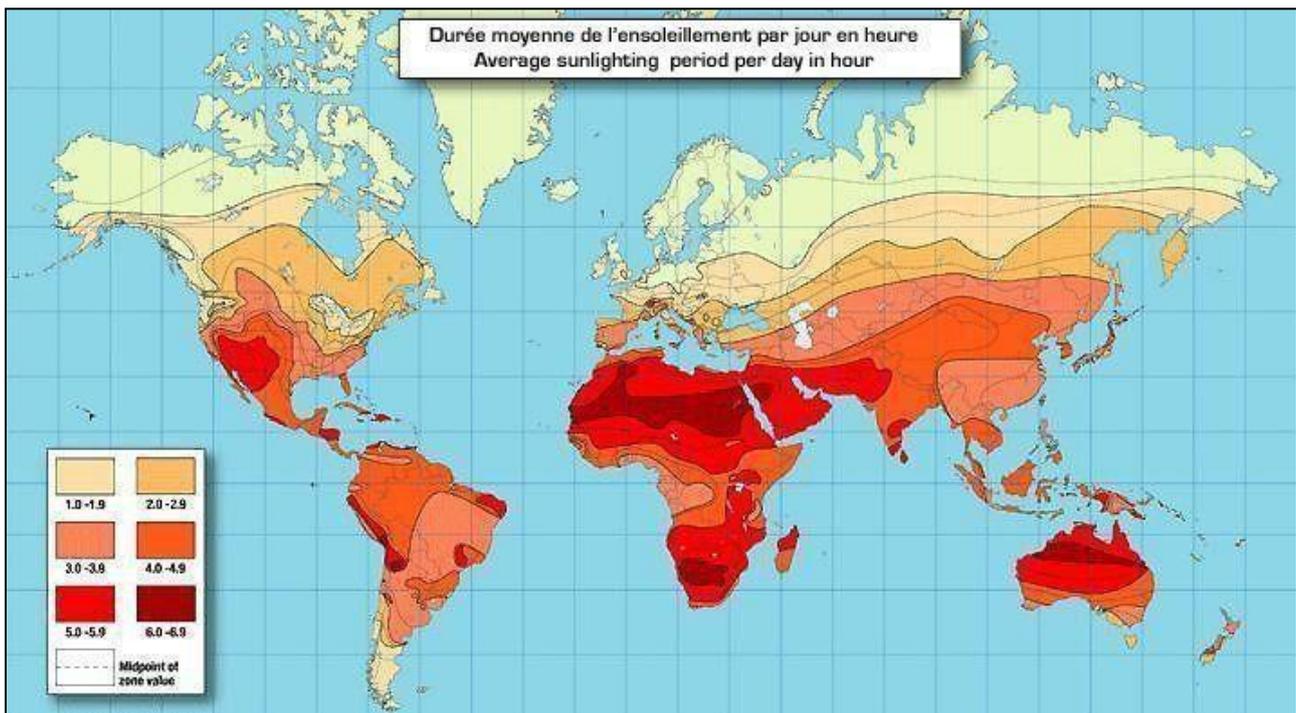


Figure 3.4 : carte montrant la durée moyenne d'ensoleillement par jour à travers le monde

III.1.5 Fonctionnement des panneaux photovoltaïques

Pour mener à bien notre projet et tirer un maximum du rendement énergétique des panneaux que nous allons utiliser nous devons d'abord comprendre leur fonctionnement basique. Mais d'abord il faudra mettre un point sur l'appellation de ces panneaux car nous trouvons sur certains articles que beaucoup tendent à confondre les panneaux solaires et les panneaux photovoltaïques car la différence réside dans le moyen de production d'électricité. les panneaux photovoltaïques eux emploie directement le rayonnement solaire c'est à dire les photons pour produire de l'électricité, tandis que les panneaux solaires emploient la chaleur dégagé par le soleil pour produire indirectement de l'électricité qui sont bien moins efficace que les panneaux photovoltaïques. Pour notre étude nous allons prendre en considération uniquement les panneaux photovoltaïques bien que nous puissions citer si dessus ou si dessous les panneaux solaires [61].

Ceci dit nous allons nous attaquer au fonctionnement exact de ces panneaux qui réside dans l'effet photovoltaïque et la production de l'électricité.

III.1.5.1 Matériaux utilisés

Le composant le plus indispensable dans un panneau photovoltaïque est tout le temps les cellules photovoltaïques qui elles même sont composées de silicium homogène ou non au selon le type de panneaux qu'ils soient monocristallin ou bien polycristallin respectivement. Le silicium retrouvé alors dans ces cellules est dopé par du phosphore et du bore afin d'améliorer sa conductivité [61].

A sa surface le panneau bénéficie d'une plaque de verre trempé afin de protéger les cellules à la fois des UV de la poussière l'humidité et d'autres éléments extérieurs. On pourra retrouver aussi du plexiglas ou bien du polycarbonate en tant que protection. Cependant il existe aussi une enveloppe EVA qui permet de protéger les cellules contre les éléments de la nature. Cette enveloppe est une sorte de résine chimique très adhésive qui n'est pas conductrice, étanche, et transparente pour garantir la conductivité thermique et optique du rayonnement solaire. Cette couche a pour objectif de maximiser la durée de vie des panneaux photovoltaïques [61].

En ce qui est de la partie dans le dos du panneau on retrouve une membrane en tedlar de couleur noir afin de protéger les cellules également des agressions extérieures telles que la température, l'humidité, la corrosion etc. On retrouve également les boîtes de jonctions qui sont là uniquement pour connecter l'électricité des cellules au reste de l'installation [61].

Pour finir on installe tous les composants cités précédemment dans un cadre en aluminium qui permettra de solidifier l'ensemble et maintenir le panneau en place contre les vents ou les tremblements de terre par exemple.

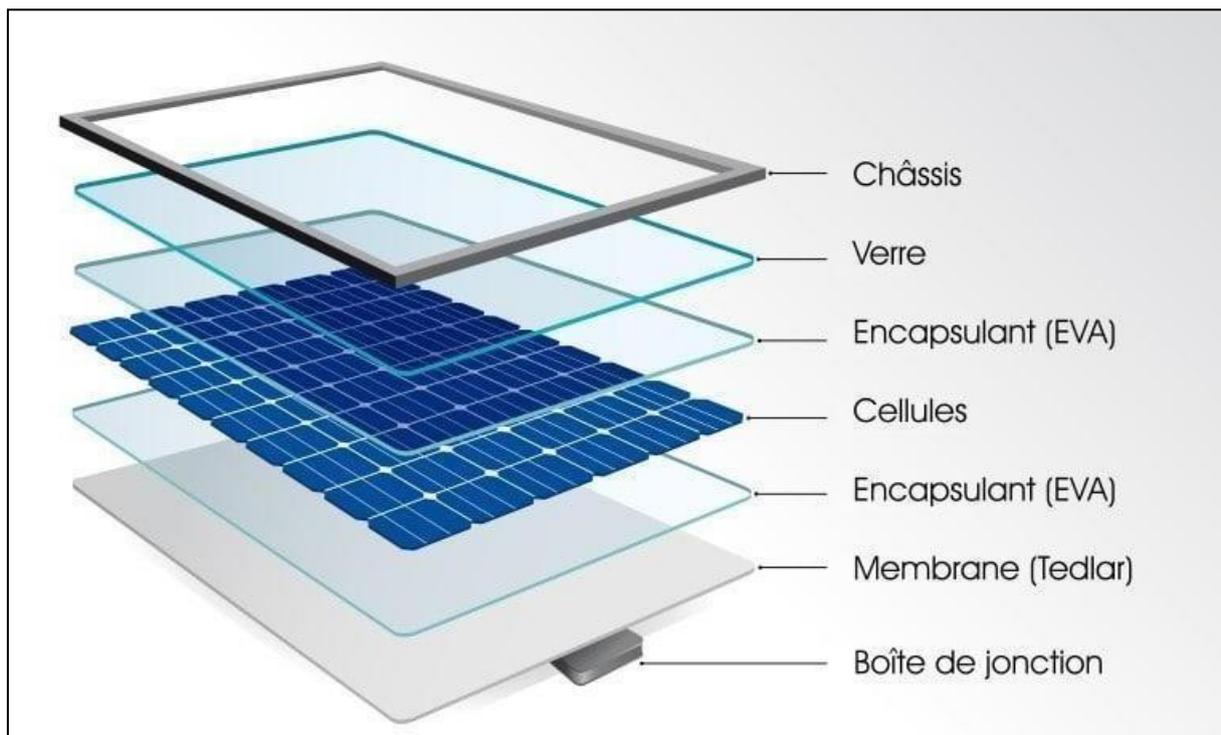


Figure 3.5 : Composition d'un panneau photovoltaïque

III.1.5.2 De la lumière à l'électricité

Pour pouvoir produire de l'électricité le panneau photovoltaïque doit premièrement passer par:

- la première étape: l'absorption des photons qui compose la lumière du soleil par les matériaux (le silicium) qu'on retrouve dans les cellules photovoltaïques qui sont principalement dopés (avec du phosphore et du bore) pour créer des semi-conducteurs avec des jonctions "p-n" (positif-négatif). Le dopage permet d'avoir un champ électrique intrinsèque tel que le champ magnétique dans un aimant permanent [62].

- la deuxième étape: ces photons transfèrent leurs énergies aux électrons qui se trouvent dans les cellules. Ceci se fait en arrachant des électrons aux cellules de silicium pour créer des charges positives et négatives [62].
- La dernière étape est celle de formation de charges électriques grâce au mouvement des électrons. Ceci est réalisé à partir de jonction p-n qui permettent de mouvoir un champ électrique [62].

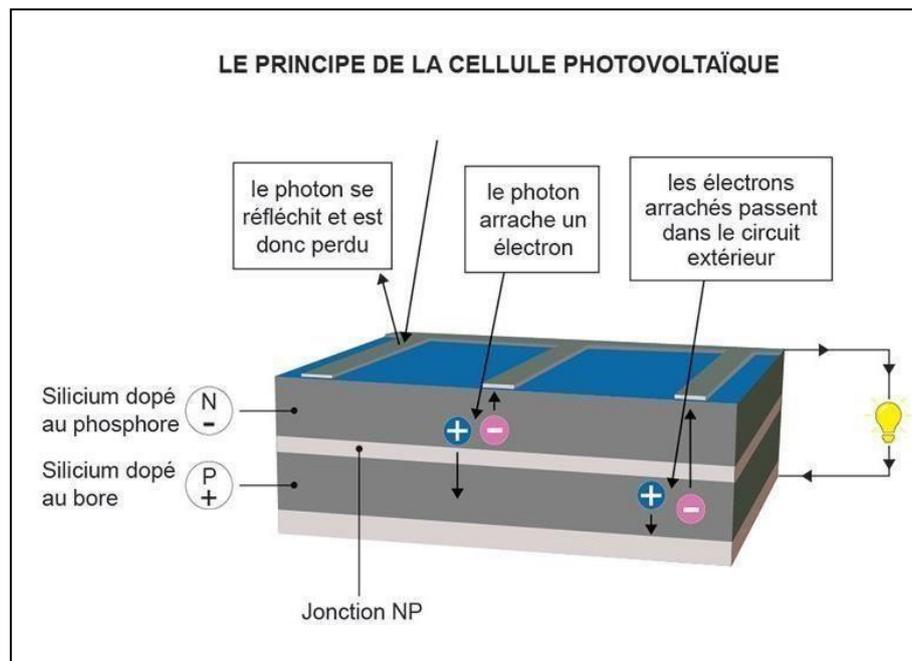


Figure 3.6 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

III.2 Types de technologies photovoltaïques

III.2.1 Monocristallin

Les cellules d'un panneau solaire monocristallin sont issues de la découpe d'un bloc de silicium unique et c'est pour cela que ce dernier est caractérisé par sa structure parfaitement homogène. Le silicium monocristallin est obtenu par un refroidissement de manière telle qu'il se solidifie en un seul bloc. C'est précisément ce processus qui confère toutes ses qualités au panneau monocristallin. En effet, plus le silicium est pur, plus sa capacité de semi-conduction est élevée. Le panneau solaire monocristallin bénéficie donc des meilleurs rendements (entre 16 et 24%). En outre sa particularité à avoir de meilleures performances par faible ensoleillement et de capter les rayons du soleil plus tôt le matin et plus tard le soir [63].

Hormis son processus de fabrication long, énergivore et onéreux, le panneau monocristallin est particulièrement sensible aux hausses de température. En effet, ses performances sont à leur maximum lorsqu'il se trouve dans un environnement frais, voire froid. En revanche, dès que le ciel se couvre ou que la température excède 25°C, son rendement décline très rapidement si bien qu'à chaque degré au-dessus de 25 lui fait perdre de sa productivité. Ajoutons à cela son poids très important qui complique son transport et son installation [64].



Figure 3.7 : Panneaux solaires monocristallin

III.2.2 Polycristallin

Comme son nom l'indique, le panneau solaire polycristallin est composé de plusieurs cristaux de silicium ce qui lui donne un aspect moins esthétique que le monocristallin. Plus précisément, il est fabriqué à partir de chutes de morceaux de silicium qui sont fondus, refroidis et assemblés grâce à un processus plus rapide, plus écologique et plus économique. Il

est donc beaucoup moins chers que les panneaux monocristallins mais il bénéficie de rendements inférieur allant de 14 à 18 % en moyenne [65] :



Figure 3.8 : Panneaux photovoltaïques polycristallin

III.2.3 Amorphe (à couche mince)

Les panneaux solaires amorphes sont de loin les panneaux solaires les moins chers du marché essentiellement grâce à leurs méthode de fabrication. En effet, le silicium non cristallisé est envoyé sur un matériau amorphe (verre, acier ou plastique) qui permet la création de panneaux solaires souples et légers en utilisant seulement 1% de la quantité de silicium nécessaire à la création d'un panneau mono ou polycristallin.

Les panneaux photovoltaïques en Silicium Amorphe sont bien adaptés pour l'alimentation électrique des équipements de faibles puissances installées dans des zones à faible éclaircement

(en intérieur, sous éclairage artificiel) et sous ensoleillement diffus (à l'extérieur, soumis à un ombrage important). Contrairement au panneau cristallin traditionnel, le panneau solaire amorphe continu à fournir de l'énergie même si une partie du panneau est ombragée. Néanmoins, cette technologie reste la moins performante du marché avec un rendement allant de 5 et 7 % [66].



Figure 3.9 : panneaux photovoltaïques amorphes

III.2.4 Pérovskite

La cellule photovoltaïque en pérovskite est l'une des découvertes les plus prometteuses et les plus révolutionnaires à l'heure actuelle. La pérovskite est un minéral, faisant office de semi-conducteur dans la cellule; que l'on peut rarement trouver dans la nature mais dont la structure peut être reproduite facilement en combinant des éléments qui sont davantage disponibles.

La production de ce type de cellules est facile et plus rapide car la pérovskite est plus tolérante aux défauts. Elle ne nécessite pas de soins particuliers pour être utilisée, ce qui

pourrait réduire son cout de 10 fois le prix des panneaux standards selon le Laboratoire National des Énergies Renouvelables américain (NREL). Ajoutons à cela, sa structure qui est très souple, légère et presque transparente; Et son rendement atteignant les 28%.

Cependant, Les cellules de pérovskite sont aussi composées d'un peu de plomb, ce qui n'est pas du tout idéal pour l'environnement. Toutefois, des expérimentations sont menées afin de remplacer le plomb par d'autres matériaux non-toxiques. Un autre inconvénient est sa durabilité. Ce qui rend ce matériau si souple et léger le rend aussi plus fragile. Sa durée de vie est plus courte que celle du silicium [67].



Figure 3.10 : cellule Pérovskite

III.3 Groupements

III.3.1 Montage en série

Un branchement en série n'offre qu'une seule voie pour le passage du courant. Ainsi, le courant du circuit doit traverser tous les panneaux de l'installation. Ce qui implique que si le circuit est défaillant en un point, tout le fonctionnement de la série est stoppé, cependant, une technique très efficace répond à ce problème, c'est le montage des diodes en parallèle de chaque panneau. De ce fait, même si un ou plusieurs panneaux sont endommagés, le courant continuera à circuler à travers la diode montée en parallèle de ce dernier. Ce type de montage permet d'additionner les tensions délivrées par chacun des panneaux entre eux, sans que l'intensité ne change.

Par exemple, le montage en série de 4 panneaux solaires de 12 V et 5 A permet d'obtenir en sortie un courant de 48 V et 5 A.

Pour effectuer ce montage en série des panneaux solaires, il suffit tout simplement de brancher la borne positive d'un panneau à la borne négative du panneau suivant [68].

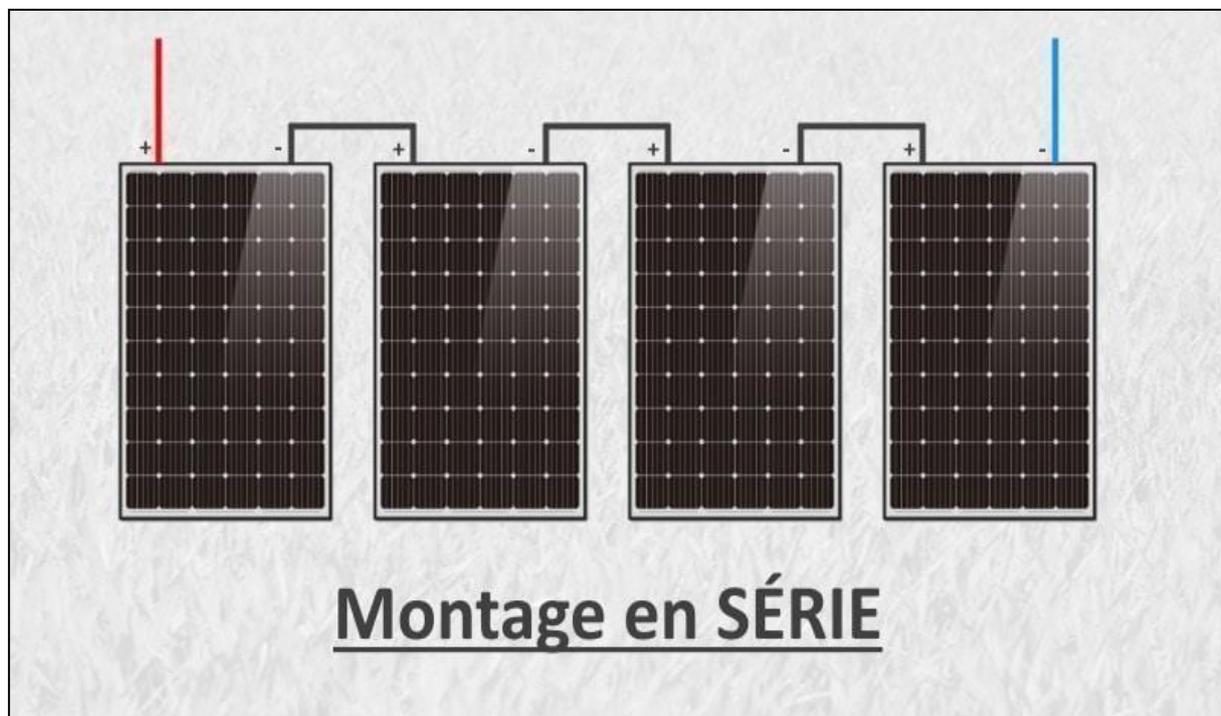


Figure 3.11 : Montage en série des cellules photovoltaïques

III.3.2 Montage parallèle

Dans un branchement en parallèle, le courant du circuit parcourt de multiples voies. Ce qui a l'énorme avantage de permettre un fonctionnement de l'installation, même si un panneau est défaillant. De plus, le branchement en parallèle des panneaux solaires permet d'additionner les intensités sans que la tension ne change.

Ainsi, si on connecte 4 panneaux solaires en parallèle de 12 volts et 5 ampères, l'ensemble du réseau serait alors de 12 volts, cela ne change pas, et de 20 ampères, car les intensités sont

additionnées. C'est donc le montage idéal pour alimenter l'électrolyseur car ce dernier nécessite davantage de courant que de tension.

Dans la pratique, le câblage en parallèle est un peu plus complexe que le câblage en série. En effet, les panneaux ne sont pas connectés entre eux, mais à, un des deux fils centralisés. Il y a donc un fil pour les bornes positives et un fil pour les bornes négatives [68].

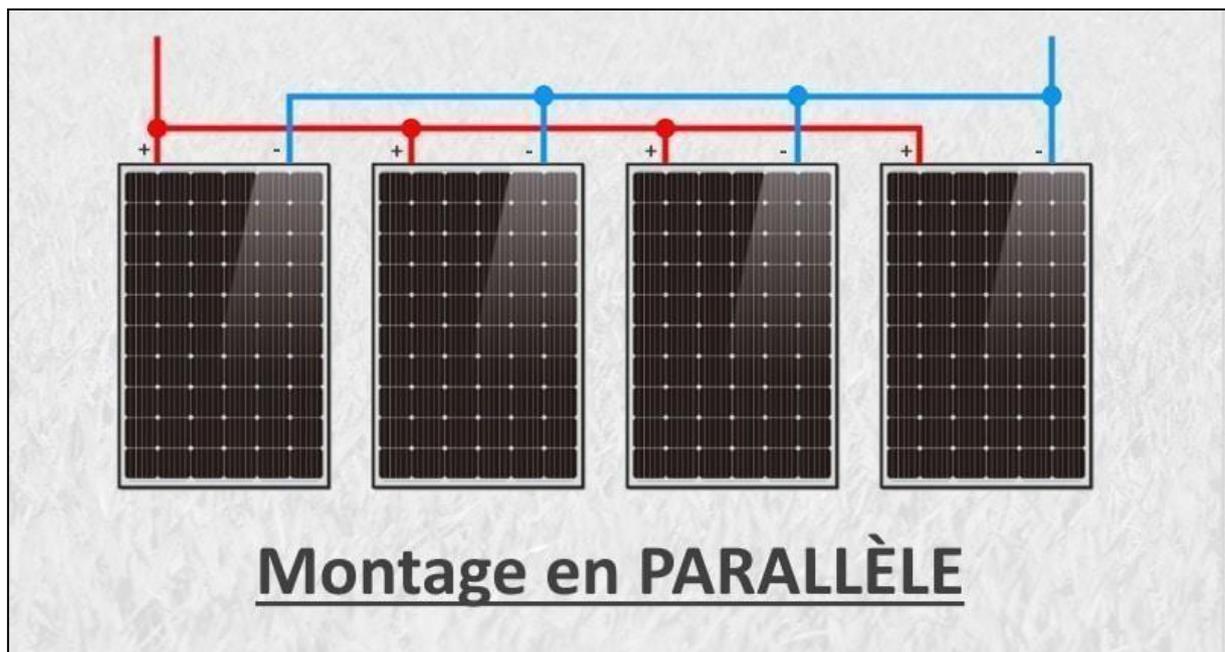


Figure 3.12 : Montage en parallèle des cellules photovoltaïques

III.4 Production de panneaux solaires

D'après une étude de janvier 2018 de PV-Tech&Solar Media Ltd, le top 10 des fabricants mondiaux de modules photovoltaïques comprend neuf industriels chinois. Seul le sud-coréen Hanwha Q-Cells arrive à se glisser à la 5^e place de ce classement. Tous les acteurs de ce classement dépassent désormais les 3 GW de capacité de production et affichent ensemble près de 57 GW de modules produits [69].

Pour ce qui est du silicium, 90 % des panneaux sur le marché sont fabriqués à partir de silicium qui est le deuxième élément le plus présent dans la croûte terrestre. La première étape est donc la fabrication de ce métalloïde dit « métallurgique ». Pour ça, il faudra passer par, une « réduction » à partir d'un mélange composé de morceaux de silice (généralement des morceaux de quartz) et de bois. Le mélange est ensuite porté à très haute température (autour de 3 000°) avant d'être purifié à 99,999%. On obtient ainsi du silicium solaire qui prend la forme de « petits cailloux » ou de cristaux. Ces derniers sont enfin cuits à près de 1 450° afin de créer des lingots de silicium. On applique un traitement chimique aux lingots de silicium pour qu'ils ne reflètent pas la lumière. A l'issue du traitement, la surface du futur panneau n'est plus lisse mais constituée de sortes de petites pyramides qui vont permettre d'absorber une quantité de lumière plus importante. Une fois refroidis, les lingots sont coupés en tranches, d'une épaisseur ne dépassant pas les 200 microns. Soit l'épaisseur d'une feuille de papier [70].

Elles sont ensuite dopées par l'ajout de phosphore et de bore en le déposant à très haute température sur la face avant du panneau. Nous obtenons ainsi des cellules qui, une fois exposées à la lumière du soleil, produisent de l'électricité. Ces cellules ne sont toutefois pas encore utilisables. Un circuit électrique doit être imprimé sur cette surface, pour que le courant produit puisse être transféré dans les circuits de notre installation. Il ne reste plus qu'à connecter les cellules, les souder, les encapsuler entre une plaque de verre trempé et une couche de polymère, puis les encadrer ensuite d'un cadre en aluminium. On ajoute une boîte de jonction derrière l'ensemble, qui permet de connecter le panneau et l'onduleur en-dessous dans la majorité des cas, mais que l'on n'aura pas besoin d'utiliser car on utilisera directement le courant continu produit par les panneaux photovoltaïque [69].

Fabriquer des panneaux solaires requière de l'énergie. Mais en 2 à 3 ans de fonctionnement, un panneau solaire aura restitué la quantité d'énergie nécessaire pour sa fabrication [71].

III.5 L'énergie solaire en Algérie

L'énergie solaire en Algérie de par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde 2200 KWh/m²/an. La durée d'insolation sur

la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays [72].

Région	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Tableau III.1 : Répartition des régions algériennes selon leurs caractéristiques climatiques

Site	Insolation KWh/m	Site	Insolation KWh/m	Site	Insolation KWh/m
01 Beni- Saf	4,85	19 Annaba	4,36	37 Naâma	5,04
02 Oran	4,59	20 Guelma	4,36	38 Béchar	5,57
03 Arzew	4,38	21 Tiaret	4,82	39 Biskra	5,08
04 Mostaganem	4,55	22 Djelfa	4,89	40 Chardaia	5,47
05 Maghnia	4,91	23 K.Chellala	4,89	41 Thouggourt	5,23
06 Tlemcen	4,88	24 M'sila	4,66	42 El oued	5,17
07 Mascara	4,53	25 Boussaâda	4,84	43 Ouargla	5,39
08 S.B. Abbès	4,92	26 B.B.Arreridj	4,54	44 El Goléa	5,71
09 Chlef	4,58	27 Sétif	4,52	45 TSmsmoun	5,79
10 Ténès	4,43	28	4,41	46 BéniAbbès	5,79
11 Miliana	4,49	Constantine	4,55	47 Adrar	5,93
12 Média	4,41	29 Batna	4,38	48 In Salah	5,97
13 Alger	4,40	30 Souk Ahras	4,78	49 In Amenas	5,91
14 Tizi-Ouzou	4,37	31 Tébessa	4,92	50 Djanet	6,28
15 Bouira	4,49	32 Saida	5,02	51 Tamenrasset	6,15
16 Béjaia	4,30	33 El Kheiter	5,00	52 Assekrem	6,22
17 Jijel	4,34	34 El Bayadh	4,99	53 B.B.Mokhtar	6,13
18 Skikda	4,33	35 Mecheria	5,32	54 In Guezzem	6,22
		36 Ain Sefra			

Tableau III.2 : Répartition de l'insolation à travers différentes villes algériennes

II.6 Conclusion partielle

Dans cette partie consacrée à l'énergie solaire, nous avons évoqué les généralités de l'énergie photovoltaïque, les différentes technologies, les types de groupements et le processus de fabrication. Nous avons par la suite passé en revue le fort potentiel et l'attrait que suscite l'énergie solaire en Algérie à travers une étude de l'irradiation solaire nationale.

CHAPITRE IV: Couplage et dimensionnement du système PV- ELC

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude d'un système de production d'hydrogène solaire par le couplage entre le générateur photovoltaïque et l'électrolyseur PEM.

La source de notre système étant le GPV (groupe photovoltaïque), et l'électrolyseur la charge. Nous allons quantifier les besoins en électricité de l'installation afin de dimensionner le groupe de panneau photovoltaïque pour un fonctionnement optimal. Nous allons procéder en trois étapes:

- Etape 1 : Nous devons choisir le model de l'électrolyseur afin d'obtenir ses besoins en énergie électrique.
- Etape 2 : Nous devons choisir le model de panneaux photovoltaïques qui correspond le mieux aux valeurs de courant/tension requises par l'électrolyseur.
- Etape 3 : Nous devons choisir l'emplacement géographique de notre installation afin de déterminer le nombre de modules panneaux photovoltaïques nécessaires.

IV.2 Le couplage

Il existe deux moyens de connecter l'électrolyseur au GPV.

Le couplage direct : très fiable et plus économique, mais ne permet pas d'avoir une emprise sur l'énergie délivrée par les panneaux. En effet le seul moyen de modifier la caractéristique tension-courant est de changer le nombre de modules connectés en série et en parallèle, ce qui s'avère être une tâche récurrente. Généralement, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge pour éviter la dégradation du matériel [52].

Le couplage via un système MPPT (Maximum Power Point Tracking) : qui permet d'adapter le point de fonctionnement du GPV pour maximiser sa puissance selon les variations d'éclairement et de température [73].

Selon le degré d'optimisation de production souhaité, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou de plusieurs convertisseurs statiques qui peuvent assurer plusieurs fonctions. Celui qui nous intéresse est le Buck, Boost car il nous permet

d'adapter les niveaux de tension et de courant entre la source et la charge. Cependant ce dernier a un rendement de 90% à 95% ce qui peut diminuer les performances du système [74].

Pour l'étude de notre système, on doit maintenir un équilibre entre la puissance délivrée par les panneaux et la puissance exigée par l'électrolyseur. En outre, le point de fonctionnement du système représente l'intersection entre les courbes des caractéristiques ($I_{pv} - V_{pv}$) du GPV avec celles de l'électrolyseur ($I_{el} - V_{el}$).

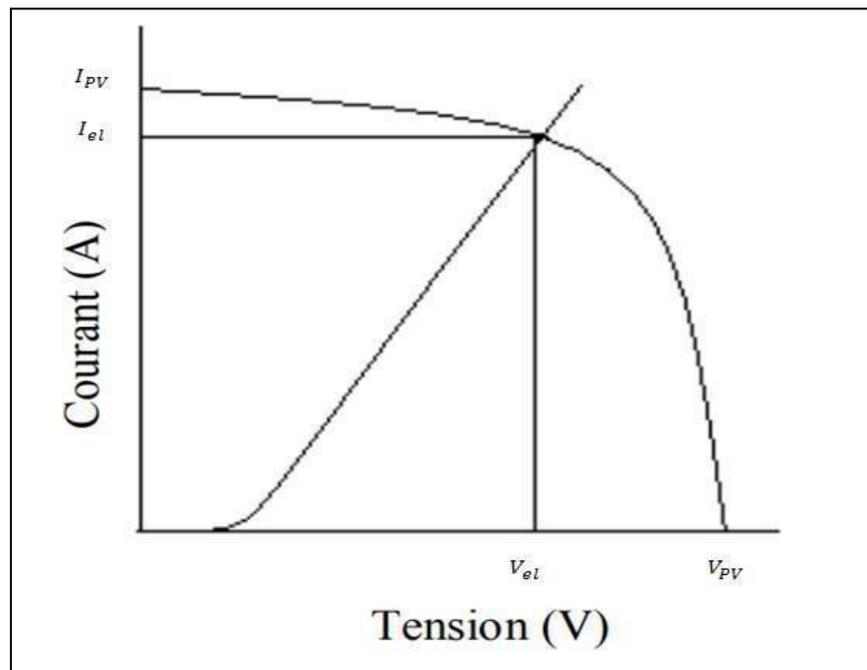


Figure 4.1 : Courbe montrant le point de fonctionnement optimal du système

IV.3 Besoin en puissance

Pour savoir quelle est l'énergie électrique nécessaire requise par notre charge, on se doit de choisir un modèle d'électrolyseur. Nous avons choisis d'utiliser l'électrolyseur HyLYZER-1000 de la marque Cummins. En effet, l'entreprise Cummins qui cumule plus de cent ans d'expertise, affirme que le HyLYZER est conçu pour une installation facile sur site en intérieur comme en extérieur, avec une simple interconnectivité, et un record inégalé de fiabilité, de faible maintenance et de sécurité.

Conçu pour les projets de 1 000 (pouvant aller jusqu'à 10 000 Nm^3/h selon le nombre de cellules utilisées) ce qui équivaut a 90kg/h, il a la particularité de produire de l'hydrogène pur a 99,99% a une pression de 30 bar sans utiliser de compresseur, et ce en étant très compact (8.4 m x 2.3 m).

Sa consommation en énergie en début de vie est d'environ 50 kWh/kg, mais compte tenu de l'augmentation annuelle de 1% de cette valeur, nous allons prendre une marge de sécurité pour le dimensionnement des panneaux solaires [75]. Sa consommation d'eau (ASTM D1193 Type) est de 9L/kg. Pour produire 90kg d'hydrogène par heure, il nous faudra donc 4,5 MW.

Ses caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau issu du site officiel de Cummins:

HyLYZER® - 1000	
Technology	PEM water electrolysis
Hydrogen production	1000 Nm^3/h (2160 kg/day)
H ₂ delivery pressure	30 bar _g (435 psig) without a compressor
H ₂ quality max impurities	99.99% dry basis, gas is fully saturated with water O ₂ < 100 ppm Optional > 99.998% with hydrogen purification system
Operating range	5-125%
DC power consumption at stack	40 to 50 kWh/kg, 48 at nominal load (3.6 to 4.5 kWh/ Nm^3 , 4.3 at nominal load)
System specific consumption*	≤ 51 kWh/kg
Utilities required to operate the plant	Electrical power, demineralized water, cooling water, HVAC, instrument air, nitrogen for purge
Rectifier specifications	4.1 to 30kV 50/60 Hz, 7 MVA 97% efficiency
Auxiliary installed power	45 kVA
Demineralized Water Consumption and Recommended Water Quality	~0.8 L/ Nm^3 of H ₂ [9 L/kg of H ₂] ASTM D1193 Type
Electrolyzer Cooling Water Requirement	Max. 2,500 LPM between 5-40°C (max ΔT: 10°C)
Total footprint (including maintenance area)	Electrolyzer dimensions (L x W) = 8.4 m x 2.3 m (27.7 x 7.5 ft) Rectifier dimensions (L x W) = 4.5 x 2.5 m (14.8 x 8.2 ft)
Installation environment	Indoors 5°C to 40°C / 41°F to 104°F

*System specific consumption considers: the standard scope of supply (refer to BCS table); 100% Load capacity; Beginning Of Life; 1% increase per annum (at >8500 hours operation); Range for indoor setup; HPS not included

Tableau IV.1 : Fiche technique de l'électrolyseur 'Hylzer-1000' [75].

IV.4 Choix du panneau photovoltaïque

Après avoir déterminé les caractéristiques de chacun des types de panneaux nous avons choisis d'utiliser le panneau solaire monocristallin 'AE505MD-132' fournis par la marque allemande AE Solar. Ce panneauxolaire est composé de 132 cellules monocristallines utilisant la technologie "halfcell" qui lui permet d'avoir plus de cellules et donc d'être plus puissant et performant que la plupart des autres panneaux solaires. Cette technologie lui permet également d'offrir une performance hors pair, même sous une faible luminosité (mauvais temps) et de longue durée. Il pourra délivrer une tension maximale de 39,27V et un courant maximal d'environ 12,86A. Ces spécificités lui confèrent donc une puissance de 505W avec un rendement de 21,29%.

Son épaisseur est de 35mm, sa longueur de 2,094m, et sa largeur de 1,133m. Ce qui fait une surface d'environ 2,3725 pour un poids de 26kg [76].

TECHNICAL DATA						
AE MD-132 Series 485W-505W						
SPECIFICATIONS		AE485MD-132	AE490MD-132	AE495MD-132	AE500MD-132	AE505MD-132
Nominal Max. Power	Pmax (Wp)	485	490	495	500	505
Maximum power voltage	Vmp(V)	38.31	38.55	38.79	39.03	39.27
Maximum power current	Imp (A)	12.66	12.71	12.76	12.81	12.86
Open-circuit voltage	Voc(V)	45.75	46.05	46.34	46.64	46.93
Short-circuit current	Isc (A)	13.42	13.47	13.52	13.57	13.62
Module efficiency	(%)	20.44	20.65	20.86	21.07	21.29
Operating temperature	(°C)	-40 to +85				
Maximum system voltage DC	V (IEC)	1500				
Maximum series fuse rating	(A)	25				
Power tolerance	(%)	0 ~ + 5				
Temp. coefficients of Pmax	(%/°C)	-0.35				
Temp. coefficients of Voc	(%/°C)	-0.275				
Temp. coefficients of Isc	(%/°C)	0.045				
Nom. Operating cell temp.(NOCT)	(°C)	45±2				

The electrical data apply to standard test conditions (STC): Irradiance of 1000 W/m² with spectrum AM 1.5 and a cell temperature of 25°C.

Tableau IV.2: Fiche technique du module photovoltaïque 'AE505MD-132'

IV.5 Site et installation

Le dimensionnement d'un système solaire photovoltaïque a pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque à partir des données d'ensoleillement du lieu. Il est donc nécessaire de positionner nos panneaux par rapport à l'emplacement géographique de la région.

En effet, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) sur le module photovoltaïque. L'orientation adéquate de ce dernier doit toujours être dirigée vers l'équateur. L'Algérie se situant au-dessus, notre GPV doit alors avoir une orientation sud.

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un module photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduite en été et plus importante en hiver. Il existe donc deux méthodes d'inclinaison [76]:

La première, utilisée dans le cas où l'on a besoin d'avoir une énergie constante tout au long de l'année, consiste à incliner les panneaux de sorte à tirer parti d'un maximum d'ensoleillement pendant l'hiver. La seconde, consiste à produire le maximum d'énergie possible à l'année et non pas sur une saison déterminée, ce qui induit une fluctuation de la quantité d'énergie produite entre les saisons.

Pour notre travail, nous avons choisis la wilaya de Ghardaïa. Cette ville est située au centre de la partie Nord du Sahara Algérien, à 600 km au sud d'Alger. Les coordonnées géographiques du site de collecte de données sont les suivantes: $32^\circ 26'$ de latitude Nord, $3^\circ 46'$ de longitude Est et 467 m d'altitude. Le climat de Ghardaïa est semi-aride et désertique avec un indice de clarté égal à 0.8, qui est un endroit idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire. D'après certaines études [77], il s'avère que les meilleurs angles d'inclinaisons pour cette région sont de : 9° en été, 56° en hiver, 32° au printemps et en automne.

Une étude [57], à travers plusieurs réalisations et simulations, a réussi à déterminer la valeur du rayonnement solaire de 4h à 20h soit 16h par jour, et ce pendant toute une année. Les résultats sont répertoriés dans le tableau ci-dessous:

Rayonnement global reçu sur le plan d'optimisation moyenne mensuelle (W/m ²)												
Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	
384	429	455	477	474	481	491	497	475	430	386	354	

Tableau IV.3 : Rayonnement global reçu sur le plan d'optimisation solaire pour le site de Ghardaïa

La puissance délivrée par notre panneau photovoltaïque est égale au produit du rendement du panneau, de la superficie du panneau, et de l'irradiation solaire de la région.

$$P = \eta .S .G_t \quad (1-3)$$

P: Puissance délivrée par le panneau [W]

η : rendement du panneau

S: superficie du panneau [m^2]

G_t : Irradiation solaire [W/m^2]

Avec cette équation et avec les données du rayonnement solaire recueillis sur la ville de Ghardaïa [57], nous pouvons calculer pour chaque mois, la valeur de la puissance fournie par notre panneau.

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
P(W)	193.96	216.69	229.82	240.94	239.42	242.96	248.01	251.04	239.92	217.20	194.97	178.81

Tableau IV.4 : Puissance moyenne mensuelle fournie par le module photovoltaïque

Avec les résultats ci-dessus, nous pouvons considérer la puissance moyenne de :

$$P_m = 224.48W$$

Les calculs suivant nous permettrons de définir le nombre de panneaux nécessaires pour alimenter l'électrolyseur, soit une puissance de 4.5MW.

Nous savons qu'un panneau produit 224.48W en moyenne. En appliquant la règle de trois, il en résulte que le nombre de panneaux nécessaires est de 20 046 panneaux. Ce qui en fait une superficie totale de $47559,135m^2$ (4,7559 Hectares = $0,047559km^2$) soit presque 7 terrains de football.

IV.6 Conclusion partielle

Ce chapitre nous a permis d'assembler les différentes parties de notre installation à travers le couplage de l'électrolyseur PEM au groupe photovoltaïque. Après avoir choisis le model de l'électrolyseur ainsi que ses besoins en énergie électrique, nous avons dû choisir le type de panneaux photovoltaïque adéquat, étudier le site de notre installation, pour pouvoir calculer le nombre de modules nécessaires de panneaux qui fournira a la charge la puissance désirée.

CHAPITRE V: Utilisations de l'hydrogène dans le monde moderne

V.1 L'hydrogène dans l'industrie

V.1.1 Dans l'industrie chimique

le secteur chimique fait partie du 2^{ème} et 3^{ème} plus grande demande en hydrogène actuellement, l'ammoniaque comptant plus de 31MtH₂/an et le méthanol qui lui est à 12MtH₂/an. Le reste des autres secteurs bien qu'ils soient divisés en minorités, en cumulé, consomme en moyenne par année l'équivalent de 46 MtH₂

Actuellement, la majorité de l'hydrogène utilisé dans le secteur chimique est issue des énergies fossiles, source étant la plus accessible et la plus économique. Cependant d'un point de vue écologique, la production de l'hydrogène à partir des énergies fossiles est très polluante. Or il existe d'autres moyens comme l'électrolyse, étant moins ancré dans nos industries mais beaucoup plus écologique.

l'hydrogène fait partie de presque toutes les structures moléculaires dans l'industrie chimique. Cependant la quantité d'hydrogène employée varie d'un élément à autre. On peut dire que pour la production de l'ammoniac et du méthanol, que l'hydrogène est considéré comme matière première. l'ammoniac est essentiellement utilisé dans la fabrication d'engrais tel l'urea ou bien le nitrate d'ammonium (80%). l'ammoniac est également utilisé pour produire des explosifs des fibres synthétiques ainsi que certains autres matériaux spéciaux (20%). Ce qui est intéressant est que la demande en ammoniac ne cesse de croître pendant ces dernières années.

Le méthanol à son tour est utilisé pour différentes applications industrielles, y compris différents types de solvants comme le formaldéhyde ainsi que d'autres composants chimiques, la conversion du méthanol à certains hydrocarbures aromatiques, et l'emploi en tant que carburant [78].

V.1.2 Dans la métallurgie

La méthode de production d'acier à partir de l'hydrogène ainsi que les minerais de fer est appelé DRI (Direct Reduced Iron). Ce processus est classé le 4^{ème} plus grand consommateur en hydrogène actuellement, Cette demande est à croître durant les années à

venir sachant que la demande en acier est attendue à attendre 6% de plus que la demande actuelle d'ici 2030 [79].

L'hydrogène est entrain d'être étudié afin d'être utilisé en tant qu'agent réducteur à la place du monoxyde de carbone utilisé actuellement afin de réduire les émissions de CO₂ et à la fois réduire la consommation du gaz naturel ainsi que le charbon dans ce secteur. Cette technologie verrait le jour probablement vers 2030 [79].

V.1.3 En tant qu'apport en chaleur

L'industrie a recourt aujourd'hui, à la chaleur pour différentes raisons tel : la fonte, la gazéification, le séchage, ou bien pour l'activation d'une variété de réactions chimiques. L'hydrogène peut parfaitement remplir cette tâche par sa valeur calorifique importante, et peut-être remplacer le charbon ainsi que d'autres carburants fossiles et polluants utilisés actuellement. L'inconvénient est qu'actuellement aucun de ces secteurs cités précédemment n'utilise l'hydrogène pour son potentiel calorifique. L'hydrogène pourrait être utilisé de manière direct comme un fourneau ou bien de manière indirecte en évaporant de l'eau par exemple et réemployer cette vapeur [78].

V.2 L'hydrogène dans le stationnaire

V.2.1 Dans les piles à combustible

Les piles à combustible sont l'exemple le plus efficient et le plus écologique de produire de l'électricité à partir de l'hydrogène avec un relativement bon rendement. La pile à combustible a une architecture très similaire à celle de l'électrolyseur. La différence entre le processus de l'électrolyse et celui de la pile à combustible est que l'électrolyse utilise l'eau et un courant électrique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène tant dis que la PAC fait exactement le contraire. Ceci est rendu possible en inversant la polarité du stack et en injectant de l'hydrogène et de l'oxygène vers l'anode et la cathode. Il existe différent types de piles à combustibles assez similaire encore une fois à l'électrolyseur [79].

Type de pile	Température, °C	Applications	Avantages
PEMFC (polymerelectrolyte membrane)	50-100	Transport Electroménager électricité domestique	Faible émissions compacte faible entretien densité de courant élevée
SOFC (solidoxide)	500-1000	Application spatiale Energies renouvelables	Compacte très efficace basse émissions
AFC (alcaline)	50-200	Application spatiale Application militaire	Fiable Relativement non polluante
MCFC (molten carbonate)	650	Grand véhicules énergies renouvelables	Accepte différents catalyseurs basse émissions silencieuse
PAFC (phosphoricacid)	150-200	Energies renouvelables	Plus tolérantes aux Impuretés

Tableau V.1 : Comparaison de technologies de pile à combustible [80]

L'avantage avec l'usage de la pile à combustible dans des systèmes stationnaires est que la liaison à un réseau électrique n'est pas nécessaire, ce qui est parfait pour les zones éloignées, ou difficiles d'accès, ou bien les couts de rattachement au réseau sont bien très importants. La PAC pourrait subvenir aux besoins énergétique si ravitaillée par de l'hydrogène à travers différents moyens de transport pour des bases de vies se situant aussi bien qu'en Groenland ou bien au milieu du Sahara algérien. Sinon un couplage avec un électrolyseur alimenté via énergies renouvelables (si disponible) pourrait produire l'hydrogène nécessaire In-Situ [80].

V.2.2 Dans les turbines

Après notre visite à la centrale thermique de Jijel, on a été informé que la centrale actuelle fonctionnant aux gaz naturel pourrait avoir un changement d'ici un avenir proche. En effet d'après Mr Tabti, ingénieur dans cette même centrale a mentionné d'un possible ajout de

l'hydrogène à la conduite de gaz pour faire un fonctionnement à (25/75) % H₂/gaz pour à la fois réduire les émissions de gaz à effet de serre mais également réduire la consommation en gaz naturel.

D'après nos propres constatations, nous avons vu d'énormes quantités de résidus de carbone au fond de la cheminée venant notamment de la combustion incomplète du gaz naturel. L'injection de l'hydrogène réduira la quantité du carbone créé selon le ratio du mélange. A noter que si on utilise théoriquement 100% d'hydrogène en tant que carburant, les émissions liées au carbone seront éliminés en s'appuyant sur l'équation de combustion de l'hydrogène.



Figure 5.1 : Station thermique de Jijel

La reconversion des centrales thermiques permettra d'éviter d'ajouter des frais supplémentaires à l'adoption des énergies vertes à base d'hydrogène, les conduites ainsi les bèques servant à transporter le gaz naturel sont les uniques composants important à modifier. Cependant le rendement des piles à combustibles est bien supérieur à ceux des centrales thermiques actuelles.

V.3 L'hydrogène dans la mobilité

V.3.1 Dans les piles à combustible

En effet la pile à combustible est dotée d'une polyvalence incroyable, tout comme les moteurs à combustion interne, on peut la retrouver un peu partout allant des petites citadines jusqu'au grandes centrales électrique. Les véhicules à PAC ont bien commencé à circuler un peu partout dans le monde. On note la Toyota mirai qui est commercialisée depuis 2015 et qui est à sa seconde génération aujourd'hui, ainsi que le Hyundai Nexo qui sont les principaux véhicules touristiques commercialisés aujourd'hui [79]. Dans le secteur des véhicules routiers utilitaires, des compagnies comme Cummins sont entrain de développer des prototypes de semi-remorque ayant des autonomies moyennes de 500km pour des réservoirs de 80kg d'hydrogène pur. En d'autres termes beaucoup pays sont en train d'installer des infrastructures pour accueillir d'avantage d'appareil employant l'hydrogène comme vecteur énergétique. Par exemple ; Le japon prévoit d'ici 2030 de [79] :

- Augmenter le nombre de véhicules à PAC de 40,000 unités à 800,000 unités
- Encourager la réforme de la réglementation, développement technologique et développement de stations hydrogène par le public et secteurs privés.
- Assurer un maximum l'approvisionnement de ces stations par de l'hydrogène issue d'énergies vertes.
- Augmenter le nombre de bus à PAC de 200 à 1200 unités.
- Augmenter le nombre de chariots élévateurs à PAC de 500 à 10 000 unités.
- La commercialisation de camions à PAC.



Figure 5.2 : Disposition des PAC et réservoirs dans des véhicules utilitaires

Les transports ferroviaires et maritimes ne font pas l'unanimité quant à leur usage des piles à combustible. Etant également soumis aux normes de pollutions les transports maritimes et ferroviaires sont poussés à employer des systèmes d'hybridations entre piles à combustibles et batteries pour les vaisseaux navals car le système de batteries uniquement revidera trop lourd mais également moins efficace à cause de sa rapidité à drainer les batteries. Pour les trains, leur raccordement à la PAC peut se faire que ça soit pour les cycles urbains ou régionaux. Les trains électriques urbains peuvent être remplacés par des piles à combustible ce qui désencombrera le circuit ferroviaire, Mais également et surtout les trains régionaux qui en majorité utilisent de moteurs thermiques à base de diesel [81].



Figure 5.3 : Moteur V8 5.0L à hydrogène Yamaha

V.3.2 Carburant

L'usage de l'hydrogène en tant que carburant peut s'avérer être une solution utile pour alimenter les moteurs à combustions interne ou bien les turbines.

Concernant les moteurs, différents constructeurs se sont lancé dans ce défi de transformer les moteurs à combustion interne, fonctionnant à l'essence, en hydrogène. Nous citons l'exemple de Yamaha qui a su convertir un moteur V8 de 5.0L de cylindrée à l'hydrogène sans trop perdre en puissance (472PS en sa version essence, et 455PS avec

l'hydrogène) [82]. Mais pas que, Cummins qui fournit aussi des moteurs diesel aux marques de poids lourds et utilitaires tel Kenworth ou Dodge, se sont mis à convertir également leurs moteurs (6.7L diesel et 15L diesel) à l'hydrogène afin de les tester et de probablement les commercialiser à l'avenir [83].

Des prototypes de petits moteurs (1.6L 3 cylindres turbo) ont commencés à être essayés dans des courses d'endurances. L'avantage c'est que les moteurs ont réussi à finir la course ce qui démontre en partie leur fiabilité.

Se tourner vers ce type de conversion serait bénéfique pour la réduction des couts de recherche et développements sachant que la conversion d'un moteur à essence à un moteur à hydrogène nécessite principalement que d'une différente culasse, différents injecteurs, et un nouveau système d'allumage[84].

Pour l'aviation des tests ont été conduits par la NASA vers le milieu du 20^{ème} siècle en changeant le kérosène par l'hydrogène. L'essai s'est avéré très concluant. En effet, le vol de l'avion a duré plusieurs minutes avant que des turbulences commencèrent à être ressenties. Le moteur employé lors de ce vol est le même que celui utilisé par le kérosène, sauf que le circuit d'injection a été modifié pour pouvoir incorporer un système de combustion par hydrogène.

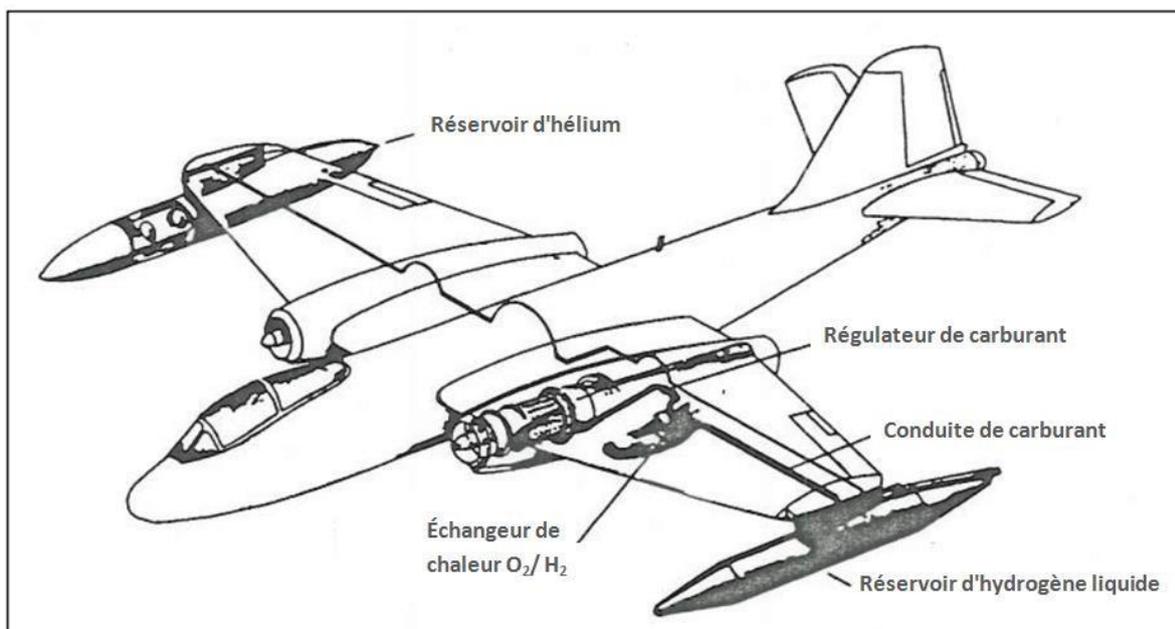


Figure 5.4 : Avion (B-57) employé pour les tests de la NASA

En ce qui concerne la contenance du gaz, la NASA a ajouté un réservoir à l'extrémité d'une aile suivi d'une forte protection contre les éléments ainsi que la dissipation de l'hydrogène, tandis que dans l'autre aile est placé un autre réservoir d'hélium afin de pressuriser le réservoir d'hydrogène et de purger ce dernier.

Cet appareil est témoin de la parfaite capacité de l'aviation à pouvoir se convertir à l'hydrogène pour l'avenir. D'ailleurs, aujourd'hui beaucoup d'entreprise se mettent à développer de nouveaux prototypes afin de perfectionner, sécuriser, et commercialiser les vols avec de l'hydrogène [85].



Figure 5.5 : Prototype d'avions commerciaux proposé par la NASA

V.4 Conclusion partielle

Dans ce chapitre nous avons pu voir les différentes applications de l'hydrogène, que ce soit dans le secteur industriel, le stationnaire ou bien le mobile. On constate que cet élément a une présence importante dans le monde actuel et pourrait devenir dans les années à venir encore plus important, voir assez pour pouvoir remplacer les énergies fossiles.

Conclusion générale

L'hydrogène a été délaissé par le passé dans le monde de l'industrie, et ce pour des raisons liées au manque de développement technologique. Mais aujourd'hui, il suscite un immense intérêt que ce soit de la part des constructeurs automobiles, des centrales thermiques, de l'aéronautique; Mais aussi de la part des gouvernements qui, dans un état d'urgence, tentent de remédier aux fléaux environnementaux engendrés par de longues années d'utilisations des ressources fossiles et nucléaires. L'hydrogène, associé à l'énergie solaire, est l'une des solutions les plus prometteuses à cela. Si bien que c'est l'un des piliers fondamentaux qui permettra de réaliser la transition énergétique et de satisfaire les règles du développement durable. En effet, la décomposition de l'eau en hydrogène ne rejette aucun gaz à effet de serre, et son utilisation dans les piles à combustibles ne produit que de l'eau. C'est pour cette raison que l'hydrogène vert est considéré comme le carburant de demain.

L'objectif global de notre travail a été l'étude et le dimensionnement d'un système de production d'hydrogène par électrolyse PEM, la production d'énergie électrique est assurée par les panneaux photovoltaïques en s'appuyant sur les données climatiques de la région de Ghardaïa.

Tout d'abord, nous avons étudié les particularités de l'hydrogène, ses méthodes de stockage et de transport, et les inconvénients liés aux risques mécaniques, d'inflammations et d'explosions. Suivi une comparaison énergétique entre son utilisation en tant que carburant d'une part, et comme pile à combustible d'une autre part.

Ensuite, nous avons pu, par-delà, étudier les différentes méthodes de production d'hydrogène. Nous avons choisi l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM). En effet, sa haute réactivité fait que c'est la technologie qui s'adapte le mieux aux fluctuations des énergies renouvelables. Suivi d'un dimensionnement de l'électrolyseur à travers une série d'équations thermodynamiques et électriques. Cependant, la technologie que nous jugeons la plus prometteuse est l'électrolyse CFE de par son ingéniosité et son faible coût. Cette méthode a vu le jour en même temps que nous faisons notre mémoire (été 2022) et les informations à son sujet restent donc très limitées.

Après ça, nous nous sommes penchés sur la source d'énergie électrique de notre système qui n'est autre que l'énergie solaire. Nous avons étudié les panneaux photovoltaïques,

leur principe de fonctionnement ainsi que les différentes technologies utilisées. Nous avons aussi mis en avant l'énorme potentiel dont se dote l'Algérie suite à sa position géographique et à son taux d'irradiation solaire.

Nous avons par la suite fait le couplage du PV-Electrolyseur et nous avons réussi à dimensionner la centrale photovoltaïque adéquate au bon fonctionnement de notre électrolyseur 'Hylzer-1000'. Celle-ci a une superficie d'environ 5 hectares et pourra fournir une puissance de 4,5 MW demandée par l'électrolyseur.

Pour conclure, nous avons mis en avant la place et l'importance de l'hydrogène dans le monde actuel, à travers une recherche portée sur les différents secteurs d'application de ce dernier, notamment le secteur de l'industrie chimique, la métallurgie, les turbines à gaz etc. D'ailleurs, lors de notre visite à la centrale thermique de Jijel, le personnel technique nous a avancé qu'ils prévoient d'injecter 25% d'hydrogène dans un mélange H₂/Gaz pour réduire la consommation de gaz naturel du pays et limiter l'émission de polluants.

Bibliographie

- [1] 2021 International Monetary Fund.
- [2] Greenly earth-8/1/2021, "Quel est l'impact écologique d'une batterie ?".
- [3] Ifp énergies nouvelles, "Tout savoir sur l'hydrogène".
- [4] ENGIE, "L'hydrogène, c'est quoi ?", 08 octobre 2021.
- [5] OIT et OMS, "ICSC 0001-Hydrogene." 2018
- [6] H2-Mobile.fr, " Le Japon chef de file mondial de la mobilité hydrogène",2019-2022.
- [7] Information.tv5monde.com,"Voitures, trains, avions... Et si l'hydrogène était l'avenir de la mobilité ?",24.12.2021.
- [8] <https://www.airliquide.com/fr/histoires/hydrogene/le-saviez-vous-air-liquide-et-lhydrogene-une-histoire-de-longue-date>.
- [9] <https://www.encyclopedie-energie.org/lhydrogene/>.
- [10] <https://hydrogen-uk.org/the-hydrogen-story/>.
- [11] <https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555Q12>.
- [12] <https://www.hyundaimotorgroup.com/tv/>.
- [13] https://www.cchst.ca/oshanswers/safety_haz/battery-charging.
- [14] <https://reporterre.net/La-voiture-electrique-cause-une-enorme-pollution-mini%C3%A8re>.
- [15] <//blog.romande-energie.ch/fr/comprendre-l-energie/152-hydrogene-transition-energetique#>.
- [16] <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-vehicule-a-hydrogene/#>.
- [17] <https://www.ecologie.gouv.fr/direction-generale-lenergie-et-du-climat-dg%C3%A9c-DGEC>.

- [18] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene#>.
- [19] <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-hydrogene-enfin-facon-economique-produire-8495>.
- [20] <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-s-tocker-lhydrogene>.
- [21] <https://www.mahytec.com/fr/hydrogene>.
- [22] B.Ourane,"Recherche exploratoire de nouveaux intermétalliques ternaires à base de magnésium. Application au stockage d'hydrogène", Thèse doctorat, université de Bordeaux et de Tunisie,20/05/2014.
- [23] <http://q32-dhydrogene/#>.
- [24] <https://leonard.vinci.com/transport-et-stockage-dhydrogene/>.
- [25] <https://blog.romande-energie.ch/fr/comprendre-l-energie/152-hydrogene-transition-energetique>.
- [26] Rapport final, "Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre", INERIS.
- [27] Actu environnement, "Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène".
- [28] A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion.
- [29] Thermodynamique appliqué combustion, université de Bruxelles.
- [30] M.Salhi "étude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible", Mémoire de magister en physique, Constantine, 17/10/2010.
- [31] International Journal of Advanced Culture Technology Vol.3 No.2 87-99, "Hydrogen use in internal combustion engine", 2015.
- [32] Survery of hydrogen combustion properties, NACA 26/07/1957.
- [33] Institute—National Research Institute, "A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines, achievements and future challenges, oil and gas", Poland.
- [34] Toxicity of Exhaust Fumes (CO, NOx) of the Compression-Ignition (Diesel) Engine with the Use of Simulation, 1 Department of Organization and

Production Engineering, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska Street 164, 02-787 Warsaw, Poland.

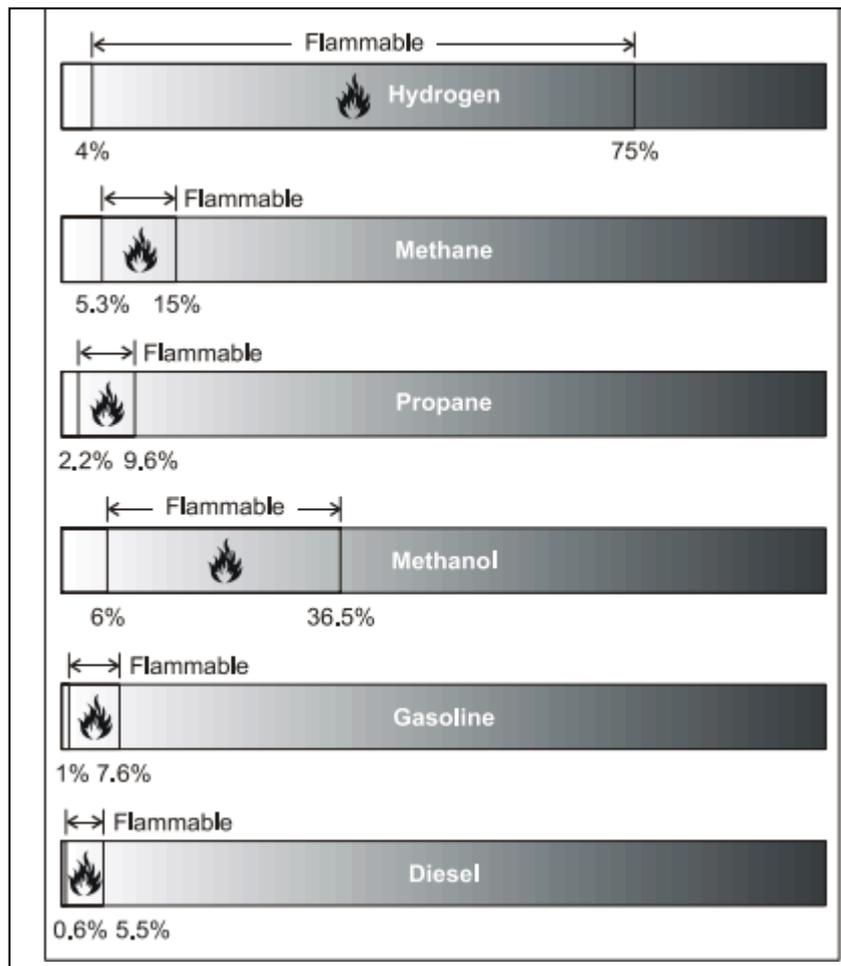
- [35] Hydrogen properties, College of the Desert, December 2001.
- [36] R. Boudries-Khellaf ,Etude d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire en Algérie, Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002).
- [37] E. (Sandy) Thomas, Ph.D., President H2Gen Innovations, Inc. Alexandria, Virginia,Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared.
- [38] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene>.
- [39] <https://www.livrescolaire.fr/page/15904362>.
- [40] <https://www.lenntech.fr/electrolyse.htm>.
- [41] <https://www.usinenouvelle.com/article/electrolyse-alkaline-et-pem-deux-technologies-de-l-hydrogene-prettes-a-decarboner-les-usines.N1805742>.
- [42] <https://www.hydrogene.discoverthegreentech.com/production-hydrogene/electrolyse/alkaline>.
- [43] <https://oxeonenergy.com/solutions/solid-oxide-electrolysis-cells>.
- [44] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>.
- [45] <https://link.springer.com/article/10.1007/s43979-022-00022-8>.
- [46] <https://www.enapter.com/fr/newsroom/aem-water-electrolysis-how-it-works>
- [47] <https://www.enapter.com/fr/aem-electrolyser>.
- [48] <https://www.mieeg.org/2022/03/18/new-australian-electrolyzer-break-a-world-record-will-produce-the-cheapest-green-hydrogen/>.
- [49] [H. Ito, T. Maeda, A. Nakano, H. Takenaka,Properties of Nafion membranes underPEM water electrolysis conditions,Int.Conf.Hydrog.Prod.ICH2P-2010,Int.J.Hydrog.Energy,2011,36,p. 10527-540Q555.
- [50] Association française pour l'hydrogène et les piles a combustibles, "PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU", Mémento de l'Hydrogène FICHE 3.2.1.
- [51] B. Soldi, " Conception et réalisation d'un système de production d'hydrogène à l'aide d'un dispositif de catalyse", Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 149 – 162.
- [52] F.Juelich GmbH, Institute of Energy and Climate Research, IEK-14: Electrochemical Process Engineering, 52425 Juelich, Germany.

- [53] Ram B. Gupta. «HYDROGEN FUEL, Production, Transport, and Storage», CRC Press, 2008.
- [54] M.Carmo,D.L.Fritz,J.Mergel, "A comprehensive review on PEM water electrolysis, (Volume38,Issue12, 22April2013,Pages4901-4934.
- [55] A.Djafour,"étude d'un système de production d'hydrogène solaire",Doctorat en Sciences en physique, univéristéouargla.
- [56] B.laoun, « Simulation et dimensionnement d'un système de production d'hydrogène par electrolyseur à membrane alimenté par panneaux photovoltaïques. Integration pour appoint à une pile à combustible », mémoire de magister, génie chimique,université de Blida.
- [57] HYDROGEN PRODUCTION BY ALKALINE WATER ELECTROLYSISDiogo M. F. Santos* and César A. C. Sequeira.
- [58] http://www.grenoble-isere.com/etudes-et-territoires/pdf_filieres/Photovoltaïque_Etude2010_V14- Fr.pdf
- [59] L.Wald.,"introduction au rayonnement solaire", ResearchGate.
- [60] « le photovoltaïque fonctionnement et technologie »,IBGE, Bruxelles.
- [61] A.Lafleur, « énergies renouvelable : les cellules photovoltaïques »,ENSTA-énergie renouvelable.
- [62] <https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-mono-cristallin/>.
- [63] <https://www.guide-panneaux-photovoltaïques.be/technologies/le-panneau-monocristallin/>.
- [64] <https://www.prodestravaux.com/energies-renouvelables/photovoltaïque/panneaux-cristallins>.
- [65] <https://www.effy.fr/travaux-energetique/solaire/panneau-solaire-amorphe>.
- [66] <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>.
- [67] <https://senegrid.sn/batterie- solaire/cablage-en-serie-vs-cablage-en-parallele>.
- [68] <https://www.otovo.fr/blog/le- solaire-et-vous/fabrication-panneau-solaire/>.
- [69] <https://www.photovoltaïque.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaïques/techniques-de-fabrication-des-modules-au-silicium/>.
- [70] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/panneaux-solaires-photovoltaïques>.
- [71] H.Adnani,«Algérie énergie solaire et hydrogène développement

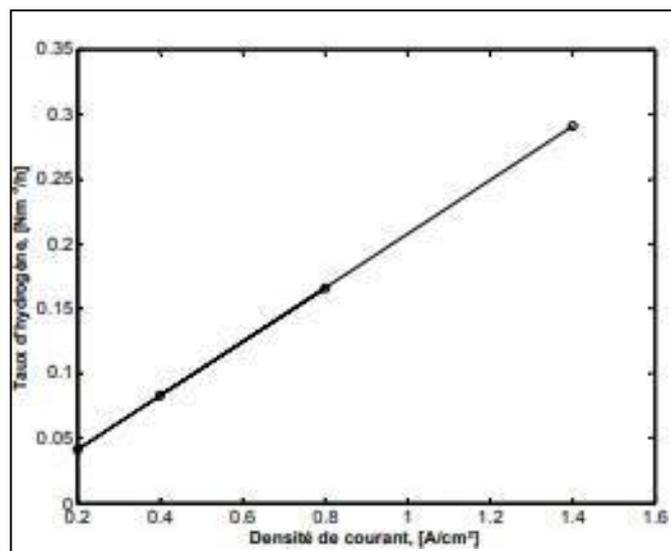
durable»,EditionOPU2007.

- [72] <https://www.energiesdouce.com/content/23-conseils-faq-tout-savoir-sur-les-regulateurs-mppt>.
- [73] <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21140846/highefficiency-buckboost-converter-prolongs-battery-life>.
- [74] <https://www.cummins.com/new-power/technology/fuel-cell>.
- [75] <https://www.monkitsolaire.fr/product/panneau-solaire-ae-solar-500-wc/3070.html>.
- [76] M.Adoune, "Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride",Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa (2014).
- [77] T.Sugiyama, "Japanese Perspective on the Hydrogen Economy", The Canon Institute fro Global Studies APERC Annual Conference 2021 April 20, 2021. Tokyo
- [78] Report prepared by the IEA for the G20,Japan,"the future of hydrogen: seizing today's opportunities", 2019.
- [79] EG&G Technical Services, Inc, "Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)", U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, Morgantown, West Virginia.
- [80] Ballard, "Fuel Cell Applications for Marine Vessels Why Fuel Cells Make Sense", mars 2019.
- [81] <https://www.yamaha-motor.eu/cy/en/news/tapping-the-potential-within-100--hydrogen-powered-engines/#/>
- [82] <https://www.cummins.com/news/2022/04/28/cummins-fuel-cells-power-scansias-fuel-cell-electric-trucks>
- [83] "hydrogen use in internal combustion engines", college of the Desert, Decembre 2001.
- [84] Carbon and hydrogen isotopic compositions of stratospheric methane: 1. High-precision observations from the NASA ER-2 aircraft

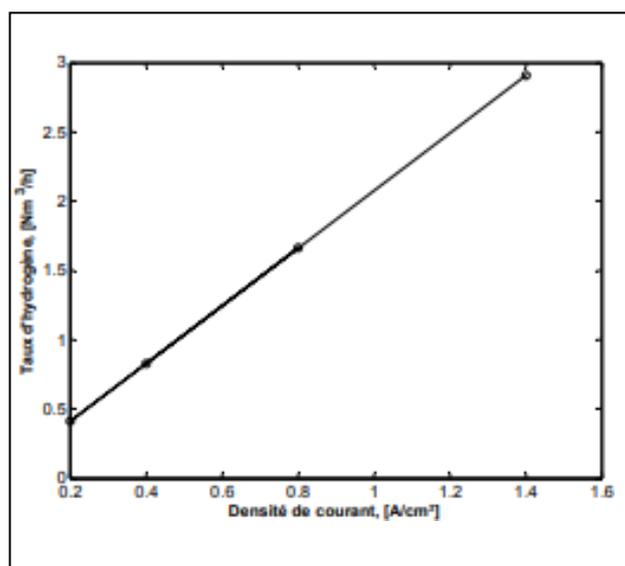
ANNEXES :



annexe 1 : limites d'inflammabilité de l'hydrogène et de certains carburants fossiles



Annexe 2 : taux d'hydrogène en fonction de la densité de courant $N_{cell}=10$



Annexe 3 : taux d'hydrogène en fonction de la densité de courant $N_{cell}=300$

Heure locale (h)	Rayonnement global reçu sur le plan d'optimisation, moyenne mensuelle (W/m²)											
	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
4	87.0	92.3	100.4	113.2	133.8	150.2	146.1	128.7	114.8	106.7	102.3	100.2
5	95.4	104.6	123.9	123.0	134.4	151.8	150.4	132.1	140.8	124.3	113.2	109.2
6	125.1	112.6	129.8	175.6	185.6	192.6	194.3	177.8	184.0	151.4	125.0	120.5
7	165.0	192.9	125.0	167.7	195.7	213.4	219.7	202.6	258.2	212.4	168.1	159.6
8	208.6	269.4	318.3	346.7	366.9	379.9	390.5	384.2	345.7	282.9	209.0	164.7
9	404.2	454.5	494.3	514.1	526.9	534.4	548.3	551.9	519.6	461.1	391.1	351.8
10	546.7	595.7	632.9	647.5	654.6	657.6	673.9	685.2	657.1	600.3	529.8	491.4
11	634.4	684.3	721.2	732.9	736.6	736.6	754.4	770.4	744.8	688.6	616.8	578.3
12	664.0	714.6	751.4	762.3	764.8	763.7	782.0	799.7	774.9	718.9	646.5	607.8
13	634.4	684.3	721.2	732.9	736.6	736.6	754.4	770.4	744.8	688.6	616.8	578.3
14	546.7	595.7	632.9	647.5	654.6	657.6	673.9	685.2	657.1	600.3	529.8	491.4
15	404.2	454.5	494.3	514.1	526.9	534.4	548.3	551.9	519.6	461.1	391.1	351.8
16	208.6	269.4	318.3	346.7	366.9	379.9	390.5	384.2	345.7	282.9	209.0	164.7
17	165.0	192.9	125.0	167.7	195.7	213.4	219.7	202.6	258.2	212.4	125.0	120.5
18	125.1	112.6	125.0	157.7	134.4	151.8	150.4	132.1	184.0	151.4	168.1	159.6
19	95.4	104.6	123.9	123.0	185.6	192.6	194.3	177.8	150.2	124.3	113.2	109.2
20	87.0	92.3	100.4	113.2	133.8	150.2	146.1	128.7	114.8	106.7	102.3	100.2

annexe 4 : rayonnement global reçu sur le plan d'optimisation, moyenne mensuelle (W/m²)

NOMENCLATURE

Zr: zirconium

H: Hydrogène

H₂: Dihydrogène

CO: Monoxyde de carbone

CO₂: dioxyde de carbone

NO_x : Oxyde d'azote

O₂: Dioxygène

CH₄: Méthane

C₃H₈: propane

C₇H₁₆: Heptane

PAC: Pile a combustible

FC: Fuel Cell

PB-a: Batterie acide-plomb

NiMH: Batterie Nickel-metal hybride

Li-ion: Batterie lithium-ion

USABC: Consortium des batteries avancées des États-Unis LLC

SOEC: Solid Oxyde Electrolyse Cell

AFC: Alkaline Fuel Cell

MCFC: Motlen Carbonate Fuel Cell

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell

EHT: Electrolyse Haute Temperature

SOFC: Solid Oxyde Fuel Cell

PEM: Proton Exchange Membrane

PEMFC: polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

AEM: Anion Exchange Membrane

CFE: Capillary Fed Electrolysis

HTC: High Temperature Cell

SOEC: Solid Oxide Electrolyse Membrane

PFSA: Perfluoro-Sulfonées acides

EVA: enveloppe qui permet de protéger les cellules contre les éléments de la nature.

GPV: Groupe de panneaux photovoltaïques

MPPT: Maximum Power Point Tracking

DRI: Direct Reduced Iron

PS: Horse Power

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1 : Capacités volumiques des différents modes de stockage d'hydrogène	15
Figure 1.2 : Réaction de l'hydrogène avec le métal	18
Figure 1.3 : Diagramme de Sankey.....	21
Figure 1.4 : Comparaison de l'énergie spécifique de l'H ₂ par rapport aux batteries... ..	27
Figure 1.5 : Comparaison du poids des véhicules par rapport à l'autonomie	28
Figure 1.6 : Comparaison de la densité énergétique de l'H ₂ par rapport aux batteries... ..	28
Figure 1.7 : Comparaison du volume des systèmes de stockage pour différentes technologies	29

Chapitre II

Figure 2.1 : Schéma montrant un système simple d'électrolyse de l'eau... ..	33
Figure 2.2 : Schémas de l'électrolyse PEM... ..	36
Figure 2.3 : Schémas de l'électrolyse AEM.....	37
Figure 2.4 : Schémas de l'électrolyse CFE... ..	38
Figure 2.5 : Influence de la température sur la tension d'électrolyse et d'enthalpie.....	44
Figure 2.6 : Influence de la pression sur les tensions (E) et (V).....	45
Figure 2.7 : Schéma simulation simulink du rendement faradique.....	49
Figure 2.8 : Rendement faradique en fonction de la densité de courant et de la température	48
Figure 2.9 : Schéma bloc Simulink de la production d'hydrogène (m ³ /h)	51
Figure 2.10 : Résultat de la simulation pour N _{cell} =101	52
Figure 2.11 : Résultats de la simulation pour N _{cell} =300	53
Figure 2.12 : Schéma simplifié du circuit équivalent de la tension de l'électrolyseur	56

Chapitre III

Figure 3.1 : Schéma général d'un panneau photovoltaïque	60
Figure 3.2 : Sources d'électricité à travers le monde en 2017	62
Figure 3.3 : Carte de l'irradiation mondiale annuelle	64
Figure 3.4 : Carte de la durée moyenne d'ensoleillement par jour à travers le monde.....	64
Figure 3.5 : Composition d'un panneau photovoltaïque.....	66

Figure 3.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	67
Figure 3.7 : Panneaux solaires monocristallins	68
Figure 3.8 : Panneaux photovoltaïques polycristallins.....	69
Figure 3.9 : panneaux photovoltaïques amorphes.....	70
Figure 3.10 :Cellule Pérovskite	71
Figure 3.11 : Montage en série des cellules photovoltaïques	72
Figure 3.12 : Montage en parallèle des cellules photovoltaïques	73

Chapitre IV

Figure 4.1 : Courbe montrant le point de fonctionnement du système	79
--	----

Chapitre V

Figure 5.1 : Station thermique de Jijel	89
Figure 5.2 : Disposition des PAC et réservoirs dans des véhicules utilitaires2.....	90
Figure 5.3 : Moteur V8 5.0L à hydrogène de Yamaha	91
Figure 5.4 : Avion (B-57) employé pour les tests de la NASA2	92
Figure 5.5 : Prototype d'avions commerciaux proposés par la NASA.....	93

Liste des tableaux :

Chapitre 1 :

Tableau I.1 : conditions d'hydruration des différents composés métalliques..... 19

Tableau I.2 : comparaison entre l'hydrogène et certains hydrocarbures aux conditions normales de température et de pression..... 24

Chapitre 2 :

Tableau II.1 : comparatif des avantages et inconvénients des technologies d'électrolyse.... 40

Tableau II.2 : exemples de puissances requises pour quelques applications d'hydrogène.....43

Chapitre 3 :

Tableau III.1 : Répartition des régions algériennes selon leurs caractéristiques climatiques 75

Tableau III.2 : Répartition de l'insolation à travers différentes villes algériennes 75

Chapitre 4 :

Tableau IV.1 : Fiche technique de l'électrolyseur 'Hylzer-1000'..... 80

Tableau IV.2: Fiche technique du module photovoltaïque 'AE505MD-132'.....81

Tableau IV.3 : Rayonnement global reçu sur le plan d'optimisation solaire pour le site de Ghardaïa... 83

Tableau IV.4 : Puissance moyenne mensuelle fournie par le module photovoltaïque... 83

Chapitre 5 :

Tableau V.1 : Comparaison de technologies de pile à combustible88