



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Mécanique option énergétique et
Installation énergétique et turbomachine

La production de l'hydrogène à partir
De l'énergie solaire

Proposé et encadré par :
- Promotrice : Dr Aiche Hamane Lilia.

Réalisé par :
– M^r Deghbouche Oussama.
– M^r Hamida Nabil.

Remerciement

Tout d'abord, on remercie Allah le tout puissant qui nous a donné la foi, la patience et la chance d'étudier et suivre, le chemin de la science.

*Nos très vifs remerciements s'adressent à notre promotrice **Dr Aiche Hamane Lilia** pour ses conseils lucides et pertinents, sa patience et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail. Ses qualités pédagogiques et humaines, et ses compétences nous ont apporté un encadrement déterminant dans ce travail.*

*Nos plus sincères gratitudees à **P^r TEMMAR MUSTAPHA** le chef département de génie mécanique l'Université de Blida 1 pour son aide.*

Nous remercions chacun des membres du jury d'avoir consacré une partie de leur temps à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Nos remerciements s'étendent à tous nos enseignants et les membres du département Génie de mécanique l'université de Blida.

En fin nous tenons à remercions toutes les personnes, qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma source de bonheur :

**A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,
leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.**

**A mes chères frères et sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur
soutien moral.**

**A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire,**

**Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infallible,**

Merci d'être toujours là pour moi.

**Mes chères amies Lebli Oussama et hayette et abd-elhadi et Fares et
fethallah.**

A tous les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Deghbouche oussama

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma source de bonheur :

**A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,
leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.**

**A mes chères frères et sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur
soutien moral.**

**A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire,**

**Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infailible,**

Merci d'être toujours là pour moi.

**Mes chères amies Lebli Oussama et hayette et mohammed et abd-lhadi et
Asma**

A toutes les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Hamida Nabil

Résumé

Ce travail se veut être une contribution à l'ouverture de perspectives pour le développement de l'hydrogène vecteur d'énergie propre. L'hydrogène est le combustible et le porteur d'énergie le plus prometteur son utilisation se généralisera dans l'avenir.

L'objectif est de fournir une méthodologie pour l'estimation de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque, il existe plusieurs moyens de production de l'hydrogène mais l'utilisation des énergies renouvelables sont les plus prometteurs.

Le système propose consiste en un système de panneau photovoltaïque, un électrolyseur alcalin et une cuve de stockage.

La production d'hydrogène a été estimée pour les sites de Dar el Beida et Tamanrasset.

Les résultats obtenus ont permis de montrer le rôle important du rayonnement solaire, dans la production d'hydrogène. L'ensemble du système montre une production durable à partir d'une source illimitée et respectueux de l'environnement.

Abstract

This work is intended to be a contribution to opening up prospects for the development of hydrogen, a clean energy carrier. Hydrogen is the fuel and the most promising energy carrier its use will become more widespread in the future.

The aim is to provide a methodology for estimating the production of hydrogen from solar photovoltaic energy, there are several ways of producing hydrogen but the use of renewable energy is the most promising.

The proposed system consists of a photovoltaic panel system, an alkaline electrolyser and a storage tank.

Hydrogen production has been estimated for the Dar el Beida and Tamanrasset sites.

The results obtained showed the important role of solar radiation in the production of hydrogen. The whole system shows sustainable production from an unlimited source and respectful of the environment

ملخص

يهدف هذا العمل إلى أن يكون مساهمة في فتح آفاق لتطوير الهيدروجين، وهو ناقل للطاقة النظيفة. الهيدروجين هو الوقود وحامل الطاقة الواعد سيصبح استخدامه أكثر انتشارًا في المستقبل.

الهدف هو توفير منهجية لتقدير إنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية الكهروضوئية، وهناك عدة طرق لإنتاج الهيدروجين ولكن استخدام الطاقة المتجددة هو الواعد.

يتكون النظام المقترح من نظام الألواح الكهروضوئية، ومحلل كهربائي قلوي وخزان تخزين.

تم تقدير إنتاج الهيدروجين في موقعي دار البيضاء وتمنراست.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها الدور المهم للإشعاع الشمسي في إنتاج الهيدروجين. يُظهر النظام بأكمله إنتاجًا مستدامًا من مصدر غير محدود ويحترم البيئة.

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé	
Introduction général.....	1

Chapitre 1 : Etat de l'art des systèmes de production de l'hydrogène

I.1 Introduction.....	2
I.2. Propriété de l'hydrogène	2
I.4 Combustion hydrogène	4
I.4.1 La combustion	4
I.4.2 Explosion.....	6
I.4.2.1 La déflagration	6
I.4.2.2 La détonation	7
I.5 Application d'hydrogène	7
I.5.1 Des applications stationnaires.....	7
I.5.2 Des applications mobiles.....	7
I.5.3 Des applications industrielles	7
I.6 Les modes de production d'hydrogène.....	8
I.7 le stockage de l'hydrogène	9
I.7.1 Sous pression.....	10
I.7.2 Sous forme liquide	10
I.7.3 forme solide.....	11
I.8 Les multiples utilisations de l'hydrogène.....	11
I.9 L'hydrogène dans la transition énergétique	12
I.9.1 L'hydrogène et les enjeux de la transition énergétique.....	12
I.9.2 Pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables avec la possibilité de stocker l'hydrogène	13
I.10 Impacts de l'hydrogène	13
I.10.1 Sur la santé	13
I.10.2 Sur l'environnement.....	13
I.11 La production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables	14
I.12 La production de l'hydrogène par l'énergie solaire	15
I.31 La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau	16

II.14 Principe de fonctionnement l'électrolyse de l'eau.....	16
II.14.3 Relation de Nernst	17
II.14.2 Tension d'électrolyse.....	18
II.14.1 Loi de Faraday.....	18
II.15 Les Différentes Technologies D'électrolyseurs	19
II.15.1 L'électrolyse alcaline	19
II.15.2 Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane).....	21
II.15.3 L'électrolyse à haute température.....	22
II.16 Comparaison Des Différentes Technologies.....	22
II.17 Les effets de l'électrolyse	25
II.17.1 Effet de la température sur la tension d'électrolyse	25
II.17.2 Effet de la pression sur la tension d'électrolyse.....	25
II.17.3 Effet de la pression sur la pureté des gaz produits.....	26
II.18 Coût de l'hydrogène fabriqué par électrolyse	27
I.19 L'hydrogène comme vecteur d'énergie	29
I.22 Quelques réalisations dans ce domaine dans le monde.....	31
Conclusion	34

Chapitre 2 : Gisement solaire et conversion photovoltaïque

II.1 Introduction.....	35
II.2. Le soleil	35
II.3 L'Energie solaire.....	35
II.4 Les trois filières d'exploitation de l'Energie solaire.....	36
II.4.1 Le solaire thermique	36
II.4.2 Le solaire thermodynamique.....	36
II.4.3 Le solaire photovoltaïque.....	37
II.5 Rayonnement solaire incident.....	38
II.5.1 Constante solaire	38
II.5.2 Albédo	38
II.6 Les rayons solaires	39
II.7 Le photovoltaïque.....	40
II.7.1 Définition	40
II.7.2 Principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques	40
II.7.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	41
II.7.4 Module photovoltaïque	42
II.7.5 Le rendement d'un panneau photovoltaïque	44

II.8 Les avantages des panneaux solaires photovoltaïques	44
II.9 Les inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques	45
Conclusion.....	45

Chapitre 3 : Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

III.1 Introduction	46
III.2 DESCRIPTION DE LOGICIEL TRNSYS	46
III.3 Système de production de l'hydrogène à partir l'énergie solaire	47
Photovoltaïque.....	47
III.4 Configuration du système de production d'hydrogène par TRNSYS	47
III.4.1 Le Contrôleur (TYPE 100a).....	51
III.4.2 Le Convertisseur de puissance (type 175)	51
III.4.3 L'électrolyseur	51
III.5 Production d'hydrogène	52
III.6 Simulation et résultats	53
III.6.1 Choix des sites	53
III.6.2 Les données d'entrées	54
III.7 Dimensionnement du PV	56
III.8 Dimensionnement de l'électrolyseur.....	57
III.9 Dimensionnement du réservoir	59
III.10 Résultats	60
III.11 Comparaison des résultats	71
Conclusion	73
Conclusion général	75

Liste des Figures

Figure I.1 : Domaine d'explosivité du propane, du méthane et de l'hydrogène	5
Figure I.2 : Les procédés de la production hydrogène et leur application	8
Figure I.3 : Produire de l'hydrogène à partir de différentes sources	9
Figure I.4 : Les formes principales de stockage l'hydrogène	11
Figure I.5 : Étapes de la production d'hydrogène jusqu'à son utilisation.....	12
Figure I.6 : Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène	15
Figure I.7 : Mécanisme de l'électrolyse.....	17
Figure I.8 : Principe de l'électrolyse alcaline.....	20
Figure I.9 : L'électrolyse PEM.....	21
Figure I.10 : L'électrolyse SOEC	22
Figure I.11 : Comparaison des performances (rendement) des diverses technologies (CEA - 2012)....	23
Figure I.12 : Rendements des différentes technologies électrolyseurs.....	23
Figure I.13 : Influence de la température sur la tension.....	25
Figure I.14 : Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zéro gap'	26
Figure I.15 : Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produit par électrolyse alcaline.....	27
Figure I.16 : Coût de l'hydrogène en fonction du mode de production.....	28
(Document France Stratégie - Août 2014)	28
Figure II.1 : Comment fonctionne l'énergie solaire thermique.....	36
Figure II.2 : Principe de fonctionnement un système solaire thermodynamique.....	37
Figure II.3 : Schéma Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque.....	38
Figure II.4 : Les différentes sortes de rayons solaires	40
Figure II.5 : Les rayons solaires	40
Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	42
Figure II.7 : Les composants d'une cellule PV	42
Figure II.8 : Courbe caractéristique du module photovoltaïque.....	43
Figure III.1 : Système de production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire.....	47
Figure III.2 : modèle de la production de l'hydrogène solaire sur TRANSYS.....	48

Figure III.3 : électrolyseur de type alcalin.....	51
Figure III.4 : rayonnement solaire mensuel global et diffus de site d'Alger (Dar el Beida).....	54
Figure III.5 : La Température mensuel de site d'Alger (Dar el Beida).....	55
Figure III.6 : rayonnement solaire mensuel global et diffus de site Tamanrasset.....	55
Figure III.7 : La Température mensuel de site Tamanrasset	55
Figure III.8 : Courbe I-V d'un générateur photovoltaïque.	56
Figure III.9 : Les caractéristiques I-V de l'électrolyseur de type alcalin.....	57
(Courbe de polarisation).....	57
Figure III.10 : la puissance annuelle de PV et de l'Elyctrolyseur et Niveau de pression dans le réservoir d'hydrogène sur le site de Dar el Beida	60
Figure III.11 : La puissance de PV et d'Electrolyseur au printemps sur le site de dar el Beida	60
Figure III.12 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en été sur le site de dar el Beida	61
Figure III.13 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en L'automne sur le site de dar el Beida	61
Figure III.14 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en Hiver sur le site de dar el Beida.	61
Figure III.15 : la production d'Hydrogène au printemps sur le site de dar el Beida.	62
Figure III.16 : La production d'Hydrogène en été sur le site de dar el Beida.....	63
Figure III.17 : La production d'Hydrogène en L'automne sur le site de dar el Beida.	63
Figure III.18 : La production d'Hydrogène en Hiver sur le site de dar el Beida.	64
Figure III.19 : la puissance annuelle de PV et de l'Electrolyseur et Niveau de pression dans le réservoir d'hydrogène sur le site de Tamanrasset	64
Figure III.20 : La puissance de PV et d'Electrolyseur au printemps sur le site de Tamanrasset	65
Figure III.21 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en été sur le site de Tamanrasset	65
Figure III.22 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en L'automne sur le site de Tamanrasset	66
Figure III.23 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en Hiver sur le site de Tamanrasset	66
Figure III.24 : La production d'Hydrogène au printemps sur le site de Tamanrasset	67
Figure III.25 : La production d'Hydrogène en été sur le site de Tamanrasset.....	67
Figure III.26 : La production d'Hydrogène en L'automne sur le site de Tamanrasset	68
Figure III.27 : La production d'Hydrogène en Hiver sur le site de Tamanrasset.....	68
Figure III.28 : La puissance annuelle de PV et d'Electrolyseur sur le site de Dar el Beida et Tamanrasset.....	71
Figure III.29 : la production d'hydrogène annuelle sur le site de de Dar el Beida et Tamanrasset.....	72

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène. [1]	3
Tableau I.2 : Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène et du propane dans l'air.....	6
À pression et température atmosphériques. [4].....	6
Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des différentes technologies d'électrolyse.....	24
Tableau I.4 : Coûts de production selon divers scénarios détaillés ci-dessus.....	28
Tableau I.5 : Comparaison de carburant En termes de prix, de santé et d'énergie et émission de dioxyde de carbone.cv.....	30
Tableau III.1 : Le modèle de notre système.	50
Tableau III.2 : Position géographique des sites	53
Tableau III.3 : Dimensionnement du PV.....	56
Tableau III.4 : Dimensionnement du l'électrolyseur	57
Tableau III.5 : les données d'entre de l'électrolyseur	58
Tableau III.6 : Dimensionnement du réservoir	59

Introduction général

L'homme a connu les sources d'énergie, en particulier les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) depuis l'Antiquité, et il les a utilisées dans les transports, l'agriculture et l'industrie, et elles ont été le nerf moteur de nombreux autres secteurs, et les énergies fossiles sont restées longtemps un moteur majeur de l'équation de l'économie et du développement.

Cette énergie avait conduit à une révolution industrielle, car elle est actuellement confrontée à de nombreux défis environnementaux, car cette énergie pollue l'environnement car elle est la principale cause des émissions de gaz à effet de serre qui conduisent au changement climatique mondial, sans parler de la quasi-épuisement des réserves mondiales de cette énergie. Toutes les sources d'énergie sont immédiates, épuisées et non renouvelables. Il a donc fallu rechercher d'autres sources d'énergie respectueuses de l'environnement, car elles contribuent à répondre à la demande mondiale croissante d'énergie.

Actuellement, l'objectif de toute recherche énergétique dans le monde est d'essayer de remplacer les sources d'énergie fossile non renouvelables par d'autres sources d'énergie renouvelables (énergie solaire, éolienne, énergie hydraulique ...) largement disponibles et peu coûteuses car moins polluantes pour l'environnement.

L'hydrogène devrait jouer un rôle de pionnier dans le domaine de l'énergie à l'avenir, d'autant plus que les matières premières pour sa production sont abondantes et que le cycle de sa production et de son utilisation est caractérisé par une compatibilité élevée avec les conditions du développement durable, et un système énergétique qui dépend de l'hydrogène comme vecteur d'énergie peut rendre les ressources énergétiques renouvelables accessibles au consommateur.

L'Algérie est l'un des pays qui possède d'énormes réserves d'énergies renouvelables, ce qui lui ouvre des perspectives prometteuses pour utiliser l'hydrogène comme vecteur d'énergie car cela contribuera non seulement à augmenter et à diversifier ses réserves d'énergie et ses exportations, mais lui permettra également de soutenir la demande croissante d'énergie, et l'Algérie fait des efforts. Actuellement, de nombreux efforts sont déployés pour développer son utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique, en coopération avec les pays européens, notamment les pays du Sud.

Afin de l'utiliser pour produire de l'énergie de plusieurs manières, notamment pour alimenter des moteurs à combustion interne pour voitures et véhicules, ou dans des piles à combustible pour produire du courant électrique, l'hydrogène est également utilisé comme carburant dans les engins spatiaux et les missiles à propulsion. Dans notre travail, Nous allons étudier ce qui suit:

- ✓ Dans le premier chapitre, découvrez les propriétés de l'hydrogène, et quelles sont ses méthodes de production et quelles sont ses multiples utilisations.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier le domaine de l'énergie solaire (énergie photovoltaïque), et le principe de fonctionnement des panneaux solaires, et quels en sont les avantages et les inconvénients.
- ✓ Au troisième et dernier chapitre, nous étudierons la simulation de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire à l'aide du logiciel TRNSYS sur les sites de Tamanrasset et Dar El-Beida.

Chapitre I

**Etat de l'art des systèmes de production
de l'hydrogène**

I.1 Introduction :

Aujourd'hui, les énergies fossiles représentent plus de 80% de la consommation totale d'énergie dans le monde, les transports étant à 92% tributaires du pétrole. Alors que les réserves diminuent, la demande mondiale augmente régulièrement en raison de l'émergence des économies en développement. Ces ressources sont également concentrées géographiquement : plus de la moitié des réserves mondiales de pétrole brut se trouvent au Moyen-Orient, tandis qu'un tiers du charbon mondial se trouve aux États-Unis et un quart de ses réserves de gaz naturel se trouvent en Russie.

Dans quelques années, les générations futures seront confrontées à un grave problème : le manque de pétrole. Pour éviter cela, nous devons maintenant envisager des solutions alternatives qui nous permettent de continuer à utiliser différents modes de transport utilisant l'énergie en grande quantité sur Terre. La recherche se concentre sur plusieurs domaines : voiture pneumatique comprimée, voiture hybride, voiture solaire.

À la lumière de ces faits, l'un des plus grands défis auxquels la société est aujourd'hui confrontée est de faire en sorte que chacun ait accès à l'énergie dont il a besoin tout en respectant et en préservant l'environnement naturel. L'hydrogène est l'une des solutions à ce problème majeur et qui peut être une solution durable pour les générations futures.

I.2. Propriété de l'hydrogène :

Premier élément dans la table périodique. Dans la condition normale c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques, H₂. L'atome d'hydrogène, le symbole H, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Son nombre atomique est 1 et son poids atomique 1, 00797. Il y a trois isotopes d'hydrogène : le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99.98% de l'élément normal ; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2%, et tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature. Il peut aussi être artificiellement produit par diverses réactions nucléaires, Dans ce tableau ci-dessous, nous découvrirons certaines propriétés de l'hydrogène.

[1]

Propriété	Valeur numérique
Masse atomique	1.0079 g/mol
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	3.00 kWh/Nm ³ 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	3.55 kWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm ³
Densité liquide à 20.3K	70.79 kg/m ³
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg. K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg. K
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/ (m.K)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Constante du gaz	4 124.5 J/kg. K
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition	20.268K
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Pression critique	12.8 atm

Tableau I.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène. [1]

Ces caractéristiques sont une expression des qualités et des défauts de l'hydrogène.

➤ **Qualités :**

1. le plus énergétique des combustibles par unité de masse (2,2 fois celle du gaz naturel)
2. ni toxique, ni polluant, le plus léger des gaz, ce qui est un facteur déterminant pour la sûreté et la sécurité d'une installation (vitesse de diffusion quatre fois celle du gaz naturel),
3. ses limites de détonation dans l'air couvrent un domaine étroit ce qui est un élément positif de sécurité dans un volume ouvert, puisque couplé à une grande vitesse de diffusion, les conditions de concentration pour une détonation sont très difficiles, voire quasi-impossibles, à obtenir.

➤ **Défauts :**

1. il est très abondant sur terre sous forme atomique (associé à l'oxygène et au carbone le plus souvent) mais très rare sous forme moléculaire H₂, il faut donc le fabriquer, sa densité énergétique volumique est faible (sept fois plus faible que celle du gaz naturel), ce qui pose des problèmes pour son stockage, il est inodore et incolore, ce qui ne facilite pas sa détection naturelle, il brûle avec une flamme invisible, ce qui est un facteur de risque supplémentaire,
2. enfin il a une mauvaise image, injustifiée, dans le public depuis notamment l'accident de l'Hindenburg en 1937 et la bombe H. [2]

I.3 Combustion hydrogène :

I.3.1 La combustion :

Pour la combustion d'hydrogène, il doit y avoir plusieurs raisons et exigences

- La combustion de l'hydrogène exige La présence d'un carburant en concentration dans sa plage d'explosibilité (hydrogène, propane, méthane...).
- La présence d'un comburant (oxygène) en concentration supérieure à la concentration limite en oxygène.
- Une énergie d'inflammation qui dépasse l'énergie minimale d'inflammation (étincelle, point chaud ...)
- L'hydrogène possède un domaine d'explosivité large, 4%-75%, à pression et température ambiantes.

- Son énergie minimale d'inflammation varie en fonction de la concentration en hydrogène et en oxygène à la stœchiométrie (pour chaque molécule d'hydrogène il y a une demi-molécule d'oxygène) donc, pour 29.5%
- en volume d'hydrogène dans l'air, sa valeur est de $17\mu\text{J}$. [4]

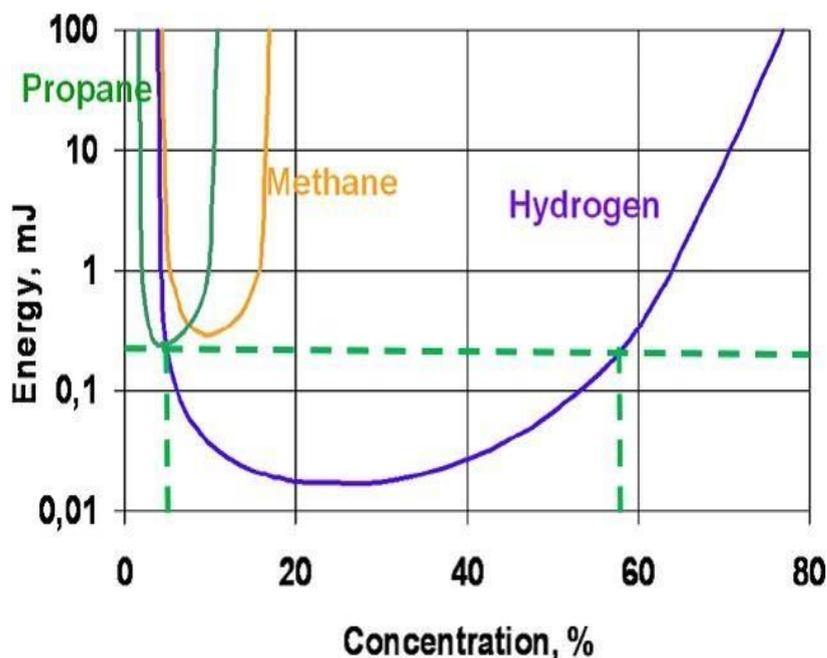


Figure I.1 : Domaine d'explosivité du propane, du méthane et de l'hydrogène

Par contre, la température d'auto inflammation, la température à partir de laquelle l'hydrogène s'enflamme spontanément si il est dans la plage d'inflammabilité, est plus élevée que celles de la plupart des autres gaz inflammables ($585^{\circ}\text{C}/858^{\circ}\text{K}$). La flamme de la combustion de l'hydrogène dans l'air est quasi-invisible et est très chaude ($2045^{\circ}\text{C}/2318^{\circ}\text{K}$). [4]

Propriétés	Unités	Hydrogène	Propane
Domaine d'explosivité	% vol	4 - 75	2,1 – 9,5
Energie minimale d'inflammation	μJ	20	260
Température d'auto-inflammation	°K	858	760
Vitesse de combustion	cm/s	265-325	30-40
Energie d'explosion	g TNT/g produit	24	10
	kg TNT/m3 gaz	2,02	20,3

**Tableau I.2 : Caractéristiques d'inflammation de l'hydrogène et du propane dans l'air
À pression et température atmosphériques. [4]**

I.3.2 Explosion :

L'inflammation d'un nuage de gaz formé lors d'une fuite sur une canalisation ou sur un stockage peut, dans certaines configurations, donner lieu à une explosion. Cette explosion est une libération soudaine d'énergie entraînant la propagation d'un front de flamme et une onde de surpression. Il existe deux régimes d'explosion :

I.3.2.1 La déflagration : dans ce cas, le front de flamme se déplace à vitesse subsonique. Les gaz frais sont comprimés par l'expansion du volume (effet piston). Il en résulte donc une augmentation continue de la surpression.

I.3.2.2 La détonation : la vitesse du front de flamme est supersonique, le mélange hydrogène-comburant est comprimé dans des conditions quasi adiabatique avec pour résultat la formation d'une onde de choc. [4]

I.4 Application d'hydrogène :

L'hydrogène a de nombreuses applications où il peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Comme le montre la figure I.2, il a l'avantage de présenter une capacité de stockage (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO₂. En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi :

I.4.1 Des applications stationnaires :

Stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive ;

I.4.2 Des applications mobiles :

L'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électro-mobilité de 2^e génération, dite 2G, la première correspondant aux véhicules électriques) ;

I.4.3 Des applications industrielles :

L'hydrogène est un composant chimique très employé dans l'industrie.

Notons que l'hydrogène est déjà largement utilisé dans le domaine de l'aérospatial comme combustible pour la propulsion des fusées. [5]

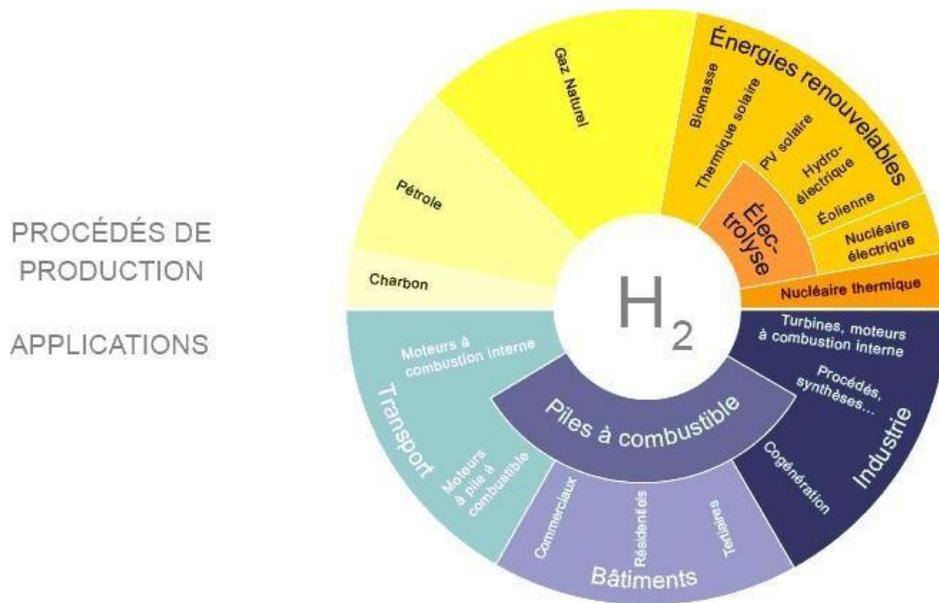


Figure I.2 : Les procédés de la production hydrogène et leur application

I.5 Les modes de production d'hydrogène :

Aujourd'hui, il existe plusieurs filières technologiques qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de différentes sources. Comme le montre la figure I.2.

Les techniques de production consistent à extraire l'hydrogène H₂ de la ressource primaire, les différentes techniques de production existent :

- Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂. Le CO₂ émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné.
- La gazéification permet de produire, par combustion, un mélange de CO et d'H₂ à partir de charbon (solution qui émet beaucoup de CO₂) ou de biomasse.
- une autre méthode utilise des composés organiques principalement constitués d'hydrogène et de carbone, comme le gaz naturel, le charbon ou la biomasse. Elle représente actuellement plus de 90% de la production d'hydrogène.
- la production de l'hydrogène par décomposition de l'eau. Elle utilise soit un courant électrique pour l'électrolyse, soit une succession de réactions chimiques pour les cycles thermochimiques qui permettent de « casser » les molécules d'eau afin d'obtenir de

l'hydrogène.

- Une autre filière utilise les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne (la lumière du Soleil et la force de vent).
- L'hydrogène peut également être produit via la production biologique par des algues, par réduction chimique, ou encore par la chaleur (thermolyse).
- L'hydrogène peut aussi être produit à partir l'énergie nucléaire.

[6]

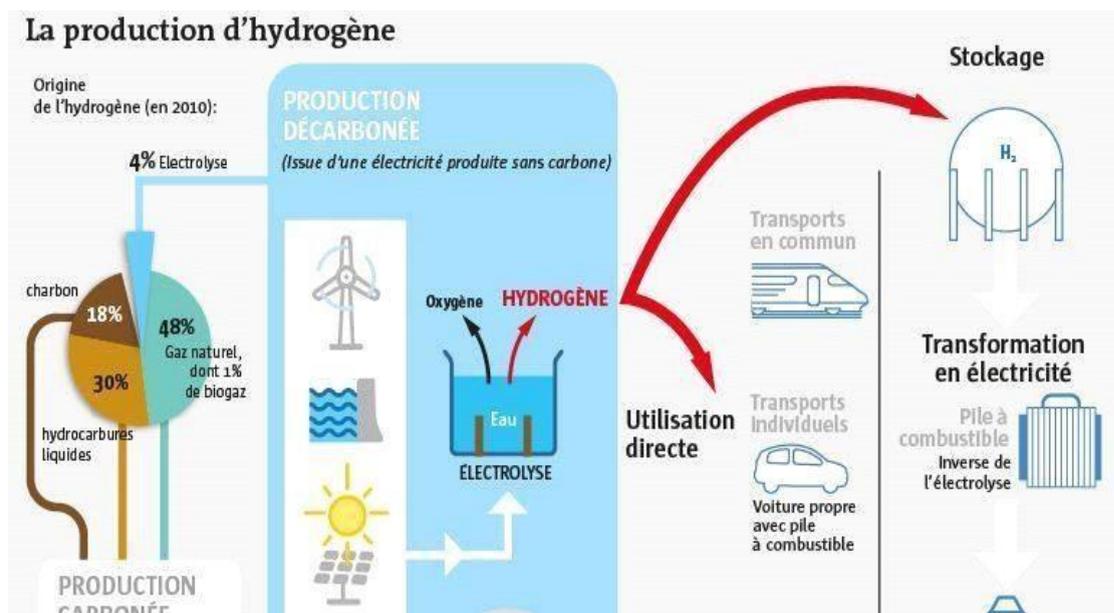


Figure I.3 : Produire de l'hydrogène à partir de différentes sources. [6]

I.6 le stockage de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz ultraléger qui occupe un volume substantiel dans des conditions de pression standard, c'est-à-dire la pression atmosphérique. Un litre de ce gaz ne pèse que 90 mg sous pression atmosphérique normale, ce qui signifie qu'il est 11 fois plus léger que l'air que nous respirons. Afin de stocker et de transporter efficacement l'hydrogène, ce volume doit être considérablement réduit.

Un volume d'environ 11 m³ est nécessaire pour stocker seulement 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Pour cette raison, sa densité doit être augmentée en

Utilisant l'une des techniques suivantes :

1. Stockage haute pression sous forme gazeuse
2. Stockage à très basse température sous forme liquide
3. Stockage à base d'hydruure sous forme solide

Pour un transport plus facile et plus efficace, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs ou des bouteilles en composite. [7]

I.6.1 Sous pression :

Le moyen le plus simple de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression.

Ainsi, à 700 bar, soit 700 fois la pression atmosphérique normale, l'hydrogène a une densité de 42 kg / m³, contre 0,090 kg / m³ dans des conditions normales de pression et de température. A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 125 litres.

Aujourd'hui, la plupart des constructeurs automobiles ont opté pour la solution qui consiste à stocker l'hydrogène sous forme gazeuse, à haute pression. Cette technologie nous permet de stocker suffisamment d'hydrogène pour permettre à une voiture fonctionnant sur batterie à combustible de parcourir entre 500 et 600 km entre les pleins. [7]

I.6.2 Sous forme liquide :

Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à convertir l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à une température très basse.

L'hydrogène se transforme en liquide lorsqu'il est refroidi à une température inférieure à -252,87 ° C.

A -252,87 ° C et 1,013 bar, l'hydrogène liquide a une densité proche de 71 kg / m³. A cette pression, 5 kg d'hydrogène peuvent être stockés dans un réservoir de 75 litres.

Afin de maintenir l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés. [7]

I.6.3 Forme solide :

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide, c'est-à-dire stocké dans un autre matériau, est également une piste de recherche prometteuse.

Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques impliquant des mécanismes d'absorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple consiste à former des hydrures métalliques solides par réaction d'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption est le résultat de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes qui composent ces matériaux. Les matériaux les plus prometteurs sont composés de magnésium et d'alanes.

Seule une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, ce qui est actuellement le principal inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux génèrent actuellement un rapport poids d'hydrogène sur poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%. [7]



Figure I.4 : Les formes principales de stockage l'hydrogène.

I.7 Les multiples utilisations de l'hydrogène :

Actuellement, l'hydrogène a deux utilisations principales :

L'hydrogène produit aujourd'hui sert à plus de 80 % à la fabrication d'ammoniac indispensable

À l'industrie des engrais. En plus de de méthanol, il est aussi utilisé pour le raffinage des produits pétroliers, carburants et biocarburants. Le reste est utilisé pour d'autres productions chimiques, pour la synthèse de matières plastiques, pour certains processus de l'industrie du verre et pour la fabrication de circuits imprimés électroniques. Dans le monde, près de 60 millions de tonnes d'hydrogène sont produites par an, 900 000 tonnes en France.

Aujourd'hui, l'hydrogène est quasi-exclusivement utilisé pour des usages industriels dans la chimie et le raffinage. Demain, ses capacités en tant que vecteur d'énergie pourraient jouer un rôle majeur dans le domaine des transports, dans les filières gaz, dans la production d'électricité et de chaleur. [6]

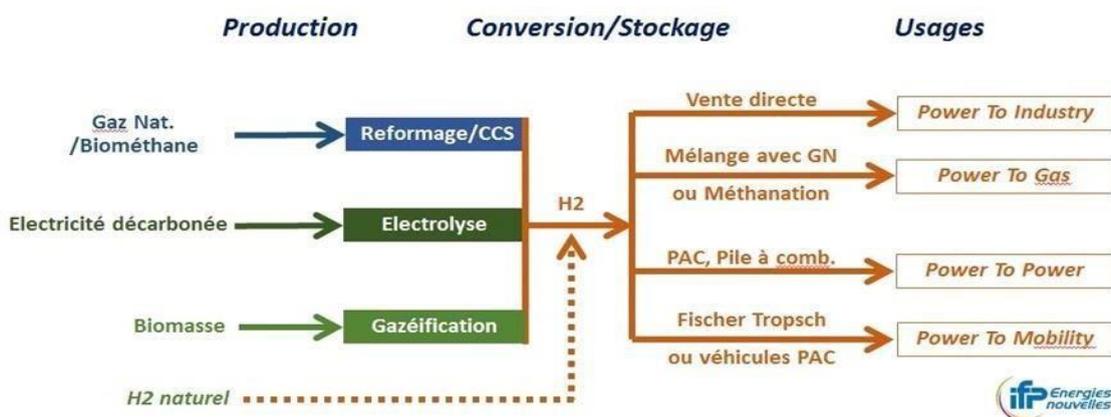


Figure I.5 : Étapes de la production d'hydrogène jusqu'à son utilisation.

I.8 L'hydrogène dans la transition énergétique :

I.8.1 L'hydrogène et les enjeux de la transition énergétique :

L'hydrogène pourrait répondre à deux enjeux essentiels de la transition énergétique :

Décarboner le secteur des transports. Les véhicules électriques équipés d'une pile à combustible (PAC) transforment l'hydrogène en électricité et en vapeur d'eau :

Mais cette solution n'est favorable en termes environnemental que si l'hydrogène est produit à partir de sources décarbonées.

L'hydrogène présente des avantages par rapport aux batteries, en termes d'autonomie (500 à 700 km) et de temps de recharge (< 5 mn). [6]

I.8.2 Pallier la variabilité de la production de certaines énergies renouvelables avec la possibilité de stocker l'hydrogène :

L'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau en utilisant les excédents de la production électrique, éolienne et photovoltaïque notamment,

L'hydrogène ainsi produit peut être stocké puis reconverti en électricité,

Le stockage est envisagé principalement en cavité saline. [6]

I.9 Impacts de l'hydrogène :

I.9.1 Sur la santé :

Effets d'exposition à l'hydrogène :

- Le feu : Extrêmement inflammable. Beaucoup de réactions peuvent causer l'incendie ou l'explosion.
- Explosion : Les mélanges de gaz/air sont explosifs.
- Inhalation : Les concentrations élevées de ce gaz peuvent causer un environnement en oxygène déficient. Les individus respirant une telle atmosphère peuvent éprouver des symptômes incluant des maux de tête, des sifflements dans des oreilles, des vertiges, des somnolences, des pertes de connaissance, des nausées, des vomissements et dépressions. Dans quelques circonstances, la mort peut se produire. On ne s'attend pas à ce que de l'hydrogène cause la mutagénicité, l'embriotoxicité, la tératogénicité ou la toxicité reproductrice. Des conditions respiratoires préexistantes peuvent être aggravées par une surexposition à l'hydrogène.
- Dangers physiques : Le gaz se mélange bien à l'air, les mélanges explosifs sont facilement formés. Le gaz est plus léger que l'air.
- Dangers chimiques : Le chauffage peut causer la combustion ou l'explosion violente. Réagit violemment avec l'air, l'oxygène, des halogènes et des oxydants forts causant le feu et le risque d'explosion. [1]

I.9.2 Sur l'environnement :

Stabilité environnementale : l'hydrogène se produit naturellement dans l'atmosphère. Le gaz sera absorbé rapidement dans des secteurs bien-aérés.

- Effet sur les plantes ou les animaux : Aucun effet sur les animaux n'a été relaté dans

des endroits déficients en l'oxygène. Aucun effet nuisible ne se produit sur la flore, excepté le gel produit en présence de gaz s'étendant rapidement.

- Effet sur la vie aquatique : Aucune preuve n'est actuellement disponible sur l'effet de l'hydrogène sur la vie aquatique. [1]

I.10 La production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables :

Pierre-Etienne Franc, en charge de l'activité mondiale énergie hydrogène du groupe Air Liquide, en est convaincu, « l'électricité est le vecteur principal qui permettra, avec l'hydrogène, de se passer un jour des énergies fossiles ». Un lien étroit et vertueux peut être tissé entre hydrogène et énergies renouvelables intermittentes, solaires et éoliennes, notamment. Lorsque le soleil brille -- ou que le vent souffle -- et seulement à ce moment-là, les panneaux photovoltaïques -- ou les éoliennes -- produisent de l'électricité. Lorsque la demande rencontre l'offre, tout se passe bien. Mais si l'électricité produite ne trouve pas preneur, elle est perdue. Sauf si elle peut être employée... à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. On parle alors de « Power to hydrogène ».

Cet hydrogène propre et durable peut alors servir différentes applications dans lesquelles il se substituera aux ressources fossiles. Il pourra intéresser les industriels et représenter pour eux un moyen de décarboner leurs procédés. Il pourra aussi servir à alimenter des stations de recharge pour véhicules roulant à l'hydrogène (voitures, camions, bus, chariots élévateurs, bateaux), des véhicules qui n'émettent ni particules fines ni CO₂ et qui ne rejettent que de l'eau. À ce titre, on peut mentionner le projet **Hy Balance**, mené par Air Liquide au Danemark. Il s'agit du plus grand site européen de ce type avec un électrolyseur de 1,2 MW produisant de l'hydrogène décarboné destiné à l'industrie et la mobilité. Le projet GRHYD, mené par Engie du côté de Dunkerque, expérimente quant à lui, l'injection d'hydrogène vert à hauteur de 20 % dans les réseaux de chauffage au gaz naturel.

L'électricité produite par la pile à combustible alimentée en hydrogène répond par ailleurs à de multiples besoins comme l'alimentation électrique de zones isolées ou encore l'alimentation de secours de sites sensibles. Et l'hydrogène peut aussi être utilisé comme un moyen de stockage de l'énergie renouvelable produite localement Comme le montre la figure I.6. En somme cela permet d'assurer l'autonomie de sites dits « non électrifiés », c'est-à-dire non reliés au réseau électrique national. [8]

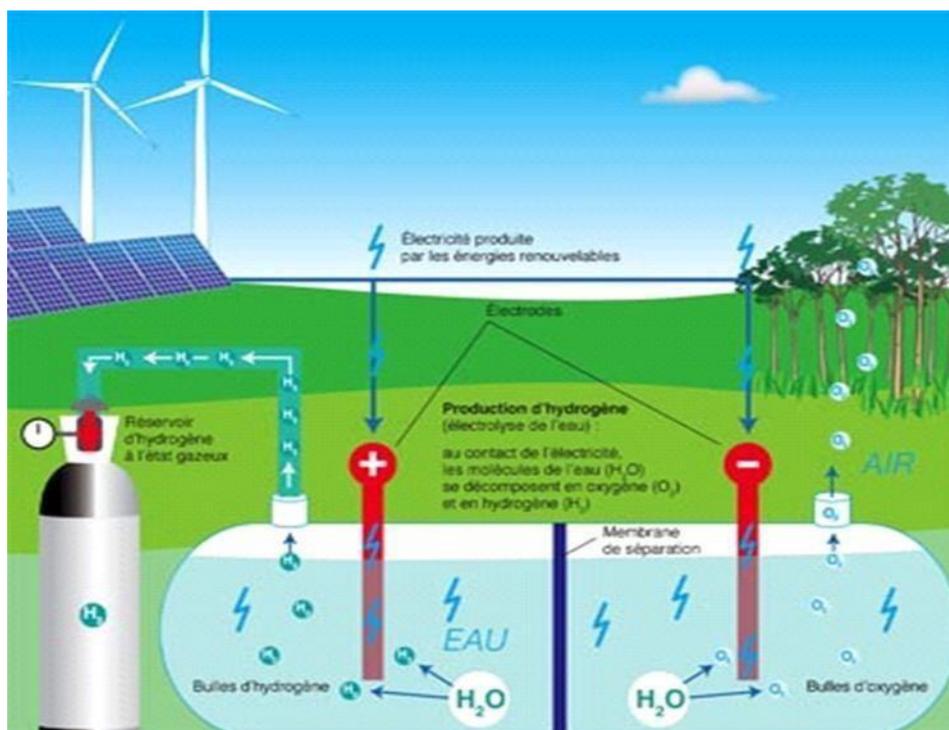


Figure I.6 : Relation entre Energie renouvelable et l'hydrogène.

I.11 La production de l'hydrogène par l'énergie solaire :

Parmi les pistes explorées dans le secteur des énergies renouvelables, il y a celle de l'électrolyse de l'eau grâce à une cellule solaire.

Des ingénieurs belges ont mis au point un nouveau procédé pour produire de l'hydrogène à partir d'un système de panneaux solaires. Ce processus vise à diviser l'eau de l'air en deux parties : d'un côté l'hydrogène, de l'autre l'oxygène. Grâce à des panneaux solaires, ils utilisent 15 % de l'énergie solaire pour obtenir de l'hydrogène gazeux. Chacun peut produire jusqu'à 250 litres d'hydrogène par jour.

Les chercheurs ont mené à bien des études, pendant dix ans, pour parvenir à ce que chacun de ces panneaux solaires capables de transformer l'eau en hydrogène tout en produisant de l'électricité utilisable par ailleurs de 1,6 m² transforme 15 % de la lumière solaire en hydrogène gazeux à partir de la vapeur d'eau. Pour rappel, un panneau solaire classique transforme 18 à 20 % de l'énergie solaire en électricité. [8]

I.12 La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau :

L'électrolyse de l'eau a toujours présenté un grand intérêt pour la production de l'hydrogène pur nécessaire aux procédés chimiques. Conforté par son utilisation comme moyen de stockage fiable des énergies renouvelables en pleines expansions. Des atouts indéniables qui confèrent à la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau un avenir certain.

L'hydrogène produit est requise. Actuellement, le recours croissant aux sources renouvelables conduit au développement de l'électrolyse, procédé bien adapté à la valorisation de ces énergies nouvelles.

I.13 Principe de fonctionnement l'électrolyse de l'eau :

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 électrodes plongées dans un bain électrolytique, qui crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement (les cations se dirigent vers la cathode et les anions vers l'anode). Cette tension dépend essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de la réaction, ce potentiel théorique de la décomposition est de 1,481 V à 298 K mais les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1,7 à 2,1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85%, C'est ce que montre la figure I.7 .[27]

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de manière globale :



Avec une enthalpie de dissociation de l'eau : $\Delta H = 285 \text{ kJ/mole}$.

Quand la tension appliquée est suffisante des réactions se produisent aux interfaces

Électrolyte électrodes :

À l'anode : oxydation avec émission d'électrons



À la cathode : réduction avec capture d'électrons



Les ions d'hydrogènes sont transportés à travers l'électrolyte par la différence de potentielle électrique V. [27]

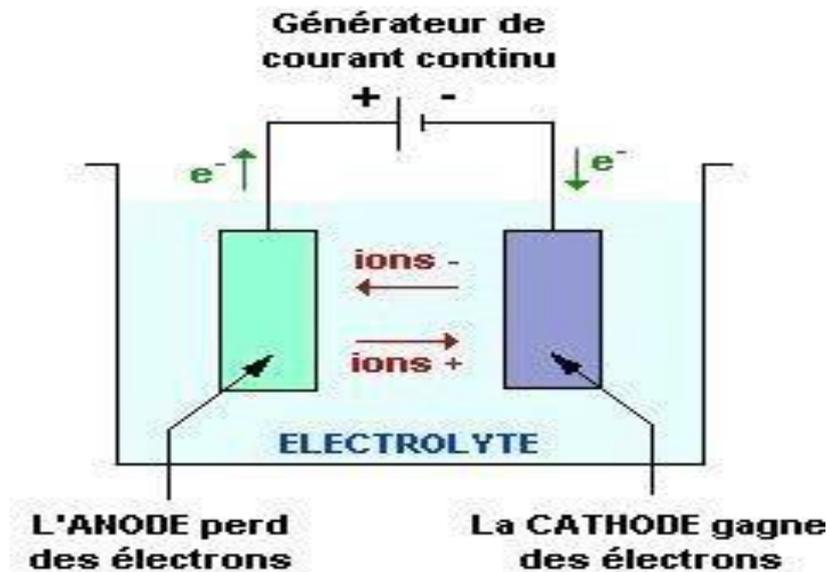


Figure I.7 : Mécanisme de l'électrolyse.

I.13.1 Relation de Nernst :

L'abandon dans un électrolyte (sous courant nul), une électrode prend une tension E_0 .

Cette tension, qui correspond à un équilibre entre les espèces présentes, est appelée potentiel

D'équilibre et suit la relation de Nernst :

$$\mathbf{E = E' + \frac{RT}{NF} \ln \frac{A_{ox}}{A_{red}}} \quad \mathbf{4}$$

Avec :

E : le potentiel en Volt

E' : le potentiel standard en Volt

R : constante des gaz parfaits - $R = 8,3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T : la température en Kelvin (K)

F : la constante de Faraday = $96\,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$

N : le nombre d'électron échangés

A_{OX} : Activité de l'espèce oxydante,

A_{red} : Activité de l'espèce réductrice. [27]

I.13.2 Tension d'électrolyse :

En fonctionnement normal d'une cellule d'électrolyse, la tension V obéit à une loi de la

Forme suivante :

$$V = (E_0 + S) \text{ anode} - (E_0 + S) \text{ cathode} + RI \quad 5$$

Ou :

E_0 : Potentiel d'équilibre des électrodes,

S : surtension d'électrodes,

RI : chute ohmique due à la résistivité de l'électrolyte. [27]

I.13.3 Loi de Faraday :

La loi de Faraday exprime la relation qui lie la quantité d'électricité traversant une Cellule d'électrolyse à l'amplitude des réactions se produisant aux interfaces électrodes électrolyte :

$$P = R_F \cdot \frac{M}{n} \cdot \frac{I \cdot t}{N \cdot E'} \quad 6$$

Avec :

P : masse de constituant mise en jeu au cours de la réaction (g),

R_F : Rendement de courant,

M : masse molaire du constituant (g),

$I \cdot t$: quantité d'électricité traversant la cellule (C),

n : nombre d'électrons-grammes échangés lors de la réaction,

N : nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ pour une mole,

E' : charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. [27]

I.14 Les Différentes Technologies D'électrolyseurs :

Il existe à ce jour trois types d'électrolyse dont la maturation va de la recherche en laboratoire à la commercialisation. Leur principale différence réside dans l'électrolyte utilisé.

Quelles en sont les principales caractéristiques et le possible couplage avec des systèmes de production à bases d'énergies renouvelables. [28]

I.14.1 L'électrolyse alcaline :

L'électrolyse alcaline constitue la solution de production d'hydrogène la plus utilisée de nos jours, et propose un coût d'investissement faible en comparaison avec les autres technologies d'électrolyse, notamment grâce à la simplicité des matériaux.

Bénéficiant déjà de rendements de 68 à 77%, l'électrolyse alcaline possède une marge d'amélioration limitée et une faible réactivité aux variations de puissance. Si ce dernier aspect est problématique pour un couplage avec des énergies intermittentes, il présente peu

D'inconvénients pour la production d'hydrogène à partir de l'hydroélectricité.

Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions

Hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+) [28]

Le principe de ce type d'électrolyse est représenté sur la figure I.8 ci-dessus :

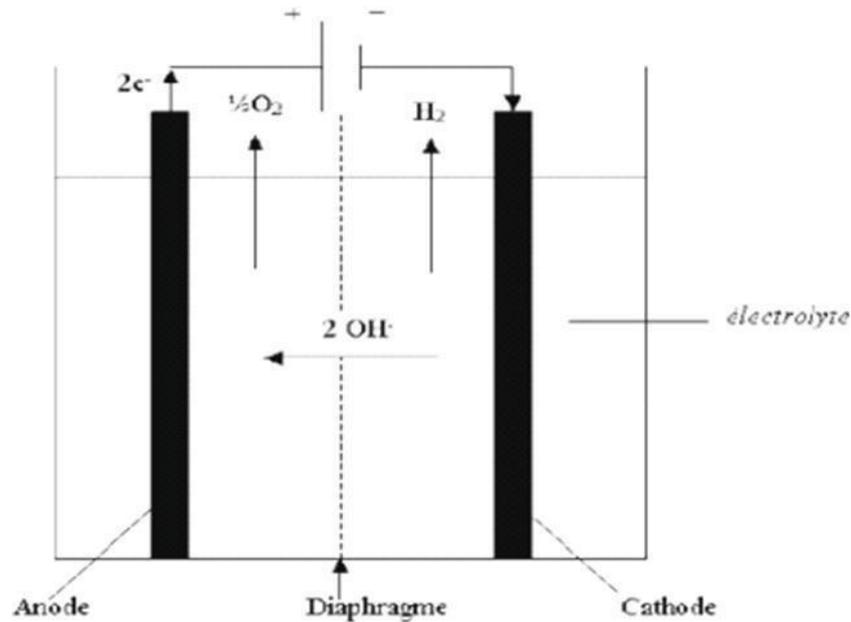


Figure I.8 : Principe de l'électrolyse alcaline.

Les réactions sur les électrodes sont les suivantes :



Modèle électrochimique d'un électrolyseur alcalin :

Le modèle est basé sur une combinaison de lois pures de la thermodynamique, du transfert de chaleur et de l'expression empirique électrochimique. Un modèle thermique est également inclus.

Une équation de tension actuelle dépendant de la température est utilisée, cette équation est conçue pour l'électrolyseur alcalin Advanced Technologies. L'équation caractéristique de l'électrolyseur est donnée comme suit.

$$U_{cell} = U_{rev} + r' \cdot \frac{i_{ely}}{AREA} + s' \cdot \log \left[\frac{t' \cdot i_{ely}}{AREA} + 1 \right] \quad 9$$

Avec

Résistance dans l'électrolyte :

$$r' = r_1 + r_2 \cdot T_{ely} \quad 10$$

Surtension dans l'électrode

$$S' = S_1 + S_2 \cdot T_{\text{ely}} + S_3 \cdot T_{\text{ely}}^2 \quad 11$$

$$t' = t_1 + \frac{t_2}{T_{\text{ely}}} + \frac{t_3}{(T_{\text{ely}})^2} \quad 12$$

I.14.2 Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane) :

L'électrolyse acide se distingue de la précédente par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons. Les avantages de cette technologie sont l'absence d'électrolyte liquide, la compacité, la simplicité du design et du fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion, des performances sensiblement supérieures.

Ce type d'électrolyseur est particulièrement adapté au couplage à une source d'énergie renouvelable car il supporte, mieux que l'électrolyseur alcalin, les variations de puissance électrique disponible. De plus, au vu des meilleures performances des électrolyseurs disponibles.

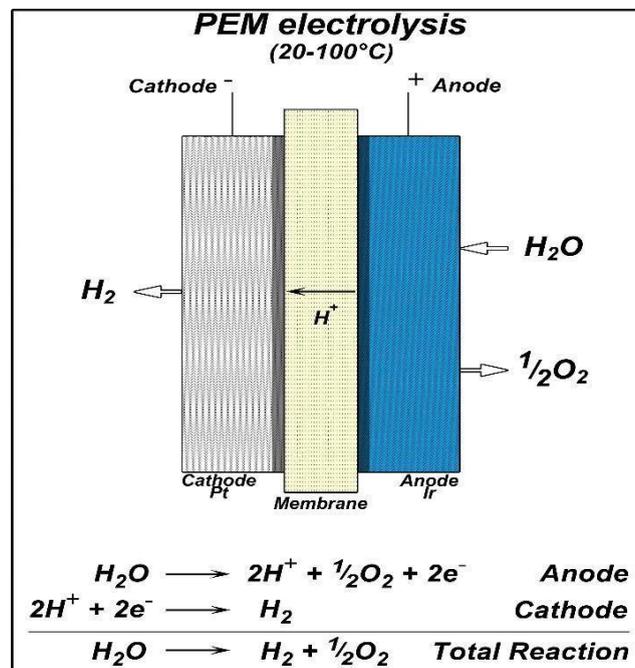


Figure I.9 : L'électrolyse PEM.

I.14.3 L'électrolyse à haute température :

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer une conduction d'ions su peroxydes O^{2-} .

L'augmentation de la température lors d'une réaction d'électrolyse permet un apport d'énergie supplémentaire sans que l'énergie nécessaire à la décomposition moléculaire augmente.

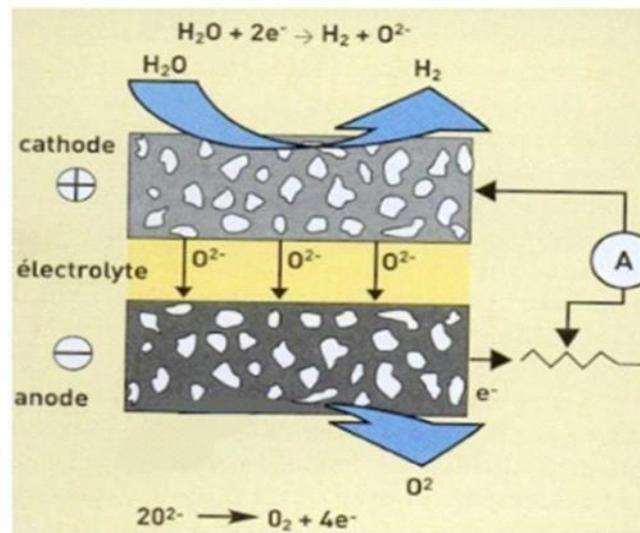


Figure I.10 : L'électrolyse SOEC.

I.15 Comparaison Des Différentes Technologies :

Depuis 1998, une étude bibliographique est menée sur l'électrolyse de l'eau en technologie alcaline dans le cadre du programme WE-NET. Cette étude a pour but de comparer cette technologie par rapport à l'électrolyse PEM de l'eau.

On constate que la technologie alcaline à haute température et haute pression (dite technologie avancée) possède actuellement les meilleurs rendements pour des densités de

Courant inférieures à 1 A/cm² Comme le montre la figure I.11. En outre l'absence de liquides corrosifs (KOH pour l'électrolyse alcaline) favorisera son utilisation.

Quand les objectifs du programme WE-NET concernant l'électrolyseur PEM (rendement de 90% pour une densité de courant de 1 A/cm²) seront atteints, cette technologie Sera alors beaucoup plus intéressante que celle citée précédemment, les conditions d

Température et dépression étant beaucoup moins pénalisantes d'un point de vue énergétique.

[25]

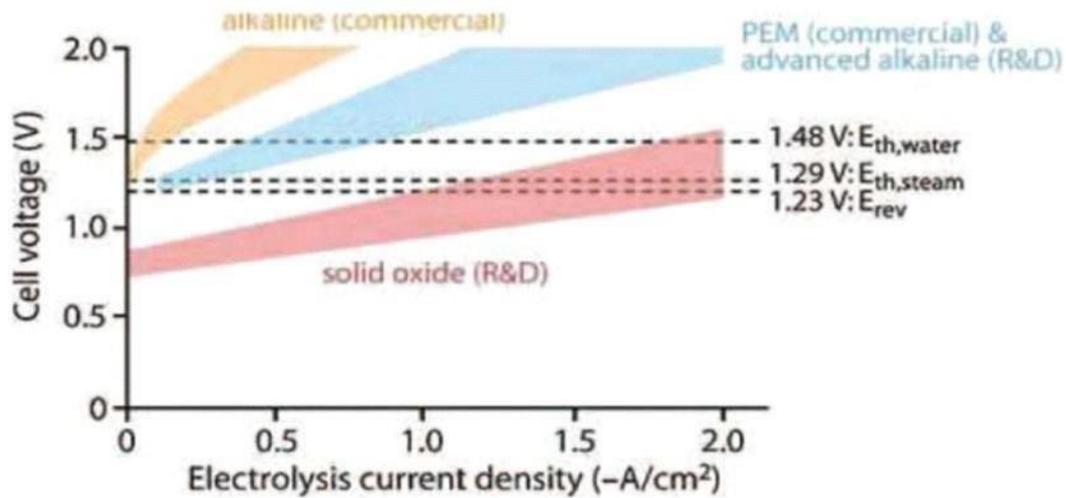


Figure I.11 : Comparaison des performances (rendement) des diverses technologies. (25)

Alors qu'en 2012, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) a publié un graphique comparant les performances des trois technologies : l'électrolyse basse température (de type alcalin en jaune, PEM en bleu) et l'électrolyse haute température (en rouge). A tension donnée aux bornes de la cellule, la production d'hydrogène est proportionnelle à l'intensité du courant (horizontal) et le rendement (Nm^3/kWh) est inversement proportionnel à la tension (vertical). [25]

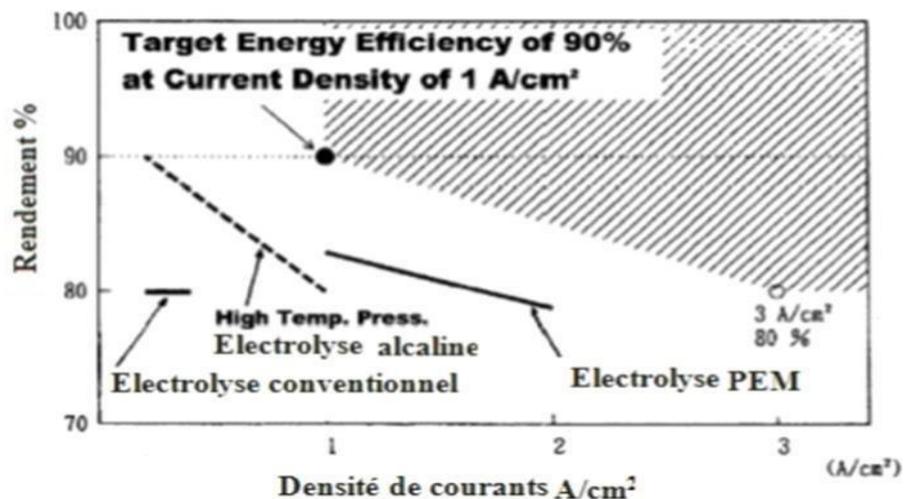


Figure I.12 : Rendements des différentes technologies électrolyseurs.

Le tableau suivant résume les principaux avantages et inconvénient des différentes techniques de production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. [29]

	Electrolyse alcaline	Electrolyse PEM	Electrolyse à haute température
Avantages	-Technologie mature - Catalyseur non noble - Stack au niveau du MW	-Réponse rapide aux variations de charge - capacité du système (fonctionnement a fortes densités de courant) -Haute pureté des gaz produits - Durabilité - Fonctionnement à haute pression	-Rendement électrique élevé -Diminution des couts d'électricité nécessaire - Fonctionnement a haute pression - Catalyseur non noble - Compacité du système (fonctionnement a fortes densités de courra
Inconvénients	-Faibles densités de courant -Faible pureté des gaz à cause de la perméation A travers le diaphragme - Systèmes non compacts à cause de l'utilisation d'un électrolyte liquide -Faibles pression de fonctionnement -Délai de réponse lors de variations de régime	-Environnement très oxydant qui limite l'éventail de matériaux potentiellement utilisables -Cout des catalyseurs (métaux nobles), de l'électrolyte solide, des plaques bipolaires et des collecteurs de courant en titane - Stack inférieur au MW	-Développement à l'échelle du laboratoire -Durabilité

Tableau I.3 : Avantages et inconvenants des différentes technologies d'électrolyse.

I.16 Les effets de l'électrolyse :

I.16.1 Effet de la température sur la tension d'électrolyse :

Des études expérimentales menées sur l'électrolyse montrent que l'ensemble des irréversibilités présentes dans une cellule d'électrolyse diminue lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur augmente. La résistance ionique, qui est prépondérante, diminue alors, permettant de diminuer la tension pratique de l'électrolyseur et donc sa consommation énergétique. En outre les réactions comme l'oxydation de l'eau en oxygène nécessitant d'être catalysées en raison de leur forte irréversibilité sont de même favorisées par un accroissement de la température.

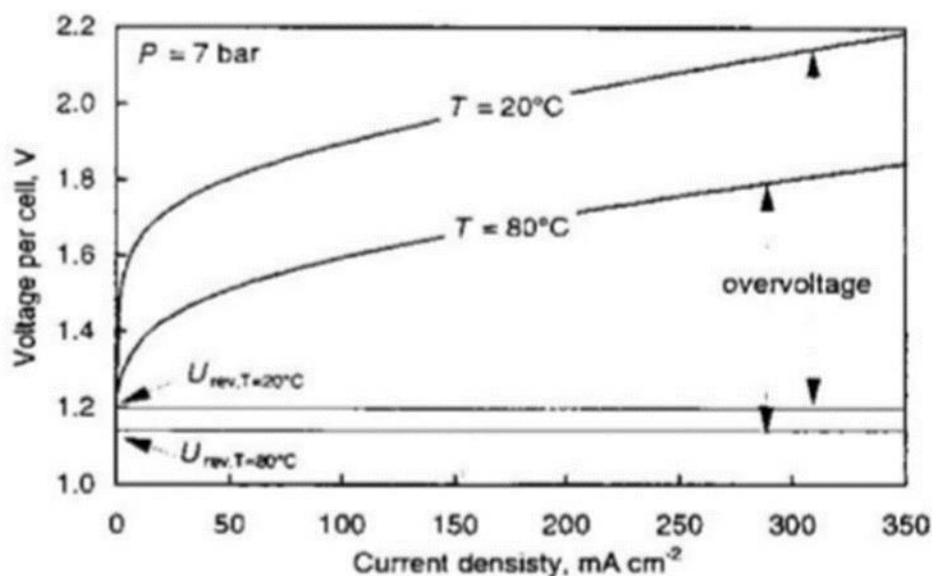


Figure I.13 : Influence de la température sur la tension.

L'augmentation de température est limitée par la tenue des matériaux de l'électrolyseur.

Au-delà d'une certaine température, il est nécessaire d'opérer l'électrolyse sous pression afin de réduire les pertes d'eau par évaporation. On peut observer la possibilité d'obtenir des rendements élevés, voire supérieurs à 100 % (à faible intensité) dans le cas où la chaleur serait apportée à la réaction de manière externe. [26]

I.16.2 Effet de la pression sur la tension d'électrolyse :

Bien que pour des raisons thermodynamiques, une augmentation de la pression tende à augmenter la tension de l'électrolyseur et donc à diminuer son rendement énergétique, en

Pratique, l'influence de la pression sur la tension de cellule à densité de courant et température constantes dépend de la technologie de l'électrolyseur. Pour la technologie dite « zéro gap » (plaques bipolaires), on n'observe aucune influence de la pression et ce, dans une large gamme.) Cette constatation pousse les industriels à développer des électrolyseurs à plaques bipolaires dont la pression de fonctionnement est supérieure à 30 bars. Ils peuvent ainsi s'affranchir d'un étage de compression, très énergivore, pour conditionner les gaz produits à 200 bars. [26]

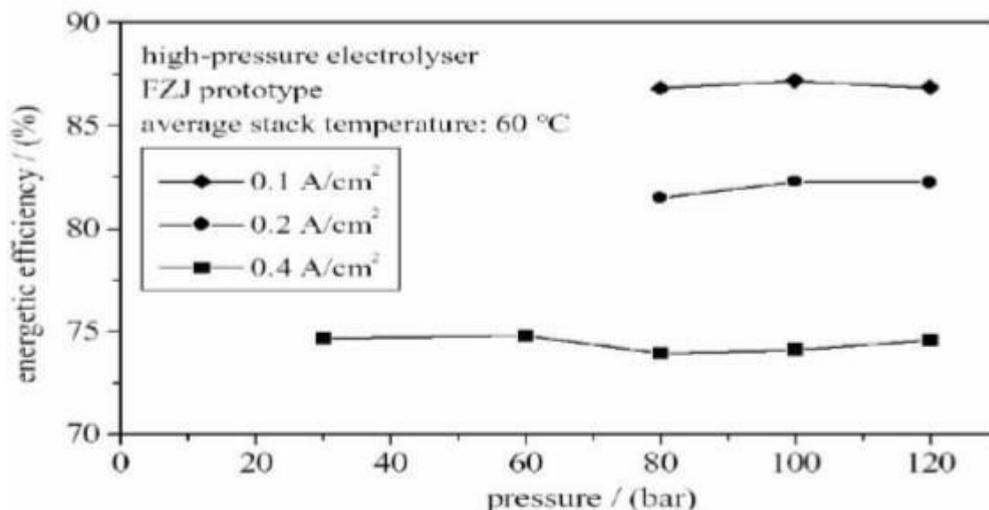


Figure I.14 : Influence de la pression sur la tension de cellule d'un électrolyseur alcalin à technologie 'zéro gap'.

Gaz produits fait chuter la résistance de l'électrolyte et donc la tension d'électrolyse.

I.16.3 Effet de la pression sur la pureté des gaz produits :

La pureté des gaz (principalement l'oxygène) dépend à la fois de l'intensité et de la pression. La Figure I-15 nous montre que la concentration de l'hydrogène dans l'oxygène augmente avec la pression. A faible intensité et à pression constante, le débit d'hydrogène produit est faible. Du fait de la petite taille des molécules d'H₂, ce gaz diffuse à travers la membrane pour se rendre du côté anodique où est produit l'oxygène. Ce phénomène est constant quelle que soit l'intensité. L'oxygène produit est donc moins pur lorsque l'intensité est faible. Cette diffusion peut entraîner un risque d'explosion (si la concentration d'hydrogène dans l'oxygène atteint la valeur critique de 4% en volume).

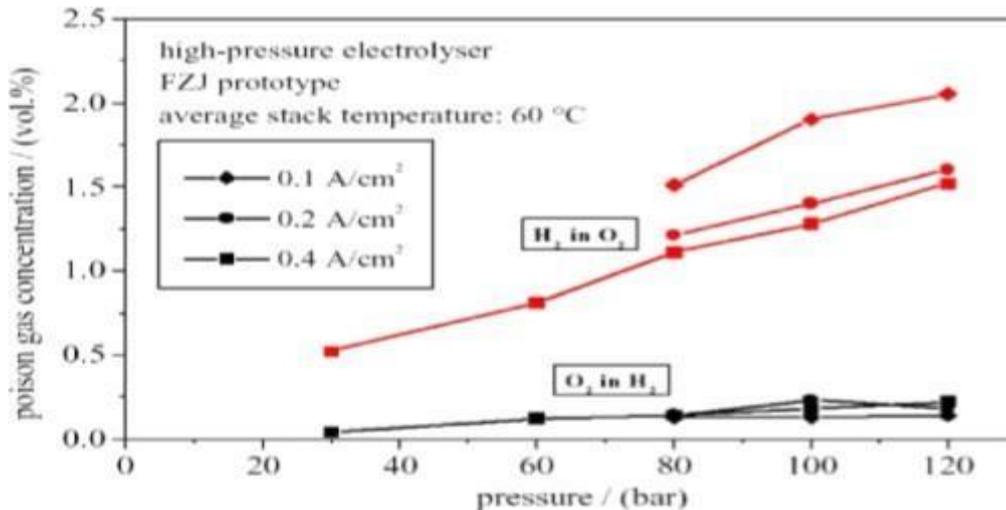


Figure I.15 : Influence de la pression et de l'intensité sur la pureté des gaz produit par électrolyse alcaline.

C'est pourquoi on équipe habituellement les électrolyseurs de capteurs pour mesurer la concentration d'hydrogène dans l'oxygène produit. Enfin, on limite généralement le fonctionnement de l'électrolyseur à une intensité minimale et donc à une puissance minimale pour éviter la production d'un mélange explosif. Ce régime minimal augmente lui aussi avec la pression. Bien que l'augmentation de la pression de fonctionnement de l'électrolyseur soit favorable d'un point de vue énergétique (on peut s'affranchir d'une unité de compression pour le stockage des gaz produits, réduisant ainsi la consommation électrique du système), elle pénalise la qualité des gaz produits, à faible régime. [26]

I.17 Coût de l'hydrogène fabriqué par électrolyse :

Evoquer le recours à un nouveau vecteur d'énergie, exige non seulement une analyse du cycle de vie, mais aussi une analyse économique globale (coût capital, coûts opératoires et maintenance). Le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est lié à celui de l'électricité, donc à son mode de production. Dans le cas d'une électricité « verte », ce sont les coûts en capitaux du système renouvelable (photovoltaïque, éolien...) qui influenceront. Les chiffres varient, selon les auteurs et les hypothèses retenues (taille et performances de l'unité, coût capital...) entre 2,5 et 6 €/kg, avec un assez large consensus autour de 3,5 – 5 €/kg d'hydrogène, pour une durée de fonctionnement supérieure à 7 000 h/an en 2050, de l'hydrogène produit par électrolyse pourrait se situer dans la gamme 0,5 – 0,7 €/kg Et cela est évident dans la figure I.16. [25]

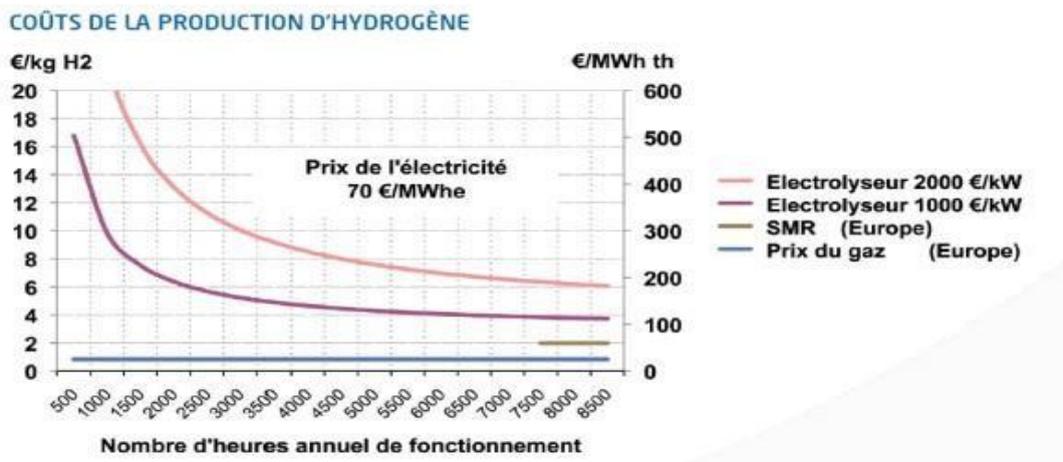


Figure I.16 : Coût de l'hydrogène en fonction du mode de production. [25]

À la différence des systèmes procédant à une conversion directe de l'énergie comme la photo-électrolyse de l'eau, une part du coût de l'électrolyse provient des installations de raccordement au réseau ou à une source de production d'électricité. Le coût de production de l'hydrogène par électrolyse dépend donc majoritairement de l'investissement initial ainsi que du coût de l'électricité utilisée.

scenario	1	2	3	4	5	6
cout de l'electrolyseur	2000 €/kw	2500 €/kw	800 €/kw	800 €/kw	800 €/kw	800 €/kw
rendement electrolyse	60%	50%	80%	80%	80%	80%
production anuelle	7000 Kwh	2000 Kwh	2000 Kwh	1000 Kwh	500 Kwh	7000 Kwh
cout de l'electricite stockee	70 €/Mwh	70 €/Mwh	70 €/Mwh	140 €/Mwh	0 €/Mwh	60 €/Mwh
cout de H2 produit	7 €/kg	18,3 €/kg	6,1 €/kg	12,2 €/kg	10,5 €/kg	3,7 €/kg
Soit	68 \$/MBtu	177 \$/MBtu	59 \$/MBtu	118 \$/MBtu	102 \$/MBtu	36 \$/MBtu
Soit	178 €/Mwh	463 €/Mwh	154 €/Mwh	309 €/Mwh	267 €/Mwh	94 €/Mwh

Tableau I.4 : Coûts de production selon divers scénarios détaillés ci-dessus. [25]

1 : électrolyse alcaline aux conditions actuelles pour une utilisation en base (7000 heures /an), avec un prix de l'électricité de 70 € / MWh et un rendement de l'électrolyseur de 60%.

2 : électrolyse PME aux conditions pour stocker de l'énergie éolienne (70 €/MWh, 2000 heures/an).

3 : Idem à 2 mois avec un cout d'électrolyseur de 800 €/KW et un rendement de 80%, soit aux conditions qu'on peut espérer à l'horizon 2025-2030.

4 : Idem à 3, mais avec stockage d'énergie solaire photovoltaïque (140 €/MWh, 1000 heures/an).

5 : Idem a 3 , mais avec un prix de l'électricité stockée nul et des durées d'utilisation réduites (500h/an) , correspondant a de l'Energie renouvelable excédentaire , En effet certaines études attribuent une valeur nulle aux KW/h électriques stocker , en général produits par des ENR , ce qui reflèterait le caractère fatal de cette Energie quand elle ne peut être ni consommée ni transportée sur le réseau , Bien que cette hypothèse soit hautement contestable , elle a l'intérêt de mettre en évidence la part due aux couts fixes de l'installation.

6 : un dernier scenario évalue la production d'hydrogène en base aux conditions futures espérées. [25]

L.18 L'hydrogène comme vecteur d'énergie :

Les scientifiques se sont tournés vers la soi-disant énergie dérivée de l'hydrogène, car ils cherchaient à trouver une énergie alternative pour le pétrole, et il existe actuellement de petits modèles aux premiers stades de leur développement. L'idée a été lancée du Danemark et déplacée en Allemagne, et les ingénieurs travaillent à sa mise en œuvre depuis 2007, malgré de nombreux obstacles tels que la disponibilité de vastes zones et la disponibilité d'une main-d'œuvre experte dans ce domaine.

Cela est dû à ce taux de conversion de l'énergie d'Hydrogène est deux à trois fois plus efficace que celui des moteurs conventionnels, ce qui veut dire qu'il peut vous permettre d'aller plus loin avec moins de carburant. Les véhicules à Hydrogène ne rejettent que de l'eau et ne génèrent aucune émission de CO2.

L'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources disponibles en grande quantité sur Terre : eau et électricité, biomasse, biogaz, gaz naturel... Parmi celles-ci, plusieurs sont indépendantes des énergies fossiles. De ce fait, l'hydrogène est un vecteur d'énergie durable.

Associé à la pile à combustible, l'hydrogène est un vecteur d'énergie sans émission locale de CO2, qui ne rejette que de l'eau. Une voiture électrique avec une pile à combustible émet 20% de gaz à effet de serre en moins, par rapport à un véhicule à combustion, lorsque son hydrogène est produit à partir de gaz naturel. L'hydrogène est donc un vecteur d'énergie propre

Respectueux de l'environnement.

L'hydrogène possède une très forte densité énergétique massique, c'est-à-dire qu'il renferme beaucoup d'énergie dans une petite masse. L'hydrogène, gaz très léger, concentre énormément d'énergie pour une masse donnée : 1 kg d'hydrogène contient trois fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence.

- Hydrogène 120 MJ/kg
- Méthane 50 MJ/kg
- Essence 43 MJ/kg

L'hydrogène peut être stocké sous différentes formes notamment gazeuses sous haute pression. Le remplissage de réservoirs d'hydrogène ou leur échange sont faciles et rapides. L'hydrogène et la pile à combustible assurent en particulier une autonomie importante et un temps de recharge très court pour les véhicules qui en sont équipés. En cela, l'hydrogène est une solution performante de stockage d'énergie, et représente une alternative au stockage par batterie. [9]

Carburant	Prix actuel		valeur santé BTU/lb (LHV)	coût de l'énergie \$/million BTU	Émissions de dioxyde de carbone	
	(\$/gal/ton or /MCF)	\$/lb			Ibs CO ₂ / lb fuel	Ibs CO ₂ /MM BTU
Charbon, bitumineux	\$ 50	\$ 0,025	12,603	\$ 1,98	2,95	234
l'essence	\$ 3,33	\$ 0,538	18,696	\$ 28,77	3,16	169
GN	\$ 8,45	\$ 0,185	20,267	\$ 9,11	2,74	135
Hydrogène	\$ 5,24	\$ 0,987	51,623	\$ 19,13	/	/

Tableau I.5 : Comparaison de carburant En termes de prix, de santé et d'énergie et émission de dioxyde de carbone. [9]

L.19 Quelques réalisations dans ce domaine dans le monde :

- ✓ En Belgique, Fluxys, Eoly et Parkwind ont annoncé en 2018 le projet de créer une installation "power-to-gas" à l'échelle industrielle, capable de convertir plusieurs mégawatts d'électricité en hydrogène que l'on pourra qualifier de "vert", puisqu'il aura été produit à partir d'énergies renouvelables.
- ✓ La firme française Alstom a mis au point un train qui fonctionne à l'hydrogène sur le réseau allemand, le Coradia iLint.
- ✓ La firme belge Van Hool fabrique des bus qui fonctionnent à l'hydrogène, qui ont été adoptés notamment par la municipalité de Pau, en France.
- ✓ Bruxelles a dévoilé son plan pour développer la production d'hydrogène propre à grande échelle. Objectif : qu'il représente 14 % de la consommation d'énergie européenne en 2050 (contre une part infime aujourd'hui). La Commission vise les 6 gigawatts (GW) d'hydrogène renouvelable avant 2025, et les 40 GW avant 2030. Sachant qu'un réacteur nucléaire produit environ 1 GW et alimente 400 000 foyers, ce n'est pas rien.
- ✓ L'Allemagne se lance à présent dans l'hydrogène. A la faveur de l'effort budgétaire post-coronavirus, Berlin a décidé d'investir 9 des 130 milliards d'euros du plan de relance dans le développement de cette technologie, ont annoncé les ministres de l'économie, de la recherche et des transports, mercredi 10 juin. L'objectif est de faire du pays le numéro un mondial de l'hydrogène d'ici une décennie. Par comparaison, en 2018, la France a lancé un plan hydrogène doté... de 100 millions d'euros.
- ✓ Air Liquide Engineering & Construction built world-scale hydrogen production and purification units for Air Liquide Arabia's site at Yanbu, Saudi Arabia. The plant supplies hydrogen "over the fence" to the nearby oil refinery, which has a capacity of 400 000 barrels per day. Hydrogen will allow the reduction of the sulfur content of the produced fuels, and meet the environmental standards for cleaner transportation fuels
- ✓ Air Liquide Engineering & Construction provided two global-scale hydrogen production units and one purification unit. The site has a total hydrogen capacity of 340,000 Normal cubic meters per hour (Nm³/hour).
- ✓ Le Japon est déjà leader mondial dans la mise en œuvre de la technologie des piles à hydrogène. En 2009, Panasonic s'est associé à Tokyo Gas et a lancé Ene-Farm, un produit alimenté par des piles à combustible électrochimiques pour générer de l'électricité dans les maisons. Et en décembre 2014, Toyota a également dévoilé le

Premier véhicule à pile à hydrogène du marché, une invention qui a beaucoup attiré l'attention des médias.

- ✓ C'est au début des années 2000 qu'elle a connu une impulsion particulière de la part du gouvernement chinois dans le cadre de programmes destinés à développer des nouvelles technologies de l'énergie. Les programmes de développement économique ont ainsi consacré des budgets de recherche conséquents à l'hydrogène et à la pile à combustible. Dans le Plan National de développement scientifique à moyen terme (2006-2020), les technologies de l'hydrogène sont inscrites comme l'un des domaines prioritaires au même titre que l'énergie nucléaire, le charbon « propre » et les énergies renouvelables. Les principaux programmes chinois sont : - Le Program 863 : c'est un programme de R&D sur les thématiques liées aux nouvelles technologies énergétiques. Il est soutenu par le ministère des sciences et des technologies, le MOST. Le budget alloué aux technologies de l'hydrogène et des piles à combustible de 2006 à 2008 était d'environ 19 millions d'euros. - Le Program 973 : également soutenu par le MOST, il concerne les travaux de recherche fondamentale sur la production, le stockage et le transport de l'hydrogène à grande échelle et sur les composants de pile ainsi que les catalyseurs. Un budget de 4 millions d'euros a été alloué à ce programme. Au niveau des programmes de démonstration, on peut citer les véhicules à hydrogène mis en circulation aux jeux olympiques de Pékin 2008. Vingt véhicules à hydrogène ont été mis en circulation. Ce sont des véhicules du constructeur « Volkswagen Passat » développés en Chine. Au cours de l'Exposition Universelle de Shanghai ouverte en 2010, 196 véhicules à pile à combustible dont 6 bus ont été mis en circulation. Deux stations-service hydrogène ont été construites ainsi qu'une station mobile pour assurer la fourniture d'hydrogène à la flotte de véhicules.
- ✓ Les programmes de recherche sur l'hydrogène et les piles à combustible en Corée du Sud ont été formellement lancés en 1988 sous l'égide des ministères de l'éducation des sciences et technologies, et du ministère de l'économie, dans le cadre de recherches générales sur les énergies alternatives. Depuis 2009, les programmes sur l'hydrogène et les piles à combustible sont mis en œuvre par l'institut Coréen pour l'évaluation des technologies d'énergie, KETEP (Korea Institute of Energy Technology Evaluation and planning). Les programmes couvrent aussi bien la recherche fondamentale et appliquée que les projets de démonstration. Entre 2004 et 2008, les investissements dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible sont évalués à plus de 350 millions d'euros. Parmi les principaux programmes réalisés ou en cours de réalisation, le « 21st

Century Frontier Program », un programme de recherche sur 10 ans (2003-2013) axé sur les thématiques de la production, du stockage et de l'utilisation de l'hydrogène.

Dans le domaine du transport, deux grands programmes de démonstration ont été mis en œuvre. Le premier est un programme de démonstration d'une flotte de véhicules légers (30), de bus (4) et de construction de 5 stations-service hydrogène. Ce programme a duré 4 ans de 2006 à 2010. Son budget était de 32 millions d'euros. Le second est un programme de démonstration d'une flotte de 80 véhicules légers sur une période de 2 ans (2009-2011). Son budget est de 12 millions d'euros.

- ✓ Les principaux engagements et orientations des USA dans le domaine de l'hydrogène énergie sont consignés dans le document de référence appelé « Hydrogène and fuel cell posture plan » préparé par les départements d'état à l'énergie (DOE), à la défense (DOD), aux transports (DOT) ainsi que les agences de l'énergie dans certains Etats. Ce cadre de référence fait suite à des initiatives plus anciennes. L'« Hydrogène and Fuel Cell Posture Plan » a fixé les objectifs et les étapes pour obtenir en 2015 un marché prêt pour la commercialisation et l'utilisation des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible. Le programme hydrogène des USA prend en compte les problématiques depuis la recherche fondamentale jusqu'à la commercialisation. Les travaux de recherche sont réalisés autour des principaux axes suivants : La production d'hydrogène, le stockage, le transport et la distribution de l'hydrogène, il s'agit de mettre en œuvre des technologies de production d'hydrogène efficaces, utilisant des ressources domestiques, les énergies renouvelables, les sources de carbone comme le nucléaire. Le principal objectif est d'arriver à réduire le coût de l'hydrogène délivré à la pompe de manière à le rendre compétitif avec les carburants utilisés actuellement dans le secteur des transports. [10] [11] [12] [13] [14]

Conclusion :

L'hydrogène en tant qu'énergie propre permettra certainement de réduire significativement les problèmes liés à la pollution et ainsi de protéger l'environnement. Ainsi, une économie basée sur l'hydrogène renouvelable et non polluant est un objectif d'un immense attrait. Selon de nombreux experts, l'hydrogène est une source d'énergie future, du fait de sa facilité de transport et aussi de la disponibilité de sources de production, car il peut être utilisé dans plusieurs domaines.

L'électrolyse de l'eau est une technologie établie qui est utilisée depuis près d'un siècle pour diverses applications dans l'industrie et est également considérée comme un processus fondamental qui peut également être utilisé pour illustrer le mécanisme de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Et en séparant les composants de l'eau peuvent être dissociés avec de l'électricité produite par l'énergie solaire en hydrogène et oxygène. Dans un proche avenir, les convertisseurs hydroélectriques devraient occuper une place de plus en plus importante. Spécifiquement pour la production d'hydrogène.

La production d'hydrogène à partir de sources renouvelables, notamment à partir de l'énergie solaire, ouvre des horizons prometteurs dans le domaine de la protection de l'environnement et du développement durable. La disponibilité de l'énergie solaire suffit à l'investir de manière optimale.

Chapitre II

**Gisement solaire et conversion
photovoltaïque**

II.1 Introduction :

Le soleil a joué un rôle dominant depuis des temps immémoriaux pour différentes activités naturel dans l'univers et sur terre en particulier. Il continuera à le faire jusqu'à la fin des temps.

L'énergie solaire est une ressource disponible partout dans le monde elle la solution de plusieurs de nos problèmes aujourd'hui car sa présence locale permet d'accompagner le développement est aidé à fixer les populations dans leur habitat d'origine en leur assurant une indépendance énergétique,

L'utilisation de cette énergie n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre, Où L'utilisation de cette énergie dans les procédés d'électrolyse Qui est le plus la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement dans la production de l'hydrogène.

II.2. Le soleil :

Le Soleil est le cœur de notre système solaire. C'est lui qui permet, par son attraction gravitationnelle, aux corps du système solaire de rester ensemble et qui fournit l'énergie nécessaire à divers processus physiques et chimiques ayant lieu dans le système solaire. Il est composé, en masse, à environ 75% d'hydrogène et 25% d'hélium, Avec un diamètre d'environ 1.392.684 kilomètres, le soleil est 100 fois plus grand que la Terre. Sa masse est d'environ $1,989 \times 10^{30}$ kg soit environ 330.000 fois celle de la Terre. [15]

II.3 L'Energie solaire :

L'énergie solaire est une source énergétique qui dépend directement du soleil. Cette énergie renouvelable a l'avantage d'être propre et de ne pas dégager de gaz à effet de serre – elle est également la source de la plupart des autres énergies renouvelables, Ses caractéristiques en font aujourd'hui une source d'énergie renouvelable incontournable Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

C'est maintenant évident à travers des études spectroscopiques de la lumière du soleil qui atteint la terre. L'origine des radiations solaire que reçoit la terre est la conversion d'H en He à travers fusion solaire. Environ 89×10^{36} protons (noyaux d'hydrogène) sont convertis en

Hélium chaque seconde, libérant l'énergie à raison de 4,26 millions de tonnes de matière consommées par seconde, produisant 3.83×10^{26} W, le taux de fusion nucléaire est proportionnel à la densité du noyau. [16]

II.4 Les trois filières d'exploitation de l'Energie solaire :

II.4.1 Le solaire thermique :

Cette technologie convertit l'énergie solaire en chaleur. Les atomes composant le matériau des capteurs solaires sont excités par les photons. En récupérant une partie de leur énergie, les atomes changent d'état énergétique, créant une agitation thermique. Les atomes vont alors libérer le surplus d'énergie sous forme d'énergie thermique, se manifestant sous forme de chaleur. Celle-ci va être transportée par un fluide caloporteur (eau, gaz...) : chauffé, il va pouvoir distribuer peu à peu sa chaleur (plancher chauffant par exemple), ou être stocké (ballon d'eau chaude par exemple) pour un usage ultérieur. [17]

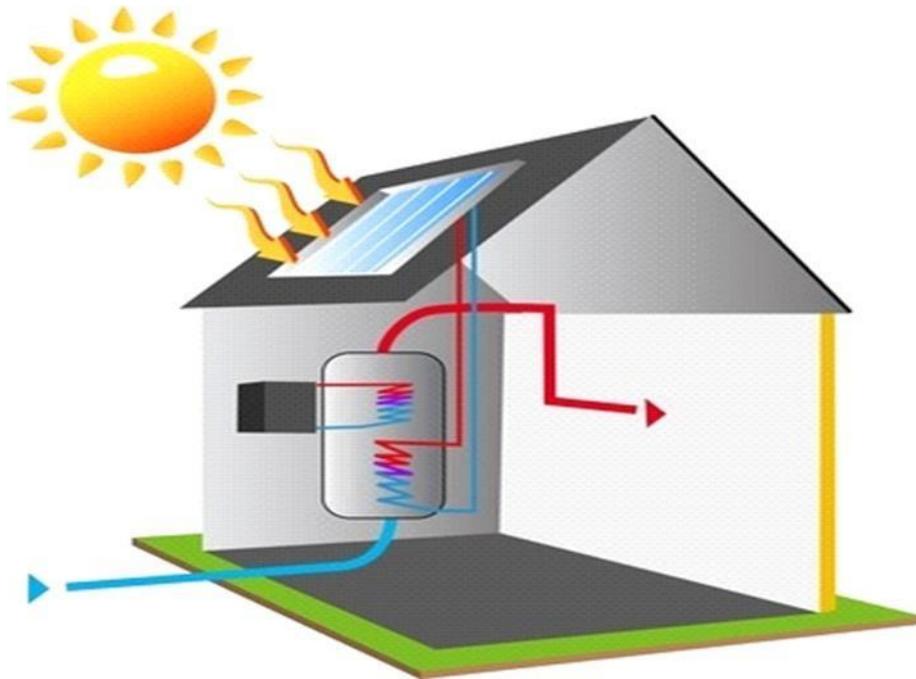


Figure II.1 : Comment fonctionne l'énergie solaire thermique.

II.4.2 Le solaire thermique haute température :

Le principe est de convertir l'énergie solaire en chaleur, puis en électricité dans un second temps. Comme pour le solaire thermique, des capteurs excités par les photons vont produire de la chaleur. En concentrant les rayons du soleil par un système de miroirs (réflecteurs), les températures atteintes sont plus élevées (de 250°C à 1000°C). Un fluide caloporteur transporte

cette chaleur, et celle-ci est ensuite transmise à un fluide thermodynamique. Sous l'effet de changements de température (et donc de pression), le fluide thermodynamique va produire des forces de poussée (énergie mécanique), activant une turbine reliée à un alternateur, permettant ainsi de convertir cette énergie en électricité. [17]

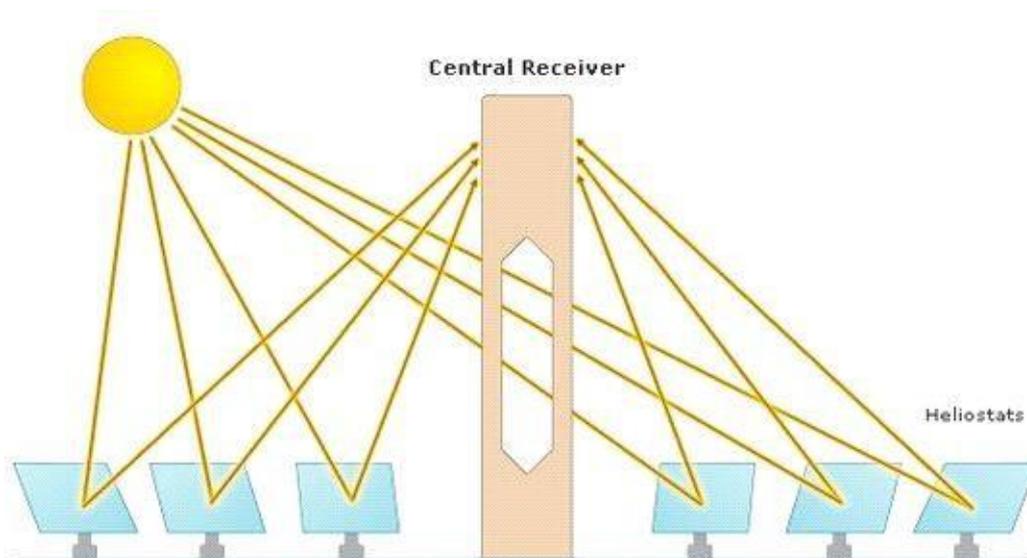


Figure II.2 : Principe de fonctionnement un système solaire thermodynamique.

II.4.3 Le solaire photovoltaïque :

Cette technologie convertit directement l'énergie solaire en électricité Comme le montre la figure II.3. Le matériau des capteurs, souvent à base de silicium (Si), est un semi-conducteur : il peut être soit isolant, soit conducteur, selon les conditions dans lesquelles on le place. Les photons vont exciter des électrons dans ce matériau, en leur transférant une partie de leur énergie et en les rendant mobiles. Ces électrons mis en mouvement vont ainsi produire un courant continu, pouvant alimenter un réseau électrique. Un onduleur convertit ce courant continu en courant alternatif, qui pourra être utilisé par des appareils électriques (électroménagers etc.). [17]

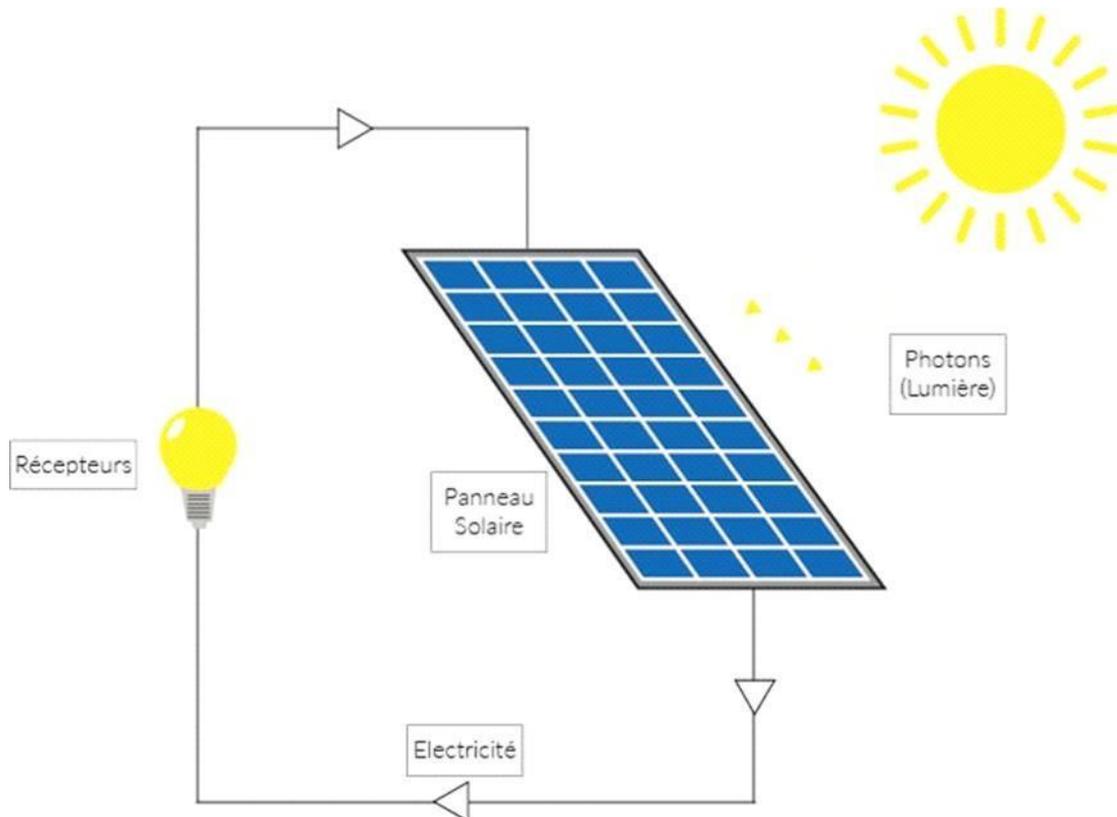


Figure II.3 : Schéma Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque.

II.5 Rayonnement solaire incident :

II.5.1 Constante solaire :

Fraction de l'énergie émise au total par le Soleil qui parvient jusqu'à notre planète. Cette constante solaire s'exprime en $W.m^{-2}$ puisqu'il s'agit d'une énergie qui parvient par surface donc par unité de surface notamment à la Terre (mais ce serait aussi valable pour toutes les autres planètes et tout corps qui se trouve à proximité du Soleil). La constante solaire est de l'ordre de $1370 W/m^2$ mais cette énergie se répartit en réalité sur la Terre qui est une sphère et non pas un disque qui intercepterait les rayons du Soleil.

En réalité cette énergie qui arrive à la surface de l'atmosphère ne va pas parvenir jusqu'à la surface de la Terre. Une partie de cette énergie est perdue lors de son trajet entre la surface de l'atmosphère (plusieurs centaines de kilomètres d'altitude) et la surface de la Terre. [18]

II.5.2 Albédo :

Proportion de l'énergie renvoyée, réfléchi par rapport à l'énergie reçue. Elle s'exprime le plus souvent en pourcentage. On va dire qu'une surface renvoie par exemple 50 % de l'énergie qu'elle reçoit, cela signifie que les 50 autres pourcents sont absorbés par cette surface.

L'albédo d'une surface dépend :

- De la couleur, c'est-à-dire de la nature de cette surface ;
- De la façon dont l'énergie parvient à cette surface, on parle d'angle d'incidence ;
- De la température, c'est-à-dire qu'en fonction de la température terrestre, l'albédo varie.

[18]

II.6 Les rayons solaires :

Les rayons solaires sont classés en fonction de leur longueur d'onde : les ondes courtes et les ondes longues. Plus un rayon est long plus il pénètre profondément dans la peau et plus il l'endommage.

Les rayons à ondes courtes comprennent notamment les rayons X, rayons bêta, rayons UVC et les rayons gamma. Ces rayons sont extrêmement dangereux, mais heureusement ils sont arrêtés par l'atmosphère de la terre, et notamment par la couche d'ozone. [19]

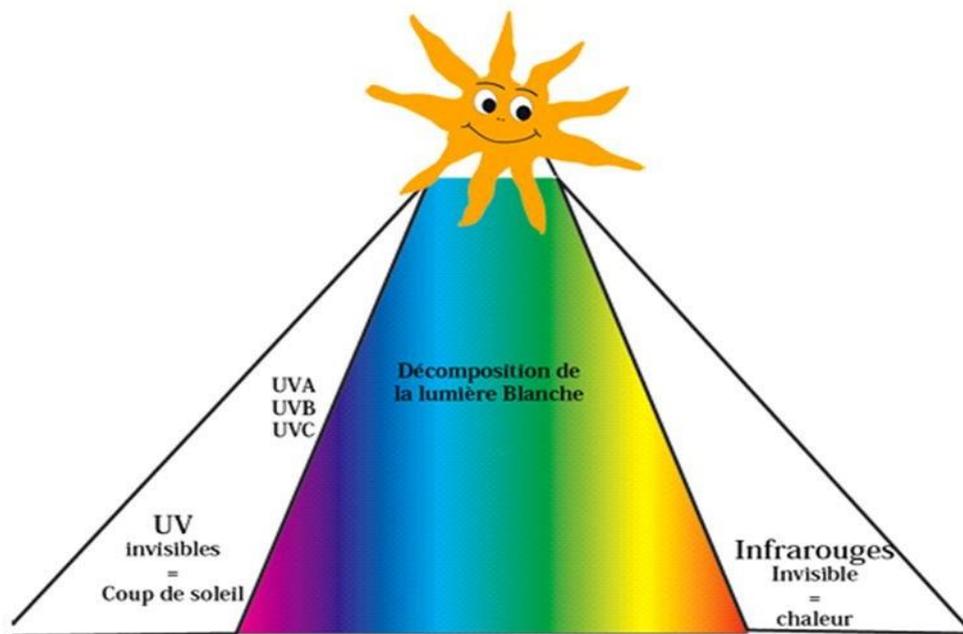


Figure II.4 : Les différentes sortes de rayons solaires.

Les rayons à ondes longues qui parviennent à la surface de la terre sont principalement :

- 10% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- 40% dans la bande visibles (0.4 à $0.8\mu\text{m}$).
- 50% dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$). [20]

C'est ce que montre La figure II.5 :

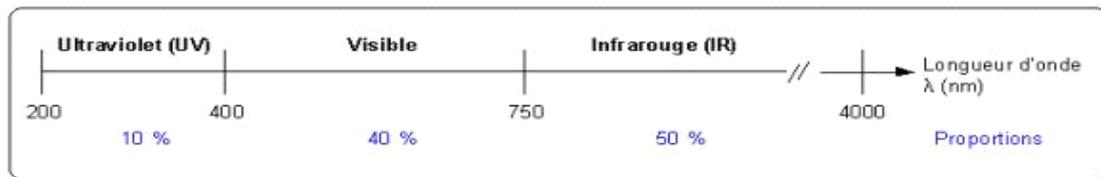


Figure II.5 : Les rayons solaires.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ selon la relation :

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad 13$$

Avec E_f : Est l'énergie du photon.

h : Est la constante de Planck.

c/λ : La fréquence (en hertz) de l'onde électromagnétique.

II.7 Le photovoltaïque :

II.7.1 Définition :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité. [21]

II.7.2 Principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques :

Comprendre le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque est essentiel lorsque l'on souhaite recourir à cette technologie. Le module solaire photovoltaïque est un système capable de capter l'énergie envoyée par le soleil vers la Terre, et de la convertir en courant

électrique continu. Il existe également des équipements qui produisent de l'eau chaude à partir de l'énergie solaire.

Le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque repose sur plusieurs éléments :

- Un module composé de cellules photovoltaïques transformant l'énergie en tension électrique continue.
- Un système de montage, également appelé système d'intégration à la toiture qui ancre le panneau photovoltaïque au bâti ;
- Un abriement qui établit une jonction étanche entre le panneau et le reste de la toiture.

À cela s'ajoutent les équipements électriques, et en particulier l'onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif et permet d'alimenter votre maison, ou le réseau public de distribution d'électricité. Le prix d'achat d'un panneau solaire photovoltaïque reste élevé, mais baisse d'année en année. De plus, des aides financières sont disponibles afin de vous aider à assumer le coût de départ. [21]

II.7.3 Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques capables de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, et ceci grâce à l'effet photovoltaïque. Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique. Le matériau semi-conducteur le plus massivement employé à l'heure actuelle par les fabricants de modules photovoltaïques demeure le silicium. [22]

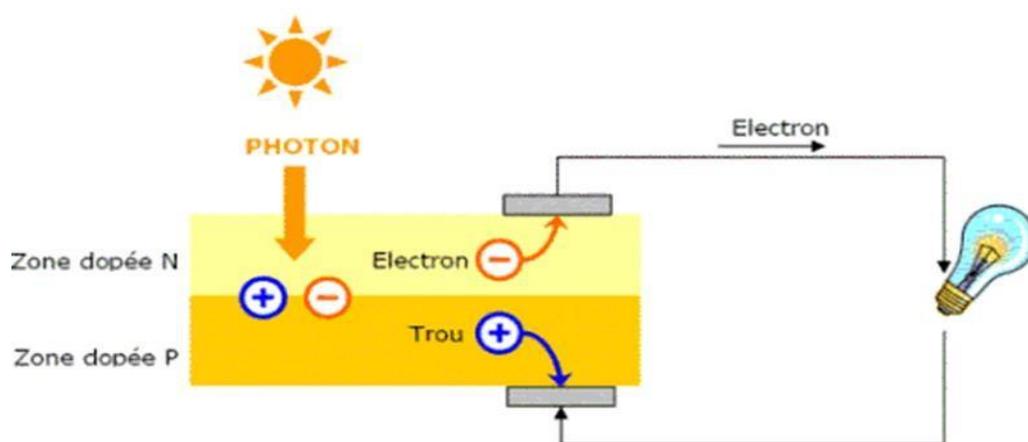


Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

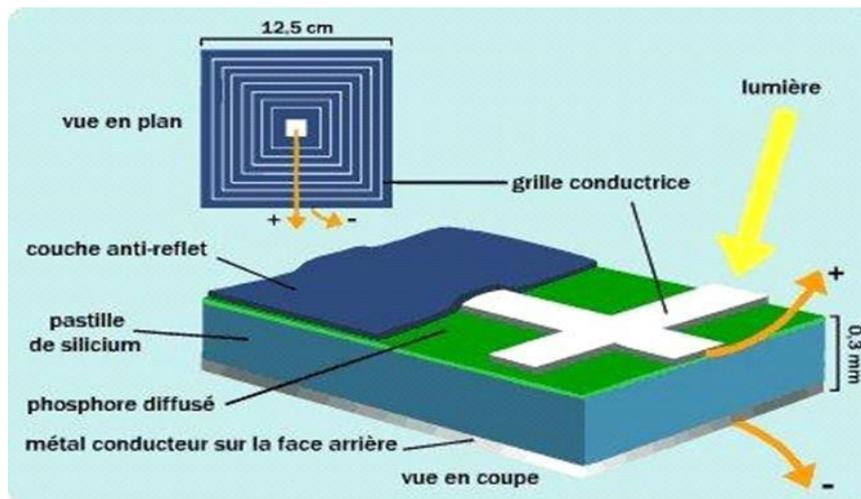


Figure II.7 : Les composants d'une cellule PV.

La matière première du photovoltaïque est le silicium. Ajoutons à cela :

- 1-des cellules
- 2-des panneaux photovoltaïques (un système de montage)
- 3-des câbles
- 4-un onduleur
- 5-un compteur

II.7.4 Module photovoltaïque :

Un module solaire photovoltaïque (ou panneau solaire photovoltaïque) est un panneau constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement. Quand le courant demandé est trop élevé, la tension délivrée par le module diminue comme le montre la courbe caractéristique suivante (Figure II.8) :

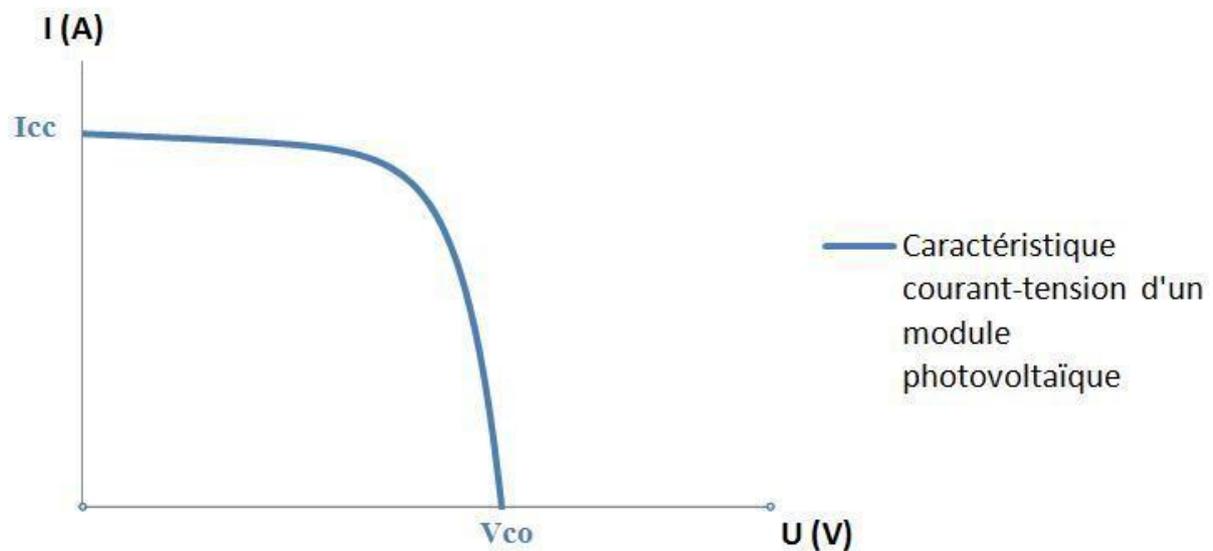


Figure II.8 : Courbe caractéristique du module photovoltaïque.

Paramètres de calcul :

- Energie électrique consommée : $W = P_a * t$ en (J) 14
- Rendement utile : $\eta_u = PCI * \frac{V}{P_{ab} * t} * \rho$ 15
- Rendement solaire $\eta_{solaire} = PCI * \rho * \frac{V}{P_{generateur} * t}$ 16
- Avec la puissance du générateur : $P_{générateur} = U_{nom} * I_{nom}$ 17
- Energie consommée par unité de volume : $W/V = P_{ab} * t / V = P_{ab} / Q$ (J/cm³) 18
- $W/V = P_{ab} * t * 22.4 / V$ (KJ/mol) 19
- Avec : P en watts, t en seconde et V en cm³ [30]

II.7.5 Le rendement d'un panneau photovoltaïque :

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance lumineuse qui tombe sur la cellule. Pour définir celui-ci, les cellules, rassemblées en modules puis en panneaux, sont étalonnées en étant placées face à un simulateur solaire, qui reproduit les conditions optimales : un ensoleillement de 1 000 W de lumière par mètre carré, une température ambiante de 25° C. La puissance électrique créée, dite puissance crête, est un pourcentage de la puissance solaire reçue. Si un panneau d'1 m² produit une puissance électrique de 200 W, son rendement sera de 20 %. Le rendement de ce type de cellules ne peut pas dépasser une limite théorique d'environ 33%, appelé « limite de Shockley-Queisser ».

Le rendement d'un panneau solaire s'exprime en pourcentage. Il est différent de la puissance d'un panneau solaire, qui s'exprime en watts-crêtes et qui est la puissance maximale de production électrique qu'un panneau peut délivrer.

Pour calculer le rendement d'un panneau solaire, il faut prendre en compte sa définition. La formule à utiliser est la suivante :

Rendement = Puissance électrique produite / Puissance solaire reçue. [22]

II.8 Les avantages des panneaux solaires photovoltaïques

- ✓ Vous pouvez gagner jusqu'à 1.800 € par an pendant 20 ans en vendant la totalité de votre production d'électricité.
- ✓ Vous pouvez choisir de consommer directement l'électricité que vous produisez, et ce gratuitement !
- ✓ Vous respectez l'environnement avec une électricité propre : l'énergie solaire est disponible gratuitement et durablement.
- ✓ Installation simple.
- ✓ Aucun bruit.
- ✓ L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.
- ✓ Les panneaux solaires, une fois installés, demandent très peu d'entretien et l'énergie est produite sans action de l'homme...
- ✓ Les panneaux solaires peuvent représenter un très bon investissement pour des particuliers.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est renouvelable. [23] [24]

II.9 Les inconvénient des panneaux solaires photovoltaïques

- ✓ Prix : l'installation de 1 m² de panneaux solaires photovoltaïques coute environ 1000 euros
- ✓ Durée de vie restreinte par rapport au prix.
- ✓ Une production d'énergie irrégulière, à cause du temps. Les panneaux
- ✓ Produisent beaucoup l'été mais les besoins sont faibles. Au contraire, la production d'énergie en hiver est plus faible alors que les besoins sont élevés.
- ✓ L'énergie solaire ne produit qu'en journée et en fonction de la météo, et non en fonction des besoins énergétiques. Il faut donc investir dans des moyens de stockage de l'énergie qui coûtent très cher.
- ✓ Un panneau solaire a une durée de vie de 25 ans environ, au-delà, les rendements diminuent rapidement. De plus, pour récupérer le cout [23] [24]

Conclusion :

L'énergie solaire Cest une énergie renouvelable propre et efficace qui va se développer de plus en plus doit être au cœur du programme de développement des énergies renouvelables, c'est parce qu'elle reste insuffisamment exploitée. Ainsi, doit dynamiser le marché des ENR.

L'électricité produite par Cette énergie respecte globalement l'environnement grâce à sa faible émission de CO₂ et participe à la réduction de l'effet de serre, Ils ont l'air d'être un bon partenaire pour l'hydrogène sur tout avec la nouvelle technologie plus sûre est polyvalent électricité, chaleur et hydrogène.

Chapitre III

**Simulation de Production de
l'hydrogène à partir l'énergie
photovoltaïque à l'aide de logiciel
TRNSYS**

III.1 Introduction :

Après avoir parcouru dans les précédents chapitres les aspects liés à l'hydrogène vecteur d'énergie propre ainsi que ceux liés à l'énergie solaire. Il s'avère que la production d'hydrogène. A partir de l'électrolyse alcaline de l'eau est des plus prometteuse, en particulier lorsque l'énergie fournie à l'électrolyseur est d'origine solaire. En effet, les électrolyseurs alcalins sont caractérisés par une technologie maîtrisée, moins coûteuse et largement utilisée à l'échelle industrielle, comparés à la technologie PEM qui reste au stade de développement et qui présente des inconvénients de taille lorsqu'il s'agit de la durée de vie des membranes et de leurs coûts.

Dans ce chapitre sera présentée la configuration du système de production de l'hydrogène à partir de solaire. La simulation horaire sera faite, Elle utilise la bibliothèque HYDROGEMS du logiciel TRNSYS, particulièrement adapté à l'étude des systèmes énergétiques dépendants du temps. Les résultats des simulations seront présentés et discutés.

III.2 DESCRIPTION DE LOGICIEL TRNSYS :

TRNSYS est un environnement logiciel graphique extrêmement flexible utilisé pour simuler le comportement de systèmes transitoires. Alors que la grande majorité des simulations sont axées sur l'évaluation des performances des systèmes d'énergie thermique et électrique, TRNSYS peut également être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que les flux de trafic ou les processus biologiques.

TRNSYS est composé de deux parties. Le premier est un moteur (appelé noyau) qui lit et traite le fichier d'entrée, résout le système de manière itérative, détermine la convergence et trace les variables système. Le noyau fournit également des utilitaires qui (entre autres) déterminent les propriétés thermo physiques, inversent les matrices, exécutent des régressions linéaires et interpolent les fichiers de données externes. La deuxième partie de TRNSYS est une vaste bibliothèque de composants, chacun modélisant les performances d'une partie du système. La bibliothèque standard comprend environ 150 modèles allant des pompes aux bâtiments multizones, des éoliennes aux électrolyseurs, des processeurs de données météorologiques aux routines économiques, et des équipements CVC de base aux technologies émergentes de pointe. Les modèles sont construits de telle manière que les utilisateurs peuvent modifier les composants existants ou écrire les leurs, étendant les capacités de l'environnement.

Après 35 ans de disponibilité commerciale, TRNSYS continue d'être un progiciel flexible basé sur des composants qui répond aux besoins en constante évolution des chercheurs et des praticiens de la communauté de la simulation énergétique.

III.3 Système de production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire

Photovoltaïque :

Le système de production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau alimenté par un système de conversion de l'énergie solaire, est constitué essentiellement d'un panneau solaire, un électrolyseur et un réservoir de stockage.

La figure III.1 représente le système proposé dans notre étude. Celui-ci est constitué de :

- Un panneau solaire produisant de l'énergie électrique.
- Un convertisseur DC/DC qui permet la conversion de la puissance de photovoltaïque nécessaire pour l'alimentation de l'électrolyseur.
- Un électrolyseur alcalin qui permet la production de l'hydrogène.
- Un réservoir de stockage de l'hydrogène produit.

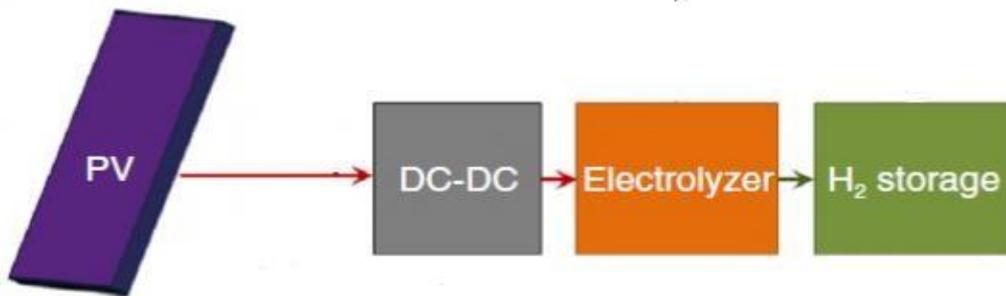


Figure III.1 : Système de production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire.

III.4 Configuration du système de production d'hydrogène par TRNSYS

La figure III.2 représente la configuration de notre système par le logiciel TRNSYS. Le Type 109TMY2 est la composante responsable de la lecture du fichier de données météorologique.

Le Type 57 permet conversion des variables utilisées, Le modèle TYPE180 est principalement destiné aux panneaux photovoltaïques constitués de cellules en silicium qui

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

permettent la production de l'électricité. Le type 100 permet de manager les différents systèmes. L'énergie est convertie à partir de TYPE175 le composant qui représente le Convertisseur de puissance. L'hydrogène est produit via le TYPE160 Qui est un modèle d'un électrolyseur à eau alcaline haute pression. L'hydrogène produit par l'électrolyseur est stoker dans un réservoir d'hydrogène Type 164b, Les variables et les résultats de la simulation sont affichées via TYPE65c

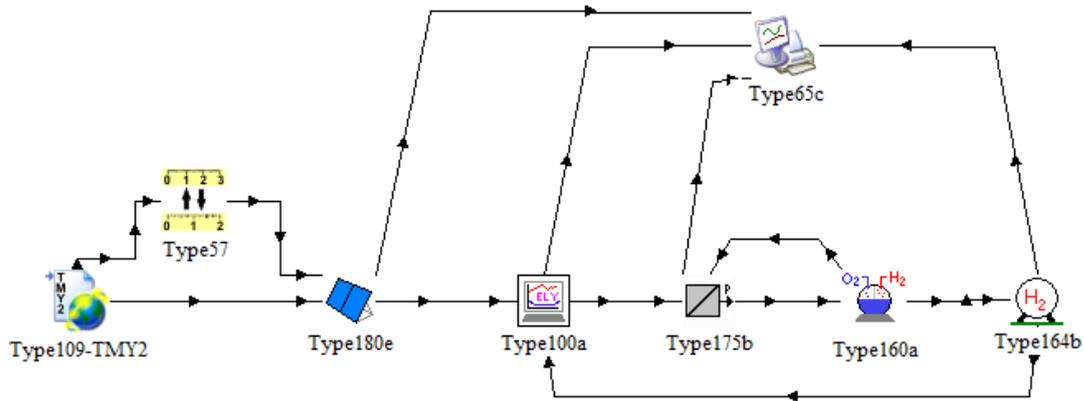


Figure III.2 : modèle de la production de l'hydrogène solaire sur TRNSYS.

Le descriptif des modules TRNSYS utilisés pour la configuration de notre système est donné sur le tableau III.1 :

TYPE	DISCRIPTION
Type 109•TMY2	Ce composant a pour objectif principal de lire les données météorologiques à intervalles de temps réguliers à partir d'un fichier de données, de les convertir en un système d'unités souhaité et de traiter les données de rayonnement solaire pour obtenir un rayonnement de surface incliné et un angle d'incidence pour un nombre arbitraire de surfaces.
Type 57	Pour accommoder les utilisateurs habitués à travailler avec des unités anglaises, une routine de conversion d'unité TYPE 57 est fournie. Les utilisateurs doivent décrire le type et les unités de la variable entrante (température et C par exemple) et les unités de grandeur de sortie souhaitées (F par exemple) à l'aide des tableaux fournis à la fin de la documentation technique de ce composant. La routine de conversion vérifie l'entrée pour s'assurer qu'elle est du

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

	type de variable et des unités corrects, effectue la conversion d'unité, fournissant le nouveau type de sortie et les unités à toutes les unités en fonction de cette sortie.
Type 180e	TYPE180 est un modèle mathématique pour un générateur photovoltaïque (PV), basé sur un circuit équivalent d'un modèle à une diode. Le modèle est principalement destiné aux panneaux photovoltaïques constitués de cellules en silicium, mais peut également être utilisé pour d'autres types de matériaux. Le modèle électrique utilisé dans est décrit dans (Ruffié et Beckmann, 1991). Un modèle thermique dynamique a également été inclus (Cullberg, 1997 ; 1998). Dans ce cas de Type180, le générateur photovoltaïque est supposé inclure un traqueur de point de puissance maximale. La température du générateur PV est calculée sur la base d'un coefficient de perte de chaleur global (UL) et de la capacité thermique (CT) du générateur PV (généralement déterminée à partir d'expériences).
Type 100a	Ce sous-programme est un regroupement d'un ensemble de fonctions de commande pour un électrolyseur d'un système intégré éolien / électrolyseur / stockage H2 / pile à combustible connecté à un mini-réseau. Dans ce cas, l'électrolyseur est conçu pour fonctionner dans un mode de puissance variable.
Type 175b	TYPE175 est un modèle mathématique pour une unité de conditionnement de puissance. Le modèle est basé sur des courbes d'efficacité empiriques pour les convertisseurs électriques (DC / DC) ou les onduleurs (DC / AC ou AC / DC). La relation empirique utilisée dans TYPE175 a été proposée pour la première fois par (Laukamp, 1988) et améliorée par (Ulleberg, 1998). Dans ce cas de Type175, on suppose que la puissance de sortie requise est connue. La puissance entrée correspondent est. calculée.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

Type 160a	<p>TYPE160 est un modèle mathématique pour un électrolyseur à eau alcaline haute pression. Le modèle est basé sur une combinaison de thermodynamique fondamentale, de théorie du transfert de chaleur et de relations électrochimiques empiriques.</p> <p>Un modèle thermique dynamique est également inclus. Une courbe courant-tension dépendant de la température pour une pression donnée et une relation d'efficacité de Faraday indépendante de la température et de la pression forment la base du modèle électrochimique. La température de l'électrolyseur peut être donnée en entrée ou calculée à partir d'un modèle thermique simple ou détaillé (Ulleberg, 1998; 2001). Cette instance de Type160 demande à l'utilisateur de fournir la température de l'électrolyseur en tant qu'entrée (TMODE 1).</p>
Type 65c	<p>Le composant graphique en ligne est utilisé pour afficher les variables système sélectionnées au cours de la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations variables précieuses et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas comme souhaité. Les variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre de tracé distincte à l'écran. Dans cette instance du traceur en ligne Type65, les données envoyées au traceur en ligne sont automatiquement imprimées, une fois par pas de temps dans un fichier externe défini par l'utilisateur. Les descripteurs d'unité (kJ / h, kg / s, degC, etc.) ne sont PAS imprimés dans le fichier de sortie.</p>
TYPE164b	<p>TYPE164 est un modèle de stockage de gaz comprimé. Cette instance du modèle calcule la pression dans le stockage en se basant sur l'équation d'état de van der Waals pour les gaz réels (Çengel et Boles, 1989 ; Ulleberg, 1998).</p>

Tableau III.1 : Le modèle de notre système.

III.4.1 Le Contrôleur (TYPE 100a) :

Le contrôleur est utilisé dans ce modèle est une version modifiée de celle proposée par TRANSYS, cette modification fait fonctionner l'électrolyseur directement avec la puissance fournie par le panneau solaire.

III.4.2 Le Convertisseur de puissance (type 175) :

Le convertisseur de puissance utilisé (type 175) est un modèle mathématique basé sur une courbe de performance empirique pour un convertisseur de puissance électrique DC / DC ou un transformateur DC / AC ou AC DC.

III.4.3 L'électrolyseur :

Le modèle est basé sur une combinaison de lois pures de la thermodynamique, du transfert de chaleur et de l'expression empirique électrochimique. Un modèle thermique est également inclus.

Une équation de tension actuelle dépendant de la température est utilisée, cette équation est conçue pour l'électrolyseur alcalin Advanced Technologies. L'équation caractéristique de l'électrolyseur est donnée comme suit.

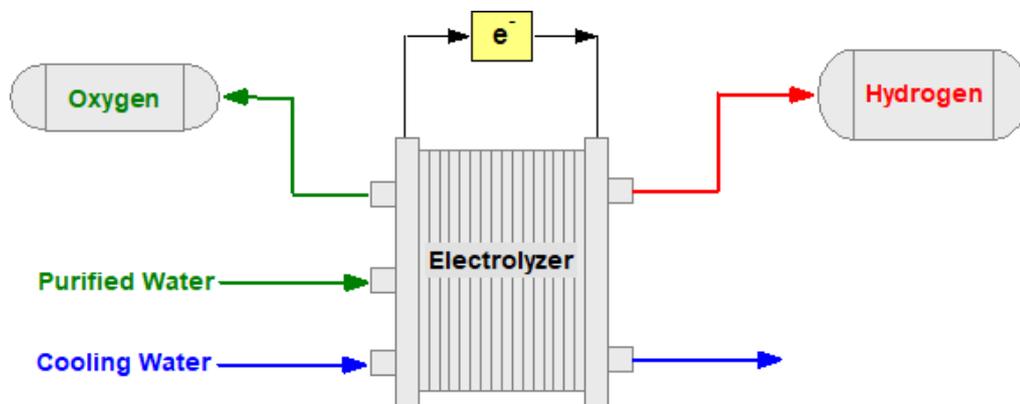


Figure III.3 : électrolyseur de type alcalin

Pour le modelé d'électrolyseur, nous avons choisi le mode 1.

III.5 Production d'hydrogène :

La production de gaz de l'électrolyseur est calculée à partir des mesures de la pression dans la cuve de stockage et de la température ambiante. Le rendement faradique est calculé grâce à l'équation ci-dessus, en réalisant des essais à intensité de courant constante. Les caractéristiques électriques d'un électrolyseur sont déterminées par sa technologie, le nombre de cellules en série (tension) et par la taille de la surface active (densité de courant). [31] [32]

$$\eta_f = \left[\frac{(I \text{ density})^2}{a1 + (I \text{ density})^2} \right] \cdot a_2 \quad 20$$

Avec a : L'intensité du courant (mA/cm).

Le rendement énergétique ou rendement potentiel des cellules d'un électrolyseur est le rapport de l'énergie globale mise en jeu sur l'énergie consommée. Il se calcule simplement en divisant le potentiel thermo-neutre par la tension de la cellule.

$$\eta_e = \frac{U_{th}}{U_{cell}} \quad 21$$

Avec U_{cell} : tension de cellule, V.

U_{in} : potentiel thermo-neutre, V.

Le rendement énergétique d'une cellule d'électrolyse diminue lorsque la tension augmente, ce qui correspond à la tension maximale d'une cellule (cas des électrolyseurs alcalins avancés). Il est évident que pour améliorer le rendement de cellule, il suffit de diminuer la tension et augmenter le courant.

La formule de taux de production de l'hydrogène.

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{\rho_{std}} 3600 \quad 22$$

Avec : ρ_{STD} : masse volumique standard.

n_{H_2} : Nombre de mol.

Selon la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule d'électrolyseur est

directement proportionnel au taux de transfert des électrons aux électrodes, qui à son tour est équivalent au courant électrique dans le circuit externe. Par conséquent, la vitesse de production totale d'hydrogène dans un électrolyseur, qui se compose de plusieurs cellules connectées en série, peut être exprimée comme suit :

Production d'hydrogène :

$$n_{H_2} = \eta_f \cdot N_{cell} \cdot \frac{I_{ely}}{n \cdot F} \quad 23$$

$$\rho_{STD} = P_{std} \cdot \frac{100000}{R_{gaz} \cdot (T_{std} + 273.15)} \quad 24$$

Avec : p_{std} : pression standard.

III.6 Simulation et résultats :

III.6.1 Choix des sites :

La production d'hydrogène dépend des ressources solaires disponible (Rayonnement global et Température), la position géographique et en particulier.

La latitude du lieu va permettre de déterminer l'angle d'incidence du panneau photovoltaïque, angle d'incident c'étant égal à la latitude du lieu.

Dans cette simulation nous avons choisis le site de Tamanrasset et Dar El Beida(Alger) à cause de la disponibilité des données.

Ville	Latitude	longitude	Altitude	Albédo
Alger (Dar el Beida)	36.43	+3.15	25	0.2
Tamanrasset	22.47	+5.31	1378	0.35

Tableau III.2 : Position géographique des sites.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

- 1 Tamanrasset est située au sud, à environ 2000 km d'Alger. Elle est bordée au nord par la wilaya de Ghardaïa et d'Ouargla, et à l'est par la wilaya d'Illizi, à l'ouest par la wilaya d'Adrar, et au sud par l'État du Niger et l'État du Mali, et c'est la plus grande des provinces en superficie et bien qu'elle soit située au cœur du désert et son climat est principalement modéré en raison de son relief montagneux et modéré. Il est situé à une altitude de 1400 mètres au-dessus du niveau de la mer.
- 2 La ville de Dar El Beida est située au sud-est d'Alger, à environ 15 km au sud-est d'Alger. Il est bordé au nord par Burj el Kifas et Bab Ezzouar, à l'est par la wilaya de Boumerdès, à l'ouest par Wadi As-Samar, et au sud par la wilaya de Blida, où il est situé à une altitude de 17 mètres au-dessus du niveau de la mer.

III.6.2 Les données d'entrées :

Nous avons pris les données d'entrée d'un logiciel METEONORM (Le logiciel contient une base de données très exhaustive ainsi que des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe).

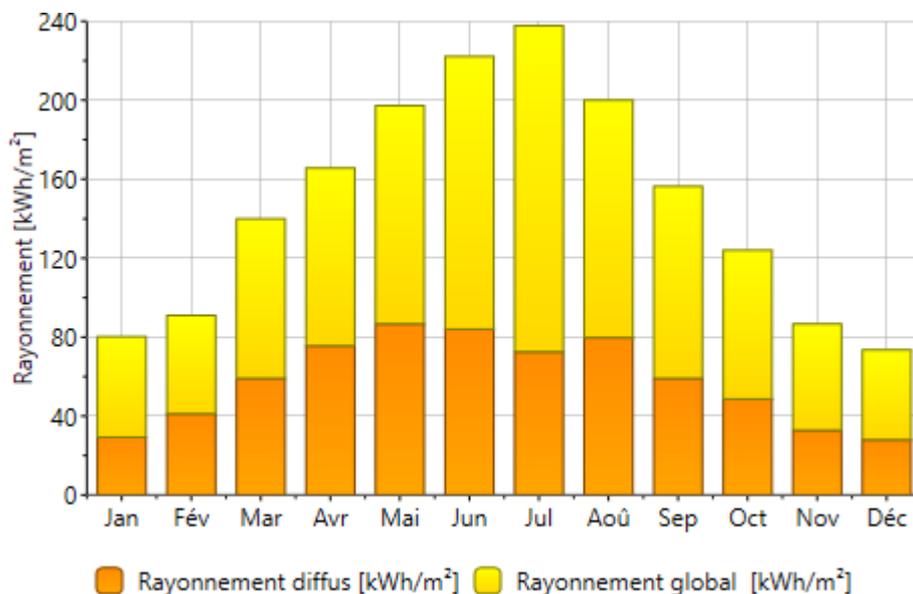


Figure III.4 : rayonnement solaire mensuel global et diffus de site d'Alger (Dar el Beida).

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

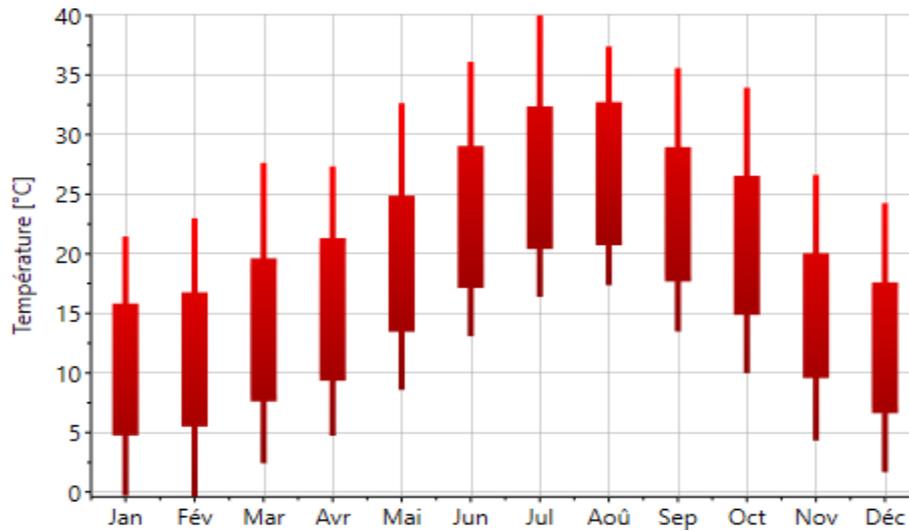


Figure III.5 : La Température mensuel de site d'Alger (Dar el Beida).

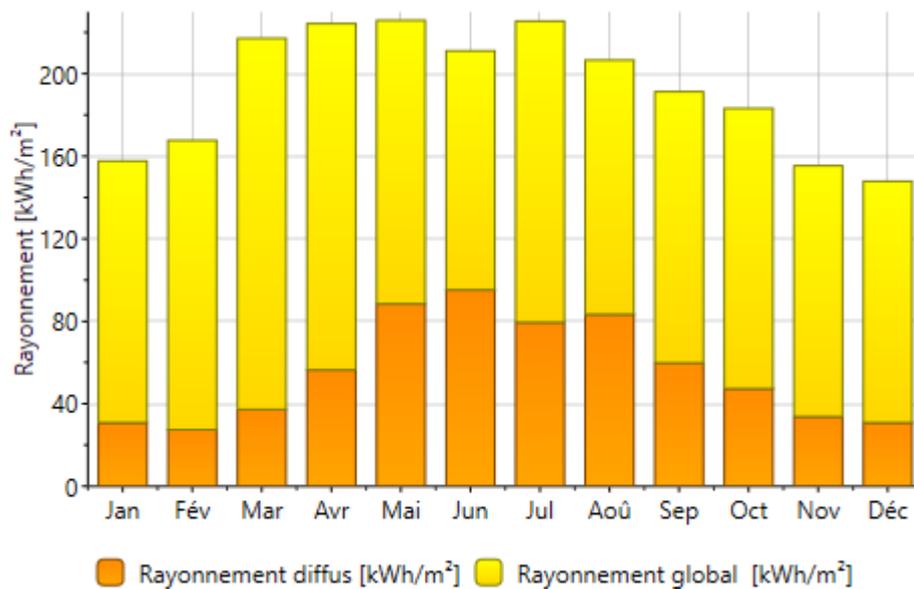


Figure III.6 : rayonnement solaire mensuel global et diffus de site Tamanrasset.

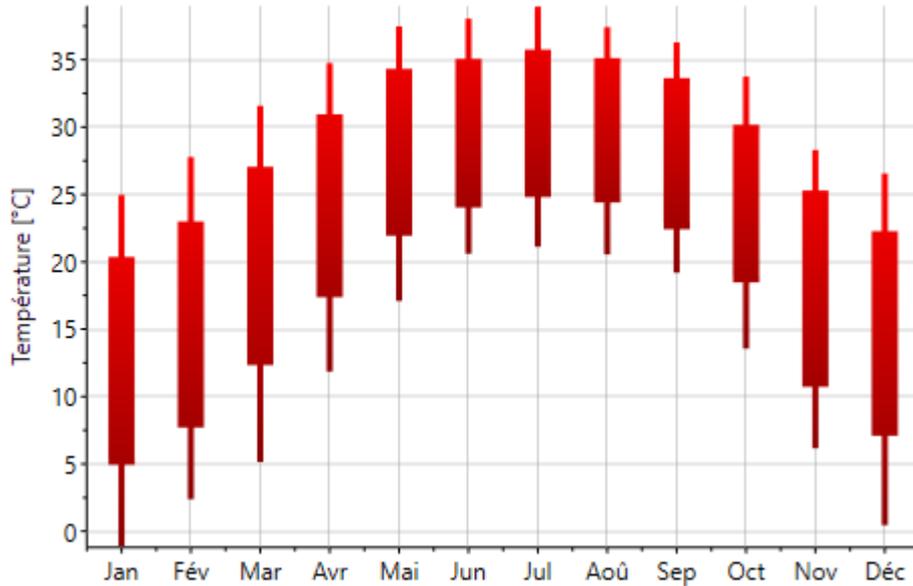


Figure III.7 : La Température mensuel de site Tamanrasset.

III.7 Dimensionnement du PV :

Nombre de cellules PV en série par module PV.	150
Nombre de modules PV en série dans le champ PV.	4
Nombre de modules PV en parallèle dans le champ.	40
Surface d'un seul module PV recouvert de cellules PV.	1.50 m ²

Tableau III.3 : Dimensionnement du PV.

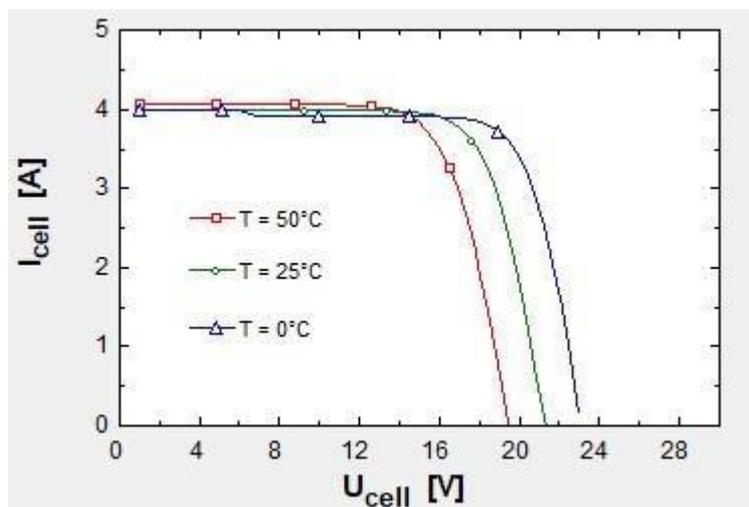


Figure III.8 : Courbe I-V d'un générateur photovoltaïque. [33]

Un panneau photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques.

En présence de soleil, chacune de ces cellules produit un courant I (en ampère A) et une tension U (en volt V).

III.8 Dimensionnement de l'électrolyseur :

Surface d'électrode.	0.25 m ²
Nombre de cellules en série par module.	21
Nombre de modules en parallèle.	1

Tableau III.4 : Dimensionnement du l'électrolyseur.

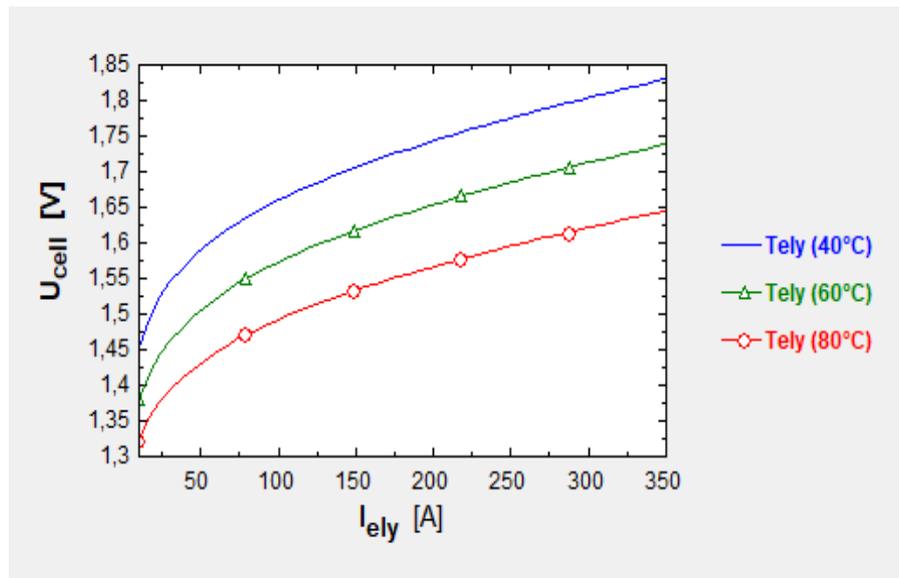


Figure III.9 : Les caractéristiques I-V de l'électrolyseur de type alcalin. [34]

La simulation est la résolution des équations, en tenant compte des paramètres des sites mais du fait que ces paramètres influent sur le rendement du système, il est important de les optimiser comme la température et la pression de l'électrolyseur qui devront être contrôler, dans cette simulation nous utilisons électrolyseur alcalin.

Un électrolyseur est constitué de plusieurs modules (stacks) disposés en série ou en parallèle.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

Chaque module est constitué de plusieurs cellules d'électrolyse disposées en série. En fonction du volume d'hydrogène qu'on veut produire, il est nécessaire d'optimiser notre électrolyseur.

Inversement, lorsqu'on sélectionne un générateur PV de puissance nominale donnée, il s'agit d'optimiser l'électrolyseur de façon à ce que toute l'énergie photovoltaïque fournie soit consommée dans notre électrolyseur. La puissance de fonctionnement de l'électrolyseur doit être inférieure ou égale à celle de panneau photovoltaïque.

Input	Valeur	Unité	Description
I_{ely}	500	A	courant électrique
P_{ely}	7	bar	Pression (constant)
T_{amb}	20	$^{\circ}C$	Température ambiante
$T_{cw.in}$	14.5	$^{\circ}C$	Cooling water inlet temperature (Température d'entrée de l'eau de refroidissement)
V_{cw}	0.58	Nm^3/hr	Cooling water flow rate (débit d'eau de refroidissement)

Tableau III.5 : les données d'entre de l'électrolyseur.

III.9 Dimensionnement du réservoir :

P mode	2	-	/
P max	200	bar	Pression maximale admissible
VOL	8	m³	Volume réel du réservoir sous pression
MOLAR	2.016	g/mol	Poids molaire du gaz
TCR	-240	c	Température critique du gaz
PCR	13.9	-	Pression critique du gaz

Tableau III.6 : Dimensionnement du réservoir.

III.10 Résultats :

Site de Dar el Beida :

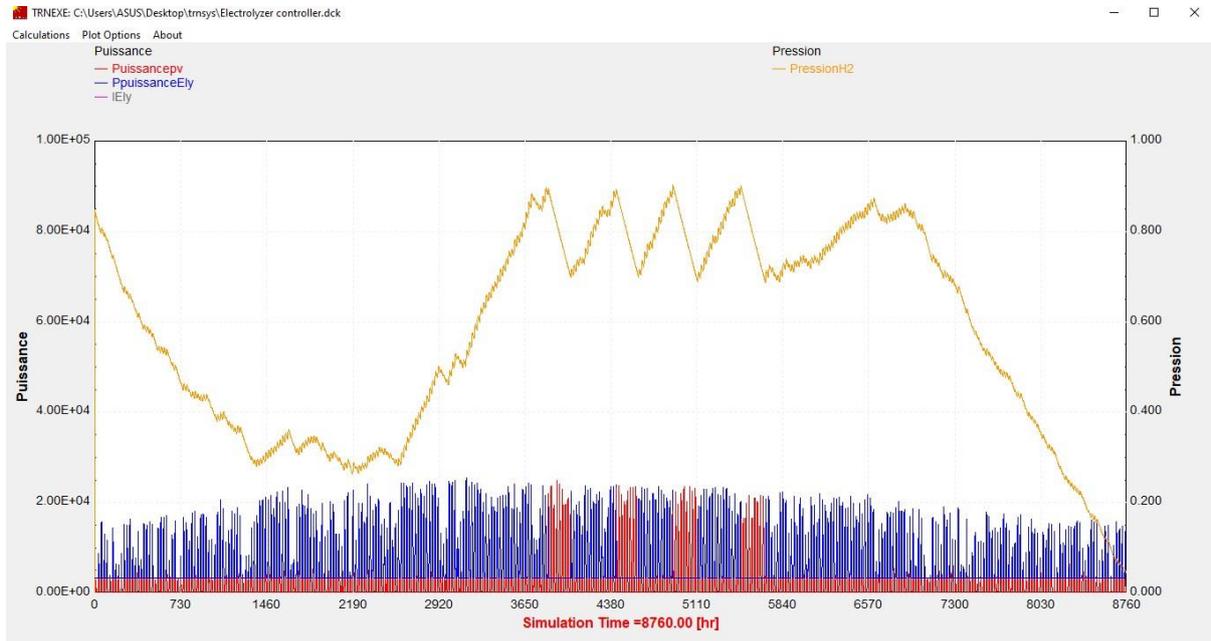


Figure III.10 : la puissance annuelle de PV et de l'Electrolyseur et Niveau de pression dans le réservoir d'hydrogène sur le site de Dar el Beida.

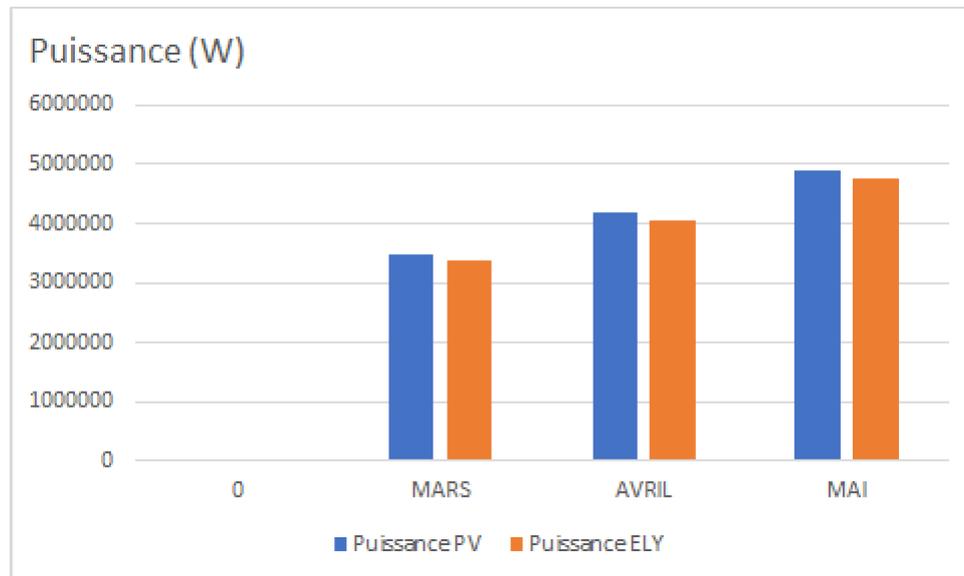


Figure III.11 : La puissance de PV et d'Electrolyseur au printemps sur le site de dar el Beida

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

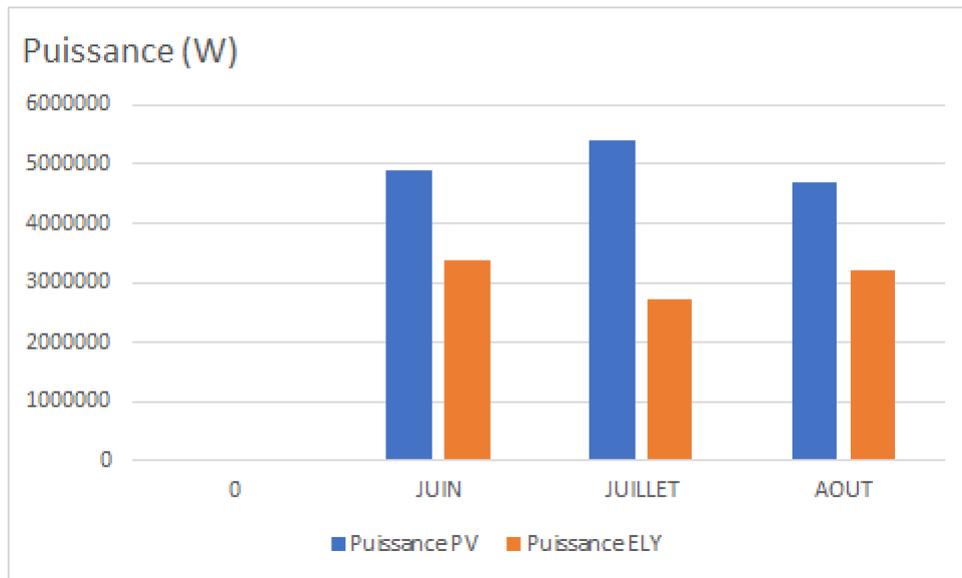


Figure III.12 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en été sur le site de dar el Beida

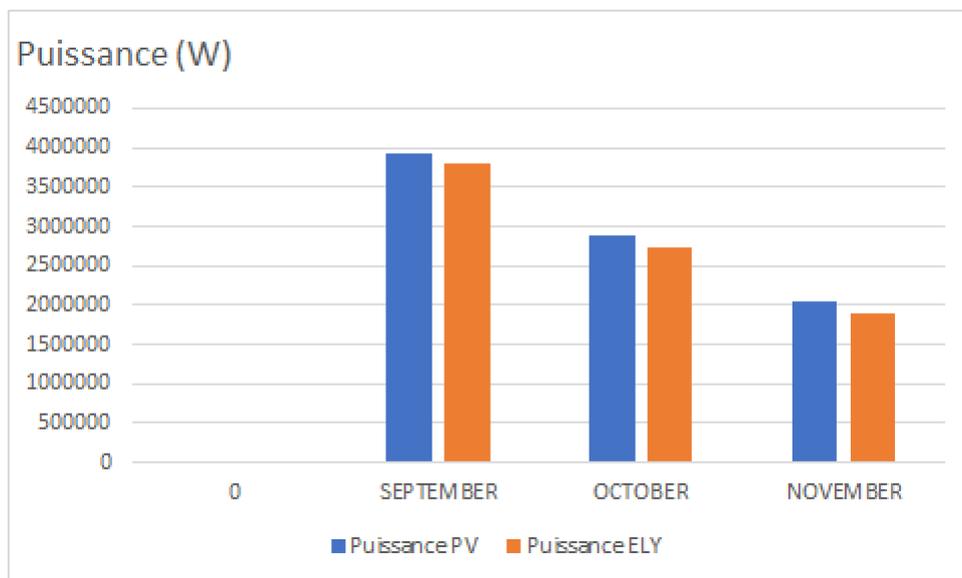


Figure III.13 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en L'automne sur le site de dar el Beida

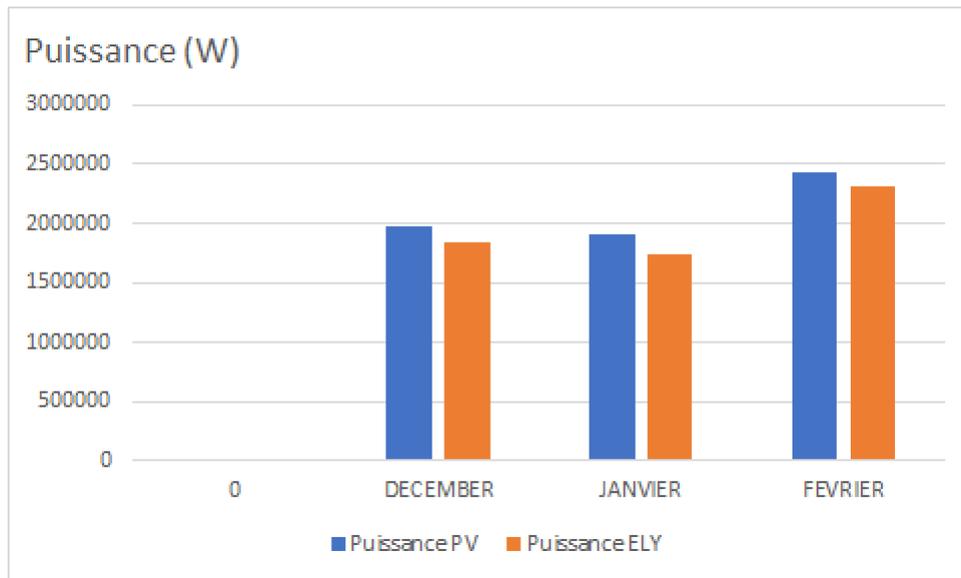


Figure III.14 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en Hiver sur le site de dar el Beida.

Les figures (III.11, III.12, III.13, III.14) représentent la puissance photovoltaïque saisonnière fournie et la puissance consommée par l'électrolyseur.

On remarque que la puissance qui est produite par le générateur PV est supérieure que la puissance qui est consommée par l'électrolyseur.

On remarque au printemps que le niveau de la puissance augmente constamment à partir du mois de mars, et que sa valeur 3.4MW(PV) et 3.3MW(Ely) jusqu'au mois de mai atteint sa valeur 4.7MW(PV) et 4.8 MW(Ely).

Alors qu'en été, le niveau de la puissance est plus élevé en juillet avec une valeur 5.4 MW pour la puissance photovoltaïque et le niveau le plus bas en août avec une valeur 4.6 MW. Quant à la puissance de l'électrolyseur, elle est plus élevée en un mois juin en valeur 3.3MW et le niveau le plus bas d'une valeur 2.7MW de juillet, est dû à la raison de l'état de charge élevé du réservoir, où le contrôleur réduit la puissance. Le travail de l'électrolyseur pour réduire la production d'hydrogène.

Au semestre d'automne, nous remarquons que le niveau de la puissance est dans l'ordre décroissant où la valeur de la puissance la plus élevée est au mois de septembre avec une valeur 3.9MW (PV) et 3.8MW(Ely), tandis que la valeur la plus basse est au mois de novembre avec une valeur 2MW(PV) et 1.9MW(Ely).

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

Quant à la saison d'hiver, le niveau de la puissance est plus élevé au mois de février d'une valeur 2.4MW (PV) et 2.3MW, alors qu'il est le plus bas au mois de janvier d'une valeur 1.9MW(PV) et 1.7MW(Ely).

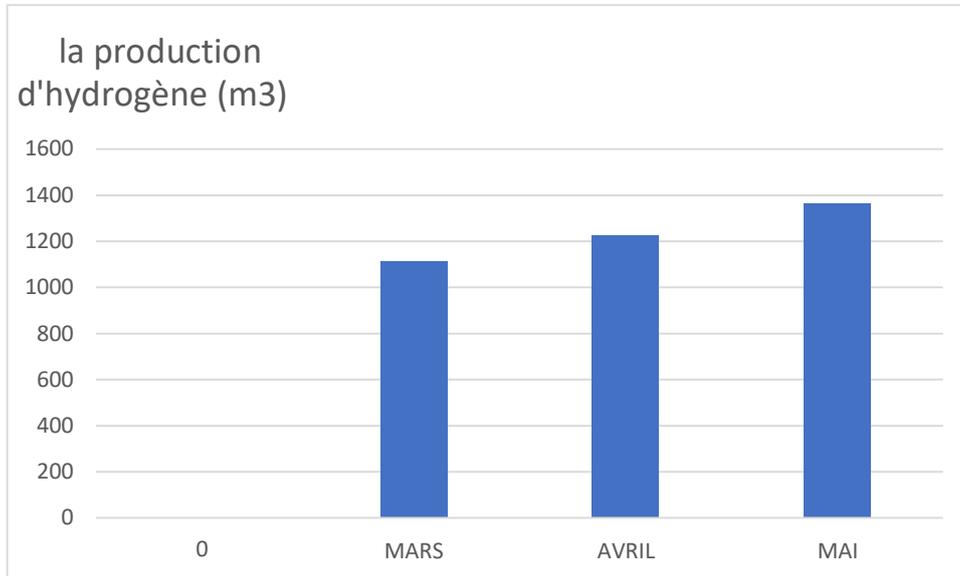


Figure III.15 : la production d'Hydrogène au printemps sur le site de dar el Beida.

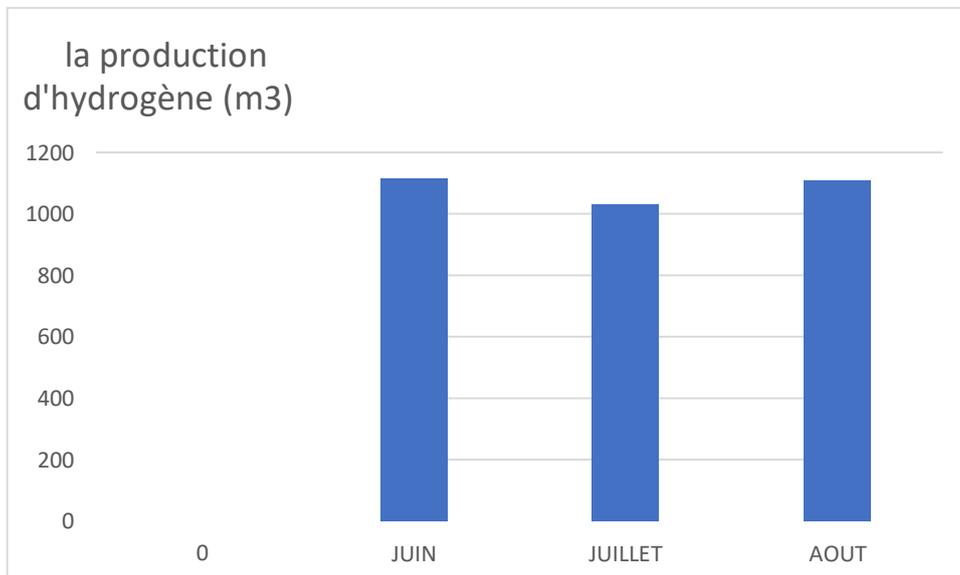


Figure III.16 : La production d'Hydrogène en été sur le site de dar el Beida.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

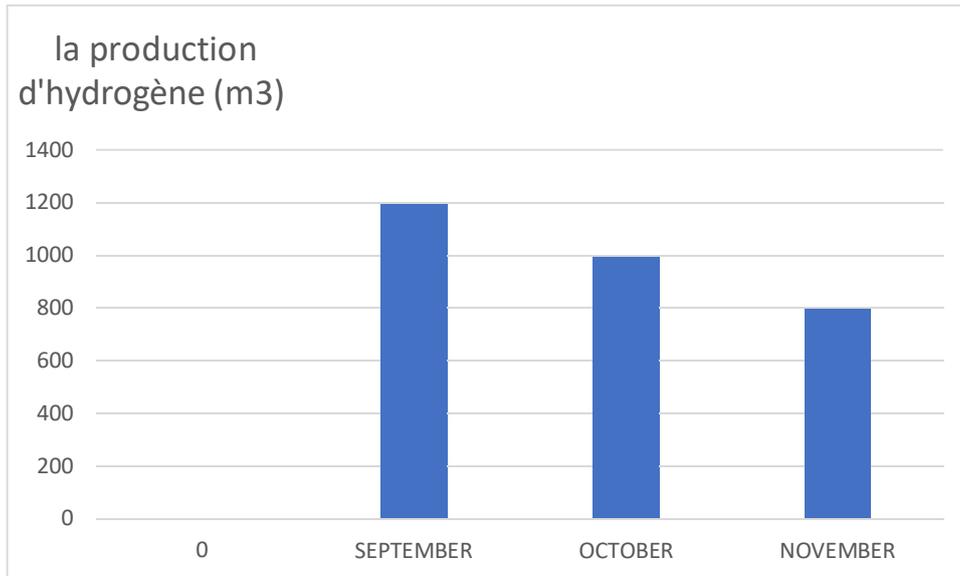


Figure III.17 : La production d'Hydrogène en L'automne sur le site de dar el Beida.

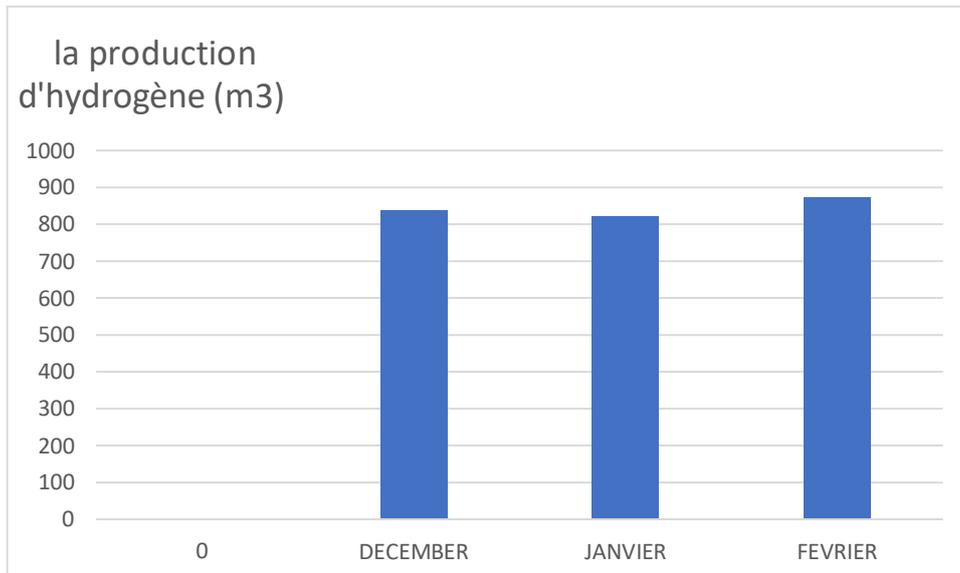


Figure III.18 : La production d'Hydrogène en Hiver sur le site de dar el Beida.

Les figures (III.15, III.16, III.17, III.18) représentent le taux de la production saisonnier d'hydrogène.

On remarque au printemps que le taux de production d'hydrogène est en ordre croissant, où la valeur la plus élevée est de 1365(m³/h) en mai, tandis que la valeur la plus basse est de 1113(m³/h) en mars.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

Alors que pour l'été, elle est considérée comme la saison d'hydrogène la plus productive, avec la valeur la plus élevée de 1113(m³/h) au mois de juin, tandis que la valeur la plus basse de 1106(m³/h) au mois d'août.

Quant à la saison d'automne, le taux de production d'hydrogène est en ordre décroissant, la valeur la plus élevée étant de 1177(m³/h) en septembre, tandis que la valeur la plus basse est de 827(m³/h) en novembre.

Au cours de la dernière saison, qui est l'hiver, elle est considérée comme la saison avec le moins de production d'hydrogène, car la valeur la plus élevée est de 872(m³/h) en février, tandis que la valeur la plus basse est de 820(m³/h) en janvier.

Site de Tamanrasset :

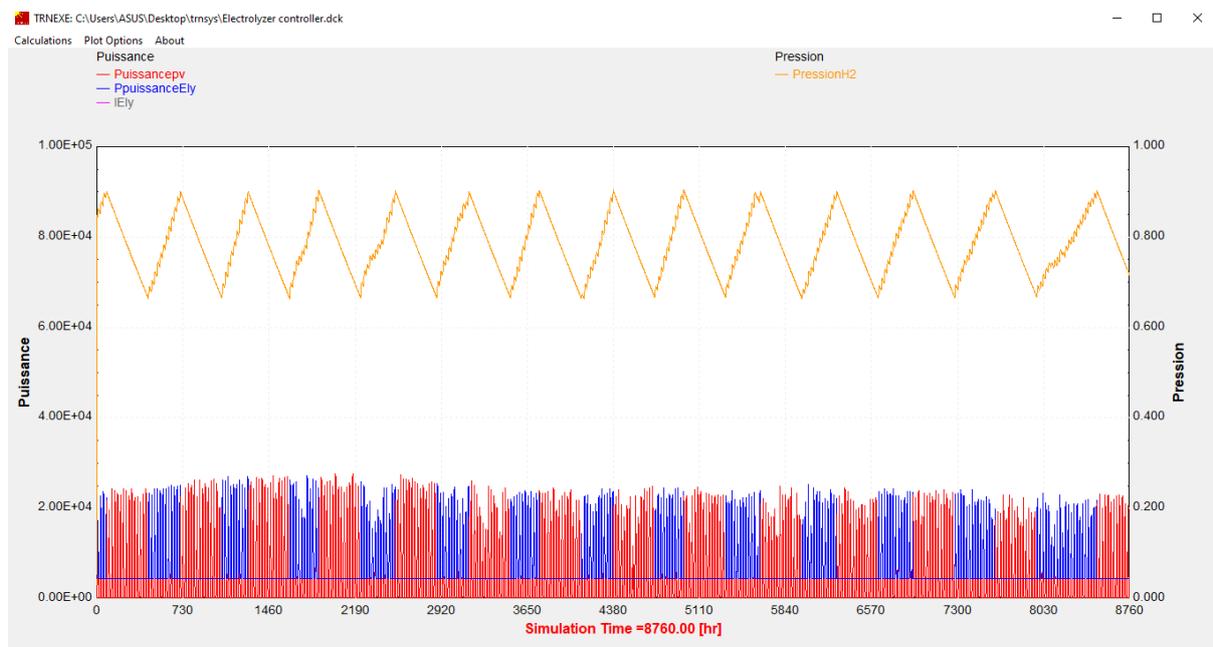


Figure III.19 : la puissance annuelle de PV et de l'Electrolyseur et Niveau de pression dans le réservoir d'hydrogène sur le site de Tamanrasset.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

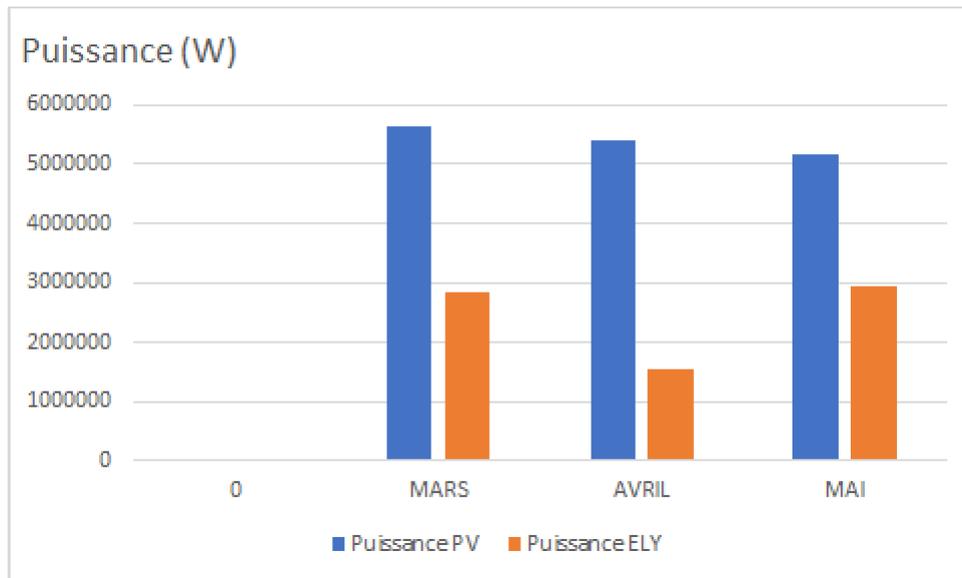


Figure III.20 : La puissance de PV et d'Electrolyseur au printemps sur le site de Tamanrasset.

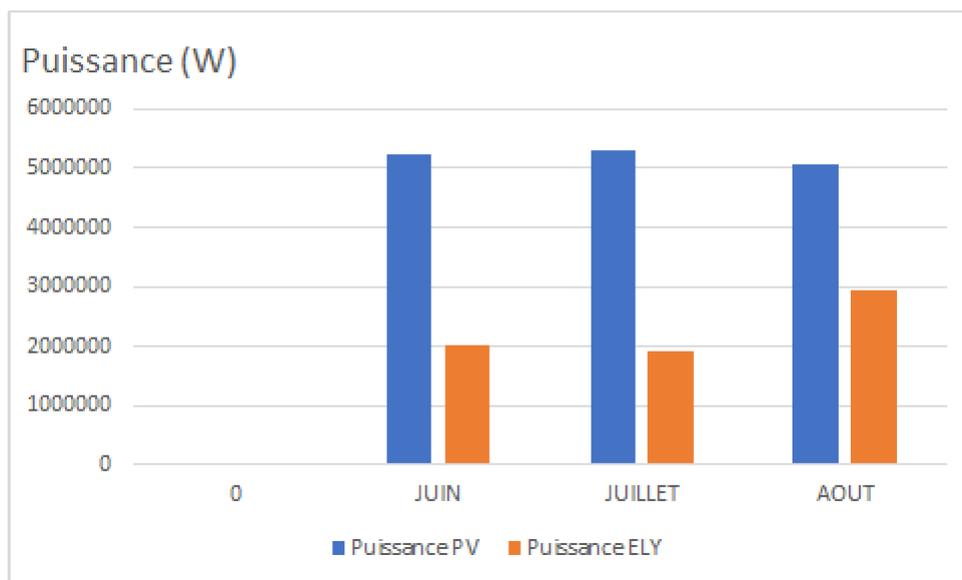


Figure III.21 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en été sur le site de Tamanrasset.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

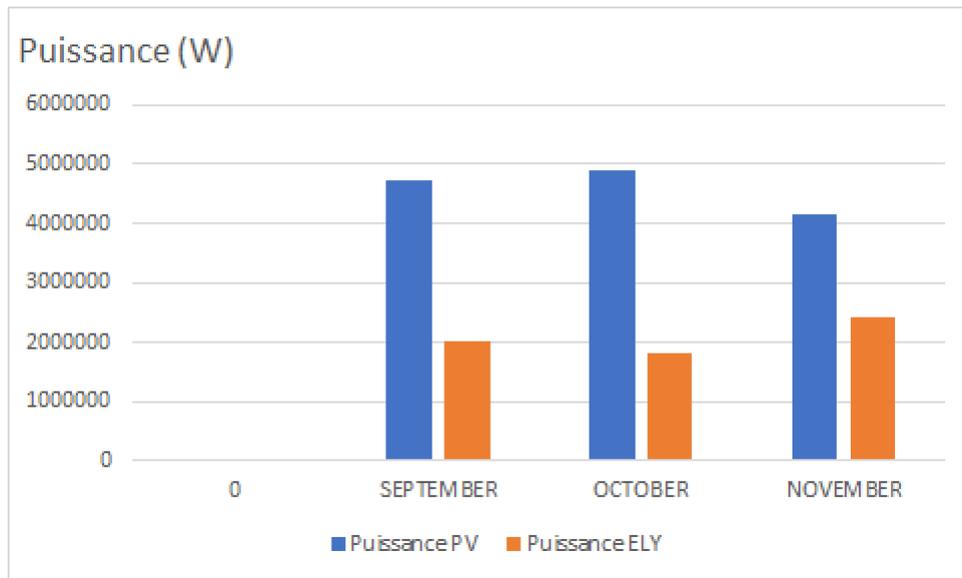


Figure III.22 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en L'automne sur le site de Tamanrasset.

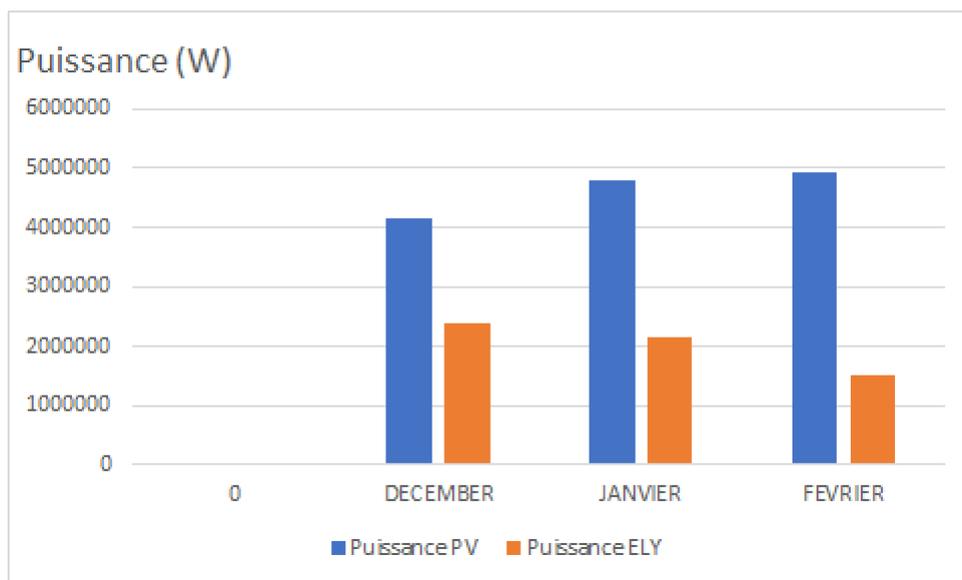


Figure III.23 : La puissance de PV et d'Electrolyseur en Hiver sur le site de Tamanrasset.

On remarque au printemps que le niveau de la puissance est le plus élevé en mars avec 5,6 mégawatts de capacité photovoltaïque et le niveau le plus bas en mai avec 5,1 mégawatts. Quant à la puissance de l'électrolyseur, elle est la plus élevée au mois de mai de 2,9 mégawatts et le niveau le plus bas à 2,7 mégawatts en avril. Ceci est dû à la raison de l'état de

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

charge élevé du réservoir, car le contrôleur réduit l'énergie. Le travail de l'électrolyseur réduit la production d'hydrogène.

Quant à la saison l'été, le niveau de la puissance est le plus élevé en juillet, où la capacité photovoltaïque est de 5,2 mégawatts, et le niveau le plus bas est en aout à 5 mégawatts. La puissance de l'électrolyseur était la plus élevée à aout à 2,9 mégawatts et le niveau le plus bas à 1,9 mégawatt en juillet. Cela est dû à la raison précédente.

À l'automne, on remarque que le niveau de la puissance est le plus élevé en octobre, avec une capacité photovoltaïque de 4,8 mégawatts et le niveau le plus bas en novembre à 4,1 mégawatts. La puissance de l'électrolyseur était la plus élevée en novembre, à 2,4 mégawatts, et le niveau le plus bas à 1,8 mégawatt en octobre. Cela est dû à la raison précédente.

Quant à la saison d'hiver, on remarque que le niveau de puissance est le plus élevé en février, avec une capacité PV de 4,9 MW et le niveau le plus bas en décembre à 4,1 MW. La puissance de l'électrolyseur était la plus élevée en décembre, à 2,3 mégawatts, et la plus basse à 1,5 mégawatt en février. Cela est dû à la même raison précédente.

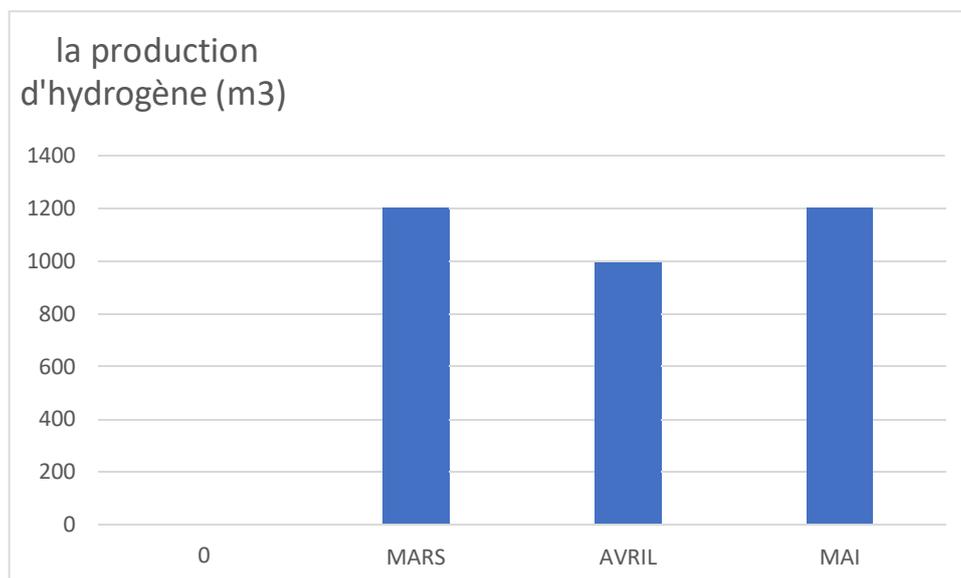


Figure III.24 : La production d'Hydrogène au printemps sur le site de Tamanrasset.

Chapitre 3 Simulation de Production de l'hydrogène à partir l'énergie photovoltaïque à l'aide de logiciel TRNSYS

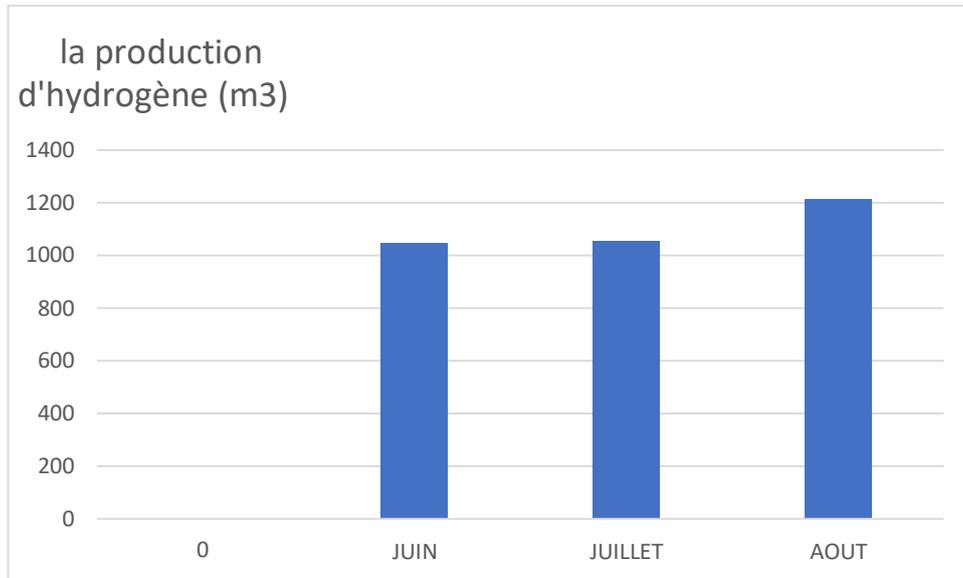


Figure III.25 : La production d'Hydrogène en été sur le site de Tamanrasset.

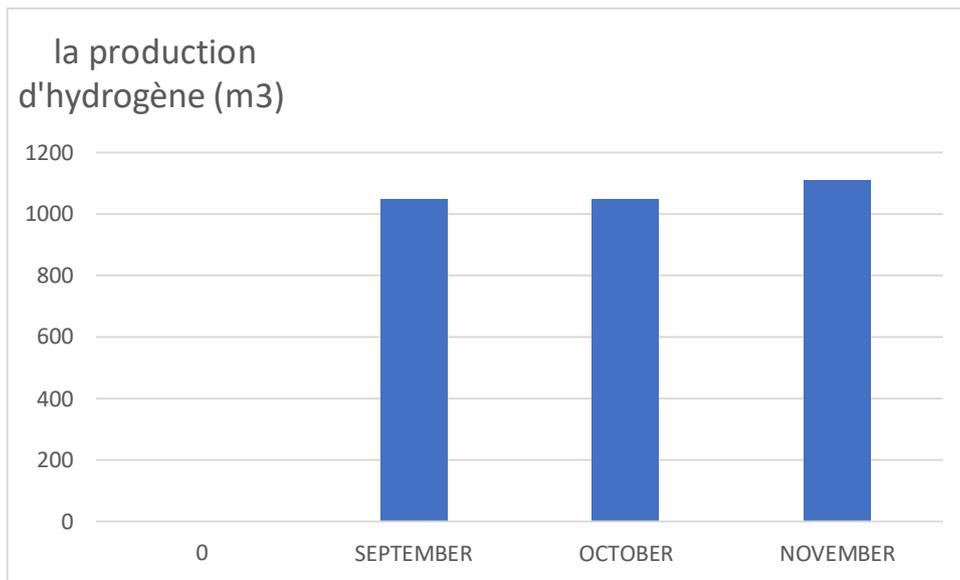


Figure III.26 : La production d'Hydrogène en L'automne sur le site de Tamanrasset.

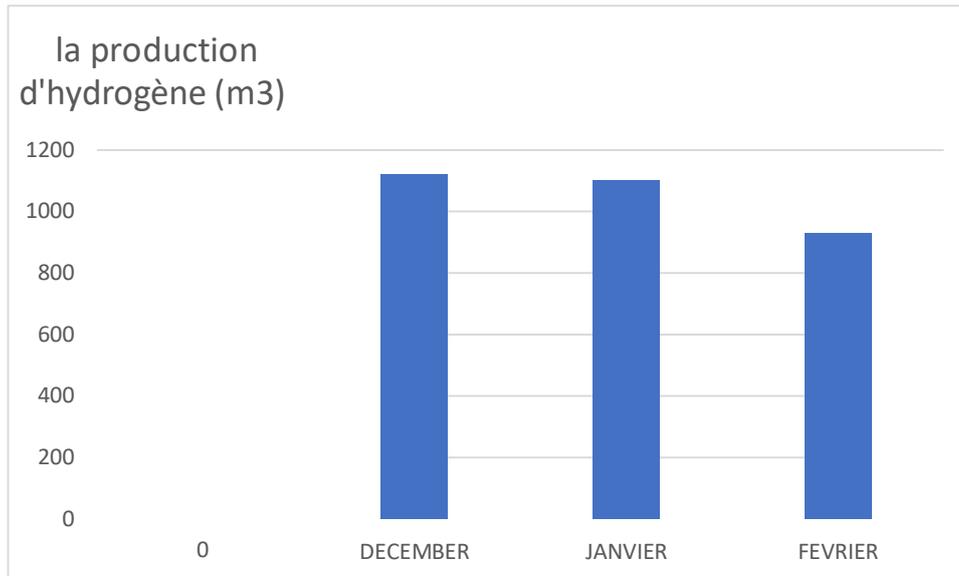


Figure III.27 : La production d'Hydrogène en Hiver sur le site de Tamanrasset.

Nous remarquons au printemps que le taux de production d'hydrogène est quelque peu proche entre les mois de mars et mai, où la valeur la plus élevée est 1219(m³/h) au mois de mars, tandis que la valeur la plus basse est 978(m³/h) au mois d'avril, et c'est la saison la plus productive de l'hydrogène.

Alors que pour l'été, la valeur la plus élevée est de 1211(m³/h) en août, tandis que la valeur la plus basse est de 1047(m³/h) en juin.

Quant à la saison d'automne, le taux de production d'hydrogène est plus élevé en novembre avec une valeur de 1111(m³/h) septembre, tandis que la valeur la plus basse est de 1048(m³/h) en octobre.

En hiver, elle est considérée comme la saison avec le moins de production d'hydrogène, car la valeur la plus élevée est de 1121(m³/h) en décembre, tandis que la valeur la plus basse est de 928(m³/h) en février.

III.11 Comparaison des résultats :

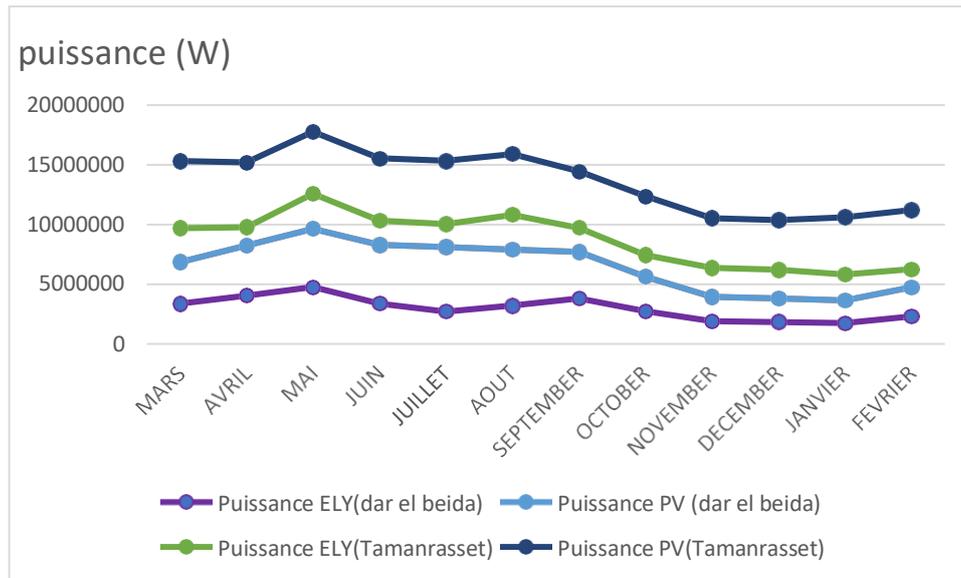


Figure III.28 : La puissance annuelle de PV et d'Electrolyseur sur le site de Dar el Beida et Tamanrasset.

On remarque que l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et consommée par l'électrolyseur à eau est supérieure à son homologue au nord, et ceci est dû à l'importance de l'énergie solaire dans le désert par rapport au nord.

Là où les meilleurs pourcentages d'énergie produite par un générateur photovoltaïque se situaient en été pour Dar El-Beida, tandis que pour Tamanrasset, c'était au printemps.

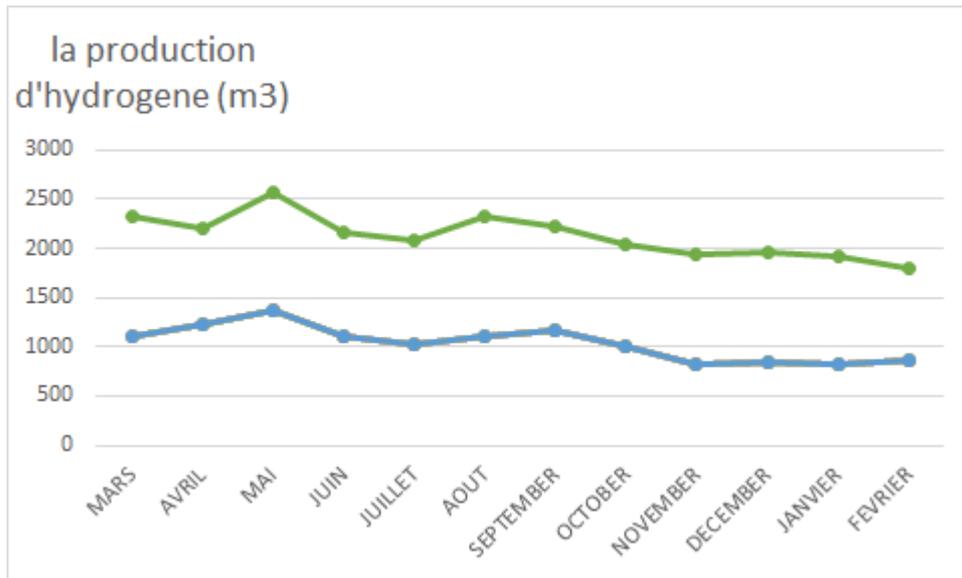


Figure III.29 : la production d'hydrogène annuelle sur le site de de Dar el Beida et Tamanrasset.

La figure (III.29) représente le taux de la production saisonnier d'hydrogène pour les deux sites.

On remarque que le taux de production d'hydrogène était plus élevé à Tamanrasset par rapport à Dar el Beida, et cela est dû au fait que le rayonnement solaire total à Tamanrasset est plus important qu'à Dar el Beida, où plus le rayonnement est important, plus la quantité d'énergie produite par le générateur photovoltaïque est grande.

Conclusion :

Après avoir passé en revue dans les précédents chapitres les aspects théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension de la production de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau alimenté par énergie solaire, ce chapitre a été consacré à la simulation du système de production d'hydrogène à partir l'énergie solaire. Le système de production d'hydrogène a été configuré de manière à optimiser le rendement énergétique ainsi que le coût en proposant un système composé d'une photovoltaïque, d'un convertisseur AC/DC et enfin, d'un contrôleur, d'un électrolyseur alcalin amélioré fournissant de l'hydrogène. Il faut savoir que le choix de ce type électrolyseur, en plus d'être peu coûteux comparé aux autres technologies, permet de réduire l'énergie consommée pour la compression de l'hydrogène et de réduire ainsi le coût du compresseur.

Pour la simulation de la production d'hydrogène, nous avons proposé un exemple, il est basé sur une simulation horaire grâce au logiciel TRNSYS. Les résultats de la simulation du système par la méthode statistique permettent de faire une estimation moyenne de la production d'hydrogène à partir des données de rayonnement solaire saisonnier et annuelle, selon la disponibilité, des caractéristiques de générateur PV (courbe de puissance) ainsi que des caractéristiques de l'électrolyseur (puissance de fonctionnement).

La production saisonnière d'hydrogène a été simulée pour les sites Tamanrasset et Dar el Beida On remarque que la production est maximale en été sur le site de Dar el Beida et au printemps sur le site de Tamanrasset, nous permet de déduire que le site Tamanrasset est le plus indiquée pour la production d'hydrogène, C'est la raison pour laquelle Tamanrasset a un champ d'énergie solaire supérieur à Dar el Beida.

Conclusion général :

Au vue de l'augmentation de la demande mondiale d'énergie, de la raréfaction, à terme, de certaines énergies primaires (pétrole et gaz) et de l'accélération du réchauffement climatique, fortement lié aux émissions de gaz à effet de serre par le secteur énergétique et les transports, le recours à l'hydrogène (H₂) comme vecteur énergétique est l'une des solutions envisagées pour l'avenir énergétique, pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. En effet, l'hydrogène semble inépuisable et est présent partout sous forme d'eau, il ne crée a priori aucune pollution. De plus, il a l'avantage d'un vaste domaine d'application. Tout comme l'électricité, il peut être stocké et transporter. Il est important de noter que les pays développés ont lancés des programmes d'envergure pour développer les aspects technologiques liés à l'hydrogène en partant de sa production jusqu'à son utilisation en passant par son stockage et sa distribution. Il est clair que la pollution engendrée particulièrement par le domaine du transport trouvera son épilogue par une plus grande utilisation du véhicule à hydrogène dont les émissions sont de la vapeur d'eau.

Dans ce travail Nous avons essayé donner un point de vue , sur la question de la production de l'hydrogène a partir les énergies renouvelable notamment à partir de l'énergie solaire, les différentes technologies de production, d'utilisation, de distribution et de stockage de l'hydrogène ont été décrites et analysées.

Nous avons étudié le comportement d'un panneau photovoltaïque et un électrolyseur alcalin. Après on a fait un couplage entre les deux systèmes pour assurer la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau dont les ressources énergétiques sont solaires, en utilisant le logiciel TRNSYS.

Les résultats obtenus permettent d'étudier le fonctionnement du système PV pour un électrolyseur alcalin comme une charge et Tamanrasset et Dar el Beida comme des site.

LES REFERENCES

- [1] : Lenntech info@lenntech.com Consulté le 03/08/2020
- [2] : Encyclopédie de l'énergie (<https://www.encyclopedie-energie.org>). Consulté le 15/08/2020
- [3] : Dr. Isabelle Moretti Projet « solutions pour l'énergie et l'environnement », Université de Pau (E2S-UPPA) Membre de l'Académie des technologies.
- [4] : Fiche 7.1 Révision février 2015 Source : INERIS AFHYPAC (www.afhypac.org). Consulté le 10/09/2020
- [5] : www.connaissancedesenergies.org ,Consulté le 15/09/2020
- [6] : www.ifpenergiesnouvelles.fr ,Consulté le 20/09/2020
- [7] : energies.airliquide.com ,Consulté le 20/09/2020
- [8] : www.futura-sciences.com , 2019, Consulté le 20/09/2020
- [9] : <https://energies.airliquide.com> , Consulté le 20/09/2020
- [10]:<https://bfmbusiness.bfmtv.com> , Consulté le 20/09/2020
- [11] : <https://www.industrie-techno.com>, Consulté le 20/09/2020
- [12] : <https://www.ouest-france.fr>. Consulté le 23/09/2020
- [13] : <https://www.nippon.com>. Consulté le 29/09/2020
- [14] : L. Aiche HAMANNE 2015, « Contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par énergie éolienne », thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid-Tlemcen, Page 10,11,12,21,23,24,45,49,50,54,58)
- [15] : <http://www.tiens-lunivers.fr>. Consulté le 06/11/2020
- [16] : Vattenfall (est un producteur et fournisseur européen d'électricité et de gaz appartenant à l'état suédois). (<https://www.vattenfall.fr>). Consulté le 08/10/2020
- [17] : <http://www.cea.fr> , Consulté le 11/10/2020
- [18] : <https://www.lesbonsprofs.com>. Consulté le 15/10/2020
- [19] : <https://www.teteamodeler.com>. Consulté le 16/10/2020
- [20] : l'absorption des UV par l'ozone Article rédigé par Hagop Demirdjian
<http://culturesciences.chimie.ens.fr> ,Consulté le 16/10/2020
- [21] : <https://www.planete-energies.com>. Consulté le 17/10/2020
- [22] : Romdhane Ben Slama « Essais sur la production de l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau », <https://hal.archives-ouvertes.fr> ,Consulté le 17/10/2020
- [23] : <https://www.les-energies-renouvelables>. Consulté le 19/10/2020
- [24] : <https://www.calculeo.fr>. Consulté le 25/10/2020
- [25] : Association français pour l'hydrogène et les piles combustibles(<https://www.afhypac.org>). Consulté le 25/10/2020
- [26] : BASSIM fares, 2015 « Etude d'une installation de production photovoltaïque par électrolyse de l'eau », Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, Page 6, 25, 32, 33 34, 41 42 43 44 46 50 51 52 53 56.

[27] : Mounir SAHLI, 2010 « Etude de la production d'hydrogène par l'électrolyse et pile à combustion », Mémoire de Magister, Université de Mensouri de Constantine, Page 17 18 19 20 22 23 25 26 27 28.

[28] : <https://www.encyclopedie-energie.org>, Consulté le 30/10/2020

[29] : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00164392/document>.

[30] : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001338/document.2020>

[31] : <https://core.ac.uk/download/pdf/82473167.pdf.2020>

[32] : <https://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm.2020>

[33] : Ulleberg Ø (2002) Modeling of advanced alkaline electrolyzers : à system simulation approach. Int.J. Hydrogen Energy 28(1) 7-19