REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIR

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة يحيى فارس بالمدية

Université Yahia Farès de Médéa

Mémoire de fin d'étude

Option : Énergie renouvelable en électrotechnique

Département de génie électrique

Thème :

Etude d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque

Présenté par :

- BEKHTAOUI Aimene

- BOKHARI Mohamed el Mokhtar

Dirigé par :

-Le professeur : S. ABUDURA **Encadreur**

- Dr :N.sofi **Co-encadreur**

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Avant tout, Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

Je remercie vivement en premier lieu mon encadreur Monsieur S. ABUDURA, qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral a su m'informer, me conseiller, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.

Mes remerciements vont également à notre promotrice Melle N.SOFI pour son engagement et son temps et mes enseignants du département génie électrique.

Je tiens à remercier également les membres de jurée :

Y. CHIBA, R. KARA, A. GASMI d'avoir accepté d'examiner et évaluer mon modeste travail

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes chère parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.

- Mes chères frères et sœurs

- Mes enseignants depuis mon enfance

- A tout ceux qui m'on aidé de près ou de loin a ce mémoire

- A ceux qui me sont chère et ceux que j'ai aimé du fond du mon cœur.

Sommaire

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

Sommaire

Chapitre 1 : Etat d'art d'hydrogène

I. Introduction 4
1.1 Les particularités de l'hydrogène 4
1.1.1 Propriétés physiques 4
1.1.2 Propriétés énergétiques 5
1.2 Production d'hydrogène 7
1.2.1 Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures) 7
1.2.1.1 Le vaporéformage de gaz naturel 7
1.2.1.2 Oxydation partielle 8
1.2.2 Production à partir du charbon 8
1.2.3 l'électrolyse de l'eau 8
1.2.4 Production à partir des énergies renouvelables 9
1.2.4.1 La biomasse 9
1.2.4.2 Energie éolienne 9
1.2.4.3 Energie solaire 9
1.3 Stockage de l'hydrogène 10
1.3.1 Stockage conventionnel 10
1.3.2 stockage par adsorption 11
1.3.3 stockage par hydrure 12
1.4 Les applications d'hydrogène 13
1.4.1 Applications chimiques 14
1.4.2 Utilisations énergétiques 14
1.4.2.1 Autres applications énergétiques 15
1.5 Transport et distribution de l'hydrogène 16
Conclusion 17

Chapitre 2: production et stockage de l'hydrogène

2 Introduction 19
2.1 Caractérstique de l'hydrogène *:* 19
2.2 Production de l'hydrogène : 20
2.3 Stockage de l'hydrogène : 20
2.3.1 Les procédésphysique : 21

2.3.2 . Les procédés chimiques : 22
2.4 Les applications d'hydrogène 23
2.4.1 Utilisation chimique : 23
2.4.2 Utilisation énergétique : 24
2.5 L'électrolyseur de l'eau : 24
2.6 Les déférentes technologies de l'électrolyseur : 25
2.6.1 Electrolyseur alcaline : 25
2.6.2 Electrolyseur PEM : 26
2.6.3 Electrolyseur à haute température : 27
2.7 .Les piles à combustibles : 27
2.7.1 Principe de fonctionnement 28
2.7.2 .Les déférentes types des piles à combustible : 29
2.7.3 Applications des piles à combustible : 31
Conclusion 32

Chapitre 3 : Modélisation de système production d'hydrogène par l'ènergie solair

3 Introduction: 34
3.1 système solaire photovoltaïque: 34
3.1.1 Principes de calcule de l'énergie solaire: 34
3.1.2 Conversion photovoltaïque : 36
3.1.3 Le module photovoltaïque: 37
3.1.4 Cellules photovoltaïque: 38
3.1.5 .l'onduleur: 39
3.1.6 Les batteries : 40
3.2 Différentes configuration des systèmes PV: 41
3.2.1 Système fonctionnant au fil du soleil : 41
3.2.2 Système avec appoint électrique: 42
3.3 Modélisation électrique de générateur photovoltaïque 42
3.3.1 Influence de l'ensoleillement et de la température 42
3.4 Avantages/Inconvénients du photovoltaïque: 44
3.4.1 Les avantages: 44
3.4.2 Les inconvénients: 45
3.5 MODELISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE 45
3.5.1 Modèle de la cellule 45
3.5.2 Procédure expérimentale 46
3.5.3 Modélisation mathématique 47
3.6 . MODELISATION DE L'ELECTROLYSEUR 50
Conclusion 50

Chapitre 4: Dimensiont etnemen simulation de système étude

4 INTRODUCTION 52
4.1 Modélisation de la Production d'hydrogène par la Machine Learninig : 52
4.1.1 Les données de système: 52
Les étapes de système 54
4.2 Analyse exploratoire et visualisation et prétraitement des données 54
4.3 Apprentissage automatique et construction des modèles : 55
4.4 implémentation du DNN 56
Conclusion 58

Conclusion générale *59*

Bibliographiques

Nomenclature

a	Facteur de correction	P_{max}	Puissance maximale du module
a, b, c, d, d, e	Constante à température ambiante expérimentale	P	Pression atmosphérique
C_0	Constante réduite du courant de saturation	Q	Charge de l'électron = $1.60217733\ 10^{-19}$ C
C_1	Constante réduite du photocourant	$Q_{hydrogène}$	Production théorique d'hydrogène
F	Constante de Faraday	R_s	Résistance série du module
I_{cc}	Intensité de court-circuit	R_{sh}	Résistance shunt du module
I_{cel}	Intensité de la cellule d'électrolyse	R_{opt}	Résistance optimale
I_{max}	Intensité maximale du module	R	Constante des gaz parfaits
Irr	Irradiation solaire	S	Surface du module
I_f	Intensité au point de fonctionnement	T	Température ambiante
I	Intensité fournie par la pile	T_{ref}	Température de référence
I_{ph}	Photocourant	t	Temps correspondant à la production du volume v
I_{s1}	Courant de saturation de la diode1	v	Volume d'hydrogène produit
I_{s2}	Courant de saturation de la diode2	V_{co}	Tension de circuit ouvert
Irr_{ref}	Irradiation de référence égale à 1000 W/m^2	V_{max}	Tension maximale du module
$Is_{réf}$	Courant de saturation □ à l'irradiation de référence	V_{cel}	Tension de la cellule d'électrolyse
k	Constante de Boltzman	m_{ref}	Facteur d'idéalité à la température

Liste des tableaux

***Tableau I**:propriété thermo physique de l'hydrogène* *5*
***Tableau II**:polluants émis par les différents carburants* *6*
***Tableau III**:les différents types de piles à combustibles* *15*
***Tableau IV**:représente la déférente technologie des piles à combustibles* *30*

Liste des figures

***Figure I**: densité de masse d'énergie de quelques carburants 5*
***Figure II**:Liaisons hydrogène dans l'eau 19*
***Figure III**:Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, et distribution 20*
***Figure IV**: Cellule d'électrolyse de l'eau 25*
***Figure V**: Cellule d'électrolyse de l'eau 26*
***Figure VI**:principe schématique de l'électrolyse PEM 26*
***Figure VII**:Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte 27*
***Figure VIII**:Principe de fonctionnementd'une pile à combustible 29*
***Figure IX**:Position du soleil 36*
***Figure XI**:Principe de conversion photovoltaïque 37*
***Figure XII**: Module photovoltaïque 38*
***Figure XIII**: Types de cellules photovoltaïques 39*
***Figure XIV**:Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque 41*
***Figure XVI**:Schéma équivalentd'une cellule photovoltaïque 42*
***Figure XVIII**:Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V 43*
***Figure XX**:Influence de la température sur la courbe I-V 44*
***Figure XXIII**: Schéma électrique équivalent simple d'une cellule photovoltaïque 45*
***Figure XXIV**:Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque 46*
***Figure XXVI**:Schéma du dispositif expérimental 46*
***Figure XXVIII**:Courbe I-V du panneau à la lumière du soleil (Irradiation = 717 W/m2) 47*
***Figure XXX**:Courbe I-V de l'Electrolyseur 50*
***Figure XXXI** la puissance maximale en fonction du Irradiation 52*
***Figure XXXII** la production d'hydrogène en fonction du rendement 53*
***Figure XXXIV** : la production d'hydrogène en fonction du l'intensité au point de fonctionnement 53*
***Figure XXXV** : la tension de circuit ouvert en fonction du Irradiation 53*
***Figure XXXVI** : Intensité de court-circuit en fonction du Irradiation 54*
***Figure XXXVII** : la production d'hydrogène en fonction du Irradiation 54*
***Figure XXXVIII** : la production d'hydrogène en fonction du la température 54*
***Figure XXXIX** : la production d'hydrogène en fonction du nombre de cellules en serie 55*
***Figure XL** la production d'hydrogène en fonction du nombre de cellules en parallèles 55*
***Figure XLI** : la production d'hydrogène en fonction du nombre de température 58*

Introduction générale

Introduction générale :

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. Elles se présentent sous de nombreuses formes, certaines étant naturellement stockables (comme la biomasse ou les barrages hydroélectriques), d'autres non, en particulier celles qui transforment les énergies renouvelables, intermittentes, aléatoires et non contrôlables : c'est particulièrement les cas des sources éoliennes et photovoltaïques. Or, ce sont précisément celles qui sont les plus prometteuses en termes de potentialité pour le futur.

L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Elle peut être prise de la mer dans le cas des sites côtiers ou des nappes phréatiques particulièrement pour le grand sud. L'utilisation des eaux thermales peuts'avérer un choix judicieux.

Un point très important est de noter que la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir de l'électricité fournie par les énergies renouvelables (éoliennes, capteurs photovoltaïques) permettrait sans polluer, à la fois de stocker, de transporter et de réutiliser ces énergies.

Pour la production de cette énergie électrique propre à partir de l'énergie chimique dégagé par la combustion de l'hydrogène dans le cadre de nouvelle technologie, la pile à combustible est un élément clé de la filière hydrogène pour la production d'énergie électrique polluante et à hauts rendement.

Cette étude a pour objet l'étude d'une production d'hydrogène solaire en utilisant logiciel de simulation Python.

Le système est constitué des panneaux photovoltaïques et d'un électrolyseur. Les panneaux photovoltaïques alimentent l'électrolyseur en énergie électrique. L'électrolyseur produit l'hydrogène et l'oxygène.
Ce travail a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en quatre chapitres :

-Le premier chapitre est consacré pour les généralités sur l'hydrogène.

-Le deuxième chapitre est focalisé sur la production l'hydrogène, et la caractéristique physique et chimique, les procédés de production et de stockage de l'hydrogène, avec les déférentes utilisations de l'hydrogène.

-Dans le troisième chapitre consacré pour les généralités sur les systèmes photovoltaïques et la modélisation de l'électrolyseur.

-Enfin, le quatrième chapitre est une présentation de la simulation du système de la Production d'hydrogène par la Machine Learning.

CHAPITRE I

Etat d'art d'hydrogène

I. Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. La molécule de dihydrogène(H2) est constitué de deux atomes d'hydrogène .On parle communément d'hydrogène pour désigner en effet le dihydrogène.

L'hydrogène est très abondant à la surface de la terre mais n'existe pas à l'état pur, il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau, les hydrocarbures.

Les organismes vivants (animal ou végétal) sont également composés d'hydrogène. La biomasse constitue donc une autre source potentielle d'hydrogène.

Extraire l'hydrogène de ces sources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie, comme pour l'électricité, on considère ainsi que l'hydrogène est un vecteur énergétique.

L'hydrogène pourrait être quasi inépuisable, à condition de savoir le produire en quantité suffisante et à un coût compétitif et idéalement à partir d'énergie (nucléaire et renouvelable).

On appelle technologie de l'hydrogène l'ensemble des technologies étudiées pour produire l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques.

1.1 Les particularités de l'hydrogène

1.1.1 Propriétés physiques

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore. C'est l'élément le plus léger. Il représente 75%de la masse de l'univers. Cependant, il se trouve pratiquement en combinaison avec d'autres éléments tels que l'oxygène, le carbone et l'azote. Sur terre, on le trouve principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Le tableau I rapporte ses propriétés physiques.

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

***Tableau I**:propriété thermo physique de l'hydrogène*

1.1.2 Propriétés énergétiques

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente plusieurs avantages :

- ✓ Il a une très grande densité de masse d'énergie. Comme on peut le voir dans la figure I., l'énergie fournie par unité de masse d'hydrogène est deux fois plus celle fournie par l'énergie conventionnelle, elle est presque trois fois celle de l'essence et prés de six fois celle du méthanol.

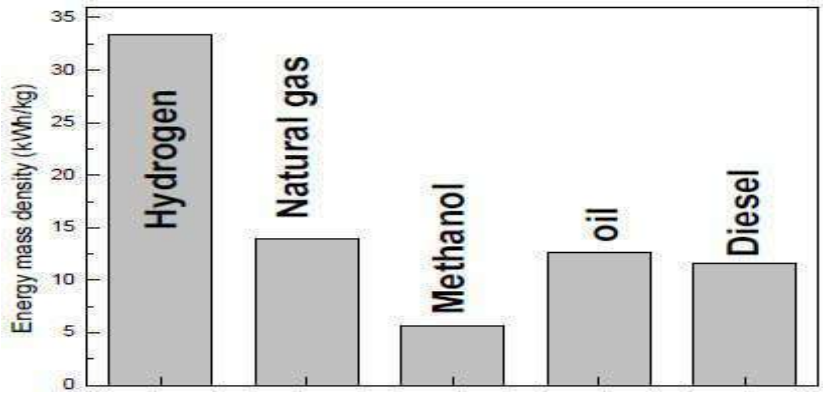


***Figure I**: densité de masse d'énergie de quelques carburants*

- ✓ L'hydrogène est le vecteur d'énergie le plus polyvalent. En effet, les sources d'énergies conventionnelles ne peuvent pas être converties sous forme d'énergies utiles (mécanique, thermique ou électrique) suivant seulement un seul processus : la combustion. Par contre, l'hydrogène peut être converti en énergie utile selon cinq processus différents. En plus de la combustion, l'hydrogène peut :
- Etre directement transformé en vapeur.
- Etre converti directement en chaleur par combustion catalytique.
- Etre converti directement en électricité par des procédés électrochimiques.
- Agir comme une source de chaleur et /ou dissipateur de chaleur par réaction chimique.
- ✓ En tenant compte des impacts environnementaux, l'hydrogène solaire est un carburant propre comparé aux divers combustibles, comme le montre le tableau II. La seule particule émise est le NOx et cela lors de la combustion de l'hydrogène. Toute autre forme d'utilisation d'hydrogène (hydruration, génération de vapeur, combustion catalytique, etc.) ne produit ou produit très peu d'éléments nocifs pour l'environnement.
- ✓ Comme pour tout carburant, des précautions de sécurité élémentaires doivent être respectées pendant l'utilisation de l'hydrogène. Cependant, en comparaison avec les dangers liés à l'utilisation d'autres combustibles, en particulier la toxicité et les risques d'incendie, l'hydrogène est le carburant qui représente le moins de risque.

Polluant	**Hydrocarbure**	**Charbon**	**Hydrogène**
CO_2	72.40	100.00	0.0
CO	0.80	0.65	0.0
SO_2	0.38	0.50	0.0
NO_x	0.34	0.32	0.10

***Tableau III**: polluants émis par les différents carburants.*

1.2 Production d'hydrogène

Par production d'hydrogène, on entend l'extraction et l'isolation de la molécule d'hydrogène de la matière première. Les matières premières utilisées actuellement sont l'eau, la biomasse ou les hydrocarbures (pétrole, gaz nature ou charbon.)

Plusieurs techniques de production existent. Certaines sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène industrialisés ou en phase d'industrialisation.

1.2.1 Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures)

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus se présente dans l'apparition de CO2 comme sous produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques.

1.2.1.1 Le vaporéformage de gaz naturel

Le gaz naturel contient essentiellement du méthane. Toutefois, il doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de vaporéformage (reformage à la vapeur). Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO. On notera que ces réactions sont thermodynamiquement équilibrées, ce qui signifie que même si on laisse tout le temps nécessaire à la réaction chimique pour s''effectuer, une partie de la charge ne réagit pas et reste mélangée aux produits. Dans le cas de vaporéformage, ceci se traduit par une fraction significative de méthane (CH4) et de monoxyde de carbone (CO) en sortie d'unité.

Réaction1:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \qquad (I.1)$$

Réaction2:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad (I.2)$$

Les deux réactions*:*

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \qquad (I.3)$$

1.2.1.2 Oxydation partielle

On peut synthétiser l'hydrogène par l'oxydation des hydrocarbures en présence d'air ou d'oxygène pur, cette procédure appelée l'oxydation partielle qui est également un processus de production maitriser.

Dans le cas du méthane l'oxydation partielle de ce dernier peut être décrite par les équations suivantes :

$$\boldsymbol{CH_4 + ½\ O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2} \quad \boldsymbol{(I.4)}$$

$$CH_4 + O_2 \leftrightarrow CO2 + 2H_2 \qquad (I.5)$$

Ces types des réactions sont exothermiques et se déroulent sans catalyseur.

La production d'hydrogène par oxydation partielle du méthane augmente avec la température de processus, mais atteint une valeur de plateau à environ 1000K. L'efficacité théorique est semblable à celle de la vaporéformage conventionnelle, mais il exige un peu d'eau.

1.2.2 Production à partir du charbon

L'hydrogène est produit dans le monde à 18% à partir du charbon, contre 4% en Europe. Le principal inconvénient de son utilisation est qu'il produit du CO2. Cependant, le charbon étant mieux réparti à la surface du globe que le gaz naturel ou le pétrole, il représente une solution pour l'indépendance énergétique des pays.

1.2.3 l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau (H2O) en hydrogène (H2) et oxygène (O2) lors d'une réaction d'oxydoréduction. Le procédé

industriellement disponible à l'heure actuelle consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité. L'hydrogène est actuellement produit par électrolyse à 4% seulement dans le cas ou l'électricité est bon marché ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire.

1.2.4 Production à partir des énergies renouvelables

1.2.4.1 La biomasse

La production d'hydrogène à partir de la biomasse fait l'objet d'intenses activités. Les techniques de production peuvent être divisées en deux classes :

- Les techniques biologiques :

  Ces techniques connues sous le nom de bio hydrogène offrent diverses méthodes de production. La bio photolyse de l'eau par les algues ou les micro-organismes et la décomposition des composés organiques par dégradation des bactéries photosynthétiques et des composés organiques par fermentation en présence des bactéries constituent les principales méthodes de production.

- Les techniques thermochimiques.

1.2.4.2 Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'hydrogène les plus prometteuses. Elle offre de réelles opportunités en sites isolés. Réalisée principalement en utilisant l'électrolyse de l'eau, les systèmes de production comprennent entre autres les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les convertisseurs de puissance et les électrolyseurs.

1.2.4.3 Energie solaire

L'hydrogène est produit, par voie solaire, principalement à l'aide de procédés Thermochimique, photo électrochimique et électrolytique :

Procédés thermochimique : ces technologies permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre

200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%, cette chaleur primaire ensuite sera convertie en vecteur énergétique d'hydrogène. Les concentrateurs solaires pourraient être une des alternatives qui intéresse les pays qui ont des ressources importantes en énergie solaire.

- Procédés photo électrochimiques: La cellule photolyse est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photon) décompose l'eau en oxygène et hydrogène.une telle cellule photo électrochimique est formée d'une électrode photosensible immergée dans un électrolyte ou dans l'eau. Ce procédé de photolyse présente l'avantage sur filière photovoltaïque de supprimer la nécessité de transport du courant électrique entre la centrale solaire photovoltaïque et les installations de production de l'hydrogène par hydrolyse (la conversion directe apporte en outre un rendement supérieur).
- Procédés électrolytiques : Ce procédé consiste à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'un courant électrique continu, traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes.

1.3 Stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène en particulier dans le carde des applications mobiles, est l'un des principaux défis scientifique et technologiques à relever. Son importance découle de la recherche, notamment pour le secteur du transport comme pour un réservoir compact, léger, économiquement accessible et répondant aux exigences de sécurité. Les techniques de stockages conventionnelles ne permettent pas d'atteindre cet objectif. La recherche de nouvelles techniques de stockages sont en cours. Les critères de sélection sont sur le niveau des densités volumiques et gravimétriques de l'hydrogène, le dispositif de stockage, l'efficacité et la vitesse de chargement et déchargement.
Différents modes de stockages d'hydrogène existent, parmi ces modes on a :

1.3.1 Stockage conventionnel

C'est le mode le plus utilisé. Il est surtout approprié pour de grandes quantités. Il Y'a deux méthodes différentes *:*

- **Stockage sous compression** : dans ce cas, l'hydrogène est encore sous forme gazeuse. Il est comprimé à une pression variante entre 200 bars et 350 bars. A cette pression, la densité d'hydrogène dépasse 11 Kg/m3, ce qui représente une augmentation de la densité d'un facteur 130 fois plus élevé que la densité à une pression normale. La densité volumique reste ni au moins faible pour les applications de transport. Cependant, les réservoirs capables de supporter les pressions supérieures à 450 bars sont en cours de développement. De plus, à fin de réduire (alléger) plus le poids du système de stockage, les développements sont en cours pour l'introduction de polymères et des fibres de carbone dans la structure des réservoirs qui sont actuellement en métal alliage.
- **Stockage sous forme liquide** : l'hydrogène est liquéfié à 20K avant son stockage dans un réservoir d'acier à double paroi. L'espace entre les murs est rempli de matériaux isolants, d'azote liquide ou conservé sous vide. Les matériaux composites sont sous développements pour fabriquer des réservoirs plus légers sous forme liquide. La densité de l'hydrogène s'élève à environ 71Kg/m3, ce qui rend possible d'avoir des citernes répondant aux exigences du secteur de transport une fois le problème de pertes résolu. Cependant, la nécessité de maintenir la température basse et limité les pertes de vaporisation d'une part, et réduire le cout énergétique exorbitant de la liquéfaction d'autre part, fait que ce mode de stockage se conforme de manière optimale aux critères de stockage pour une consommation d'énergie d'hydrogène à grande d'échelle.

1.3.2 stockage par adsorption

Il s'effectue par la concentration d'hydrogène par absorption à la surface d'un adsorbant approprié. Si l'adsorption de l'hydrogène par une grande variété de matériaux est en théorie possible, seule l'adsorption par le carbone est significative et peut alors être considère pour les applications technologiques. Dans les conditions normales, des densités d'environ 0.5% en poids ont été obtenues. Mais à très basse température et haute pression, la densité augmente jusqu'à 8%. Donc, pour que ce mode de stockage soit efficace, il est important de développer des adsorbants avec de grandes zones spécifiques. Dans ce sens,

les nanotubes et les nano fibres sont sous considération pour le stockage de l'hydrogène. Ces matériaux, bien que prometteurs, sont toujours à l'état de recherche et développement.

1.3.3 stockage par hydrure

C'est le stockage sous forme atomique de l'hydrogène dans des composés connus sous le nom d'hydrure. Pendant le processus de formation de ce dernier, la réaction suivante a lieu :

$$M + x/2\ H_2 \qquad MHx + \Delta H \qquad (I.6)$$

Le processus de décharge d'hydrogène peut être représenté par la réaction suivante *:*

$$MHx + \Delta H \rightarrow M + x/2\ H_2 \qquad (I.7)$$

Lors des processus de chargement et déchargement, la pression P est liée à la température T par l'équation de Van't Hoff :

$$lnP = \Delta H/RT - \Delta S/R \qquad (I.8)$$

Ou: ΔH *et ΔS sont respectivement l'enthalpie et l'entropie du processus d'hydruration.*

R est la constante du gaz.

Il y' a deux classe d'hydrure. Il y'a les hydrures métalliques et les hydrures complexes :

- Hydrures métalliques: ce sont des hydrures à liaisons métalliques. Ces hydrures, agissant comme une éponge, sont capables d'absorber les atomes d'hydrogène dans les défauts du réseau. L'absorption d'hydrogène, connue aussi comme l'hydruration, a lieu à des températures et pressions caractéristiques. Plusieurs familles d'hydrures de métal existent ou sont en cours de développement. Si la capacité de stockage des hydrures métalliques est très satisfaisante, leur densité volumique et leur capacité de désorption sont loin de cela.

- Hydrures complexes : ils sont des structures avec des métaux alcalins (généralement lithium et sodium). L'hydrogène est un élément du groupe 13 (généralement le bore et aluminium). Son stockage dans les hydrures complexes est effectué par des réactions chimiques et l'occupation du site sans treillis comme le cas dans les hydrures métalliques. Dans ce cas, le processus est également limité par les faibles densités d'énergie, la lenteur cinétique de remplissage et cout élevé des hydrures.
- Autres procédés de stockage : Autres types d'hydrures tels que la famille des aminoboranes (NHX BHX) sont en cours de développement. Ils constituent un moyen très prometteur de stockage de l'hydrogène en particulier pour les applications. En effet, certains de ces hydrures, tels que le composé NH3 BH3 peuvent absorber au moins 20% en poids, sont stables dans des conditions normales et peuvent désorber à des températures modérées.

L'hydrogène est utilisable soit directement dans des moteurs à combustion interne soit comme combustible dans une pile à combustible (PAC). Une PAC est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,….) en énergie électrique et thermique sans apport d'énergie extérieure.

1.4 Les applications d'hydrogène

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Comme il peut être aussi utilisé de deux différentes manières :

- Comme produit chimique dans l'industrie : là il entre en tant que réactif dans les procédés chimiques tels que le raffinage du pétrole ou la production d'ammoniac.
- Comme vecteur d'énergie : dans ce cas, l'hydrogène est un carburant ou une source d'énergie.

Actuellement, l'hydrogène est presque entièrement utilisé pour des fins industrielles. L'application majeure de l'énergie est limitée au secteur spatial,

Cepen dant, l'hydrogène va jouer un rôle central, il est placé pour devenir un vecteur énergétique universel.

1.4.1 Applications chimiques

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il se combine avec l'azote en présence d'un catalyseur pour former de l'ammoniac, avec le soufre pour former du sulfure d'hydrogène, avec le chlore pour former du chlorure d'hydrogène et avec l'oxygène pour former de l'eau. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène a lieu à température ambiante et seulement en présence d'un catalyseur, tel que le platine finement divisé. Lorsque l'on enflamme un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène, il se produit une explosion. L'hydrogène se combine également avec certains métaux tels que le sodium et le lithium pour former des hydrures. L'hydrogène agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, tels que l'oxyde de cuivre : le gaz entraine l'oxygène et laisse le métal à l'état libre. L'hydrogène réagit avec les composés organiques insaturés pour former les composés saturés correspondants.

Dans de nombreuses réactions d'électrolyse, l'hydrogène est un sous produit important. Des quantités considérables d'hydrogène sont utilisées dans la synthèse de l'ammoniac et du méthanol. L'hydrogénation des huiles pour la production de graisses comestibles, du charbon pour former le pétrole de synthèse et des huiles du pétrole pour enrichir la fraction d'essence sont des procédés qui nécessitent de grandes quantités d'hydrogène.

1.4.2 Utilisations énergétiques

Piles à combustibles : Il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec une production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur selon une réaction chimique universellement connue :

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + Q \qquad (I.9)$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composé de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte. C'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient mais le principe reste inchangé.

Le Tableau III ci après détaille les divers types de piles couramment développées. Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un même point qui correspond à un rendement brut de l'ordre de 50%.

Type de pile	**Electrolyte**	**T (°C)**	**Domaine d'utilisation**
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transport. Gamme : 1-100KW
Acide polymère (PEMFC et DMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transport, stationnaire Gamme : 10mW-100KW
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaire, transport Gamme : 200KW –
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Stationnaire 500KW-Gamme : 10MW
Oxyde solide (PCFC)	Céramique (solide)	400 à 600	Stationnaire, transport. Gamme : 1KW-10MW
Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	600 à 1000	Stationnaire, transports. Gamme : 1KW-10MW

***Tableau IV**:les différents types de piles à combustibles*

1.4.2.1 Autres applications énergétiques

Les domaines potentiels d'application de l'hydrogène comme énergie sont extrêmement nombreux et variés, à commencer par tous ceux qui sont déjà couverts par le pétrole (et ses dérivés) et le gaz :

- Le transport, avec des moteurs thermiques alimentés directement en hydrogène, comme le démontre le constructeur BMW depuis des années, ou avec des piles à combustibles couplées ou non à des batteries dans des

montages hybrides, comme l'ont démontré une quinzaine de constructeurs automobiles dans le monde.

- L'industrie, qui consomme aujourd'hui la quasi-totalité de l'hydrogène produit dans le monde et qui pourrait reconvertir sans grande difficultés ses systèmes actuellement alimentés en fuel ou gaz naturel.
- L'agriculture, qui, à travers des engrais, utilise déjà des sous produits de l'hydrogène, comme des dérivés de l'ammoniac.

1.5 Transport et distribution de l'hydrogène

L'hydrogène est difficile à stocker et à transporter, en raison de sa faible densité énergétique par unité de volume. Le transport s'effectue généralement en bouteilles ou en pipelines sous forme comprimée: le gaz peut être comprimé de quelques dizaines de bars à 350 ou 700 bars pour être acheminé. D'autres part, il est possible de liquéfier l'hydrogène à – 253°C mais cette transformation est très énergivore. Notons également la possibilité de transporter l'hydrogène sous forme d'hydrure métallique (la réaction d'hydruration est en effet réversible).

Le réseau de gaz naturel peut aussi contenir de l'hydrogène jusqu'à 20% en volume mais cela nécessite de le purifier en aval du réseau. Notons qu'il faut dix fois plus d'espace pour stocker de l'hydrogène gazeux par rapport à l'essence.

Les modes de transport possibles dépendent de la distance, la géographie du trajet, la nature du destinataire, occasionnel ou permanent et des quantités à délivrer. Ils sont les suivants :

- Le transport maritime pour lequel on utilise la forme cryogénique, essentiellement pour des raisons d'encombrement.
- Le transport routier, aussi bien pour la forme cryogénique que pour la forme gaz comprimé. Ce transport est le plus utilisé et se fait actuellement en bouteilles acier sous 200 bars mais la technologie en bouteilles composites, beaucoup plus légère, est en train d'être mise en place pour un transport sous 400 bars, ce qui augmente la capacité par camion et donc diminue sensiblement le prix de ce transport.
- Le transport par gazoducs : ce mode est ancien puisqu'il a été mis en œuvre, pour la première fois en 1938 par les allemands. Aujourd'hui, le

Réseau de l'Europe de l'ouest mesure 1600Km, il est exploité essentiellement par air liquide. D'autres réseaux du même type existent sur d'autres continents.

La distribution se résume essentiellement à la station services pour véhicules à piles à combustible, c'est-à-dire à la fourniture d'hydrogène gazeux sous 350 ou 700 bars. La technologie est aujourd'hui bien maitrisée : fin 2013, plus de 180 stations (dont environ 80 publiques) sont opérationnelles dans le monde, fonctionnent en toute sécurité et permettent un plein d'hydrogène, 5Kg généralement en moins de 5 minutes. L'hydrogène y est soit fabriqué sur place via une énergie renouvelable par électrolyse, ou via un reformer alimenté en gaz, naturel ou issu de la biomasse, soit amené par camion, sous forme pressurisée ou liquide. Il n'y avait, début 2014, que 3 stations privées en France.

Conclusion

Dans le cadre de notre étude, nous avons constaté que le dihydrogène présente des atouts majeurs qui lui assurent un bel avenir en tant que vecteur énergétique intermédiaire. En effet, ses applications recouvrent un large éventail des besoins énergétique humains : il est utilisable dans le domaine des transports, des applications stationnaire et portables, sans compter son rendement énergétique élevé. De plus, c'est une énergie propre si sa production s'opère à partir d'une énergie non polluante comme le rayonnement solaire. Cet avantage est capital suite aux récentes polémiques à propos de l'effet de serre

Chapitre II :

Production et stockage de l'hydrogène

2 Introduction

La production et transport de l'hydrogène ne sont pas sans problèmes. L'essentiel de la production actuelle se fait par réformage de sources fossiles et libère autant de CO_2sinon plus électrolyse, avec des énergies renouvelables comme le soleil et le vent, ce qui permet de stocker que l'utilisation directe de ces sources .On peut également produire de l'hydrogène par de l'énergie produite au gré des cycles naturels pour l'utiliser au moment nécessaire. Le même genre de raisonnement s'applique par ailleurs au stockage d'électricité nucléaire.

Tout autant que la question de sa production, c'est la question de son utilisation qui pose un véritable défi , Il est vrai que l'hydrogène peut tout aussi bien être utilisé comme combustible ou carburant , pour produire de la chaleur ou de l'énergie mécanique, que pour produire directement de l'électricité, via une pile à combustible.

2.1 Caractérstique de l'hydrogène *:*

Hydrogène (du grec «que produit de l'eau »), élément de symbole H, incolore, inodore et insipide, de numéro atomique 1.

On confondait l'hydrogène avec d'autres gaz, jusqu'à ce que le chimiste anglais Henry Cavendish démontreen 1766 que l'hydrogène était produit par l'action de sulfurique sur les métaux. Le chimiste montra plus tard que l'hydrogène était une substance indépendante, que se combinait avec l'oxygène pour former de l'eau (voir FigII). En 1781, le chimiste anglais Joseph Priestley nomma ce gaz « air inflammable » et le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier le renomma hydrogène.

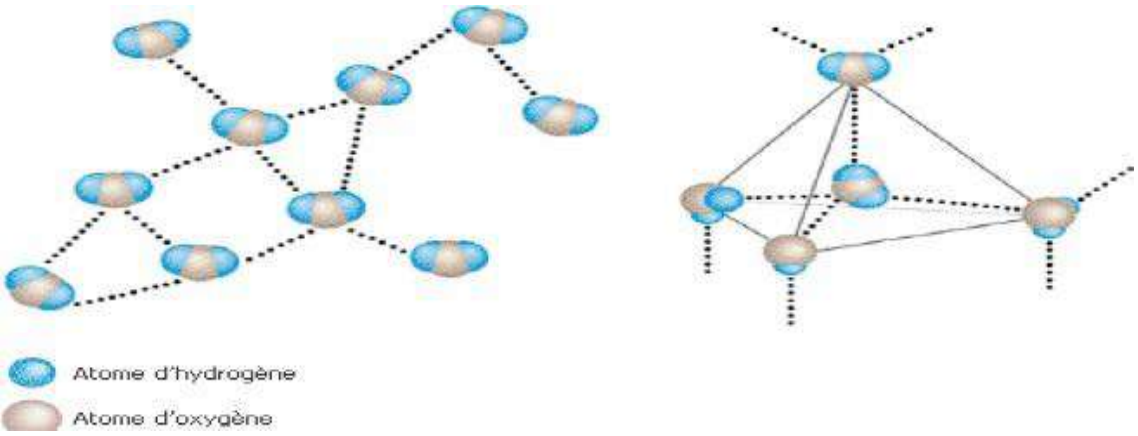


Figure II*:Liaisons hydrogène dans l'eau*

2.2 Production de l'hydrogène :

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale.

La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation.. Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

la matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois ;

L'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.).

Le procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à l'énergie thermique tel

Le procédé thermochimique

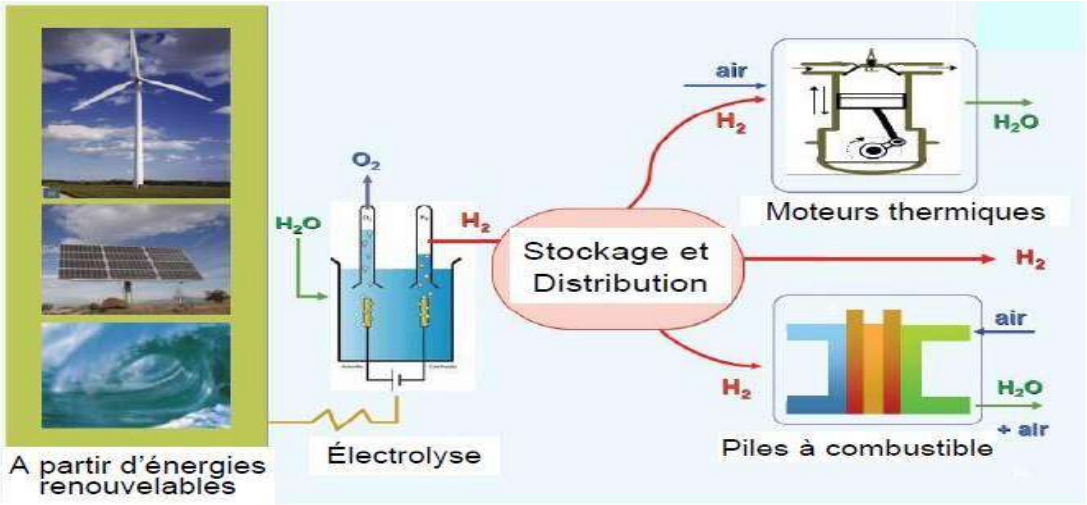


***Figure III**:Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, et distribution*

2.3 Stockage de l'hydrogène :

Le développement d'une technologie efficace de stockage d'hydrogène est l'autre défi à relever pour accéder à «l'économie hydrogène». La plupart des recherches sur ce sujet s'intéresse au stockage sécuritaire de l'hydrogène dans des systèmes denses, légers et de grande capacité. Il est déjà communément stocké dans des bouteilles hyperbares et transporté dans des réseaux de pipelines pour les applications dans l'industrie chimique, sidérurgique et pétrochimique. Toutefois, son déploiement dans le cadre d'une

économie hydrogène respectueuse de l'environnement modifie significativement le cahier des charge de ces deux étapes. Le coût de transport et de la distribution de l'hydrogène reste trop élevé tandis que la capacité volumique des réservoirs d'hydrogène constitue un verrou technologique majeur pour son utilisation comme carburant automobile .

Les différents modes de stockage quiexiste sont :-des procédés physique comme la compression, la liquéfaction ou l'adsorption sur des matériaux carbone (charbons actifs, nanofibres et nanotubes de carbone) ;-des procédés chimique comme (,, hydrures métallique, fullerènes, NH_3, méthanol) .

2.3.1 Les procédésphysique :

A-compression : Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisés actuellement (Air liquide, Linde Gas, Air Product) : la pression varie entre 200-350 et 700 bar pour les pression de stockage les plus élevées. La compression adiabatique à plusieurs étages avec un refroidissement entre chaque étage est généralement effectuée. Lors d'un remplissage rapide, on assiste à une augmentation de température. On peut évaluer à 10%du PCI de l'hydrogène l'énergie nécessaire pour comprimer cegaz de 1 à 700bars L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 litres jusqu'à des réservoirs de$10000m^3$

Les bouteilles commercialisées actuellement (50 litres) permettent un stockage jusqu'à 350 bar. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques. Le réservoir est fait d'alliages métalliques très résistants à la corrosion. Pour réduire davantage le poids, on tente d'introduire des polymères et des fibres de carbone dans la structure.Les principaux inconvénients dont souffre cette technique sont : :-sa faible densité volumétrique ;

,-Pour le stockage à hautes pressions, l'adaptation des auxiliaires : valves, capteurs, détendeurs .***b-Liquéfaction :***Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme liquide à-253℃ .. Le réservoir a souvent deux parois séparées par un espace pour éviter les pertes thermiques par convection. Cet espace peut être sous vide, ou bien constitué de matériaux super-isolants ou enfin rempli d'air liquide (Linde Gas). Le réservoir est généralement en acier mais des matériaux composition sont développés afin de l'alléger. On atteint des densités énergétiques de 22MJ/Kg (rapporté au réservoir).Au vu de la faible température, les pertes thermique sont inévitables de même que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil off à 1% d'évaporation /jour. Malgré tout, ce procédé reste très gourmand en énergie, puisque le coût énergétique de la liquéfaction de l'hydrogène est estimé à 30% de son pouvoir calorifique inférieur

c-Adsorption sur des matériaux carbonés :

Le stockage de l'hydrogène dans charbon actif est connu depuis longtemps. Le remplissage se fait par adsorption. A température et pression ambiante, on atteint des densités énergétiques de

0.5% massique, mais à très basse température (-186℃) et haute pression (60 bar), on peut atteindre des densités de 8%massique. . Plus récemment, on a découvert des méthodes de stockage dans les nanofibres et dans les nanotubes en carbone dont l'efficacité reste encore à prouver. Le stockage dans les nanotubes et dans les nano fibres de carbone repose sur le principe suivant : un gaz peut être adsorbé en surface d'un solide où il est retenu par les forces de Van des Waals. Des travaux ont prouvé que les nanotubes et les nano fibres de carbone ont des propriétés intéressantes d'adsorption.Ce mode de stockage reste à l'état de recherche, notamment pour améliorer les performances grâce à l'utilisation de dopants et à l'amélioration de la fabrication de masse

2.3.2 . Les procédés chimiques :

a- Les hydrures :Certaines éléments ont la propriété de former des liaisons (covalentes ou ioniques) avec l'hydrogène, permettant ainsi son stockage puisque le phénomène est réversible sous certaines conditions opératoires. Il s'agit par exemple du Palladium Pd, du Magnésium Mg, de ZrMn2, Mg2Ni ou d'alliages comme FeTiH, LaNiH6, Mg-Mg2Ni.Il existe deux classes d'hydrures :Les hydrures hauts et basse température

Le stockage s'effectue à haut pression avec évacuation de chaleur. La pression de dissociation est fonction de la température : pour des températures entre 0 et 100℃, les pressions se situent entre 2et 10 bar, mais elles atteignent 30 à 50 bar avec des températures plus élevées. Le déstockage a lieu à basse pression avec apport de chaleur. La densité d'énergie massique est faible pour les hydrures basse température : 1,5 MJ/kg (elle est plus intéressante d'un point de vue volumique : environ 3,5 MJ/l) ; elle augmente cependant pour les hydrures haute température : 4MJ/kg (3,5% massique). Ovonics avance même des chiffres autour de 8 MJ/Kg (7%massique) .

Le principal avantage de cette méthode réside dans le faite que l'hydrogène est stocké à l'état atomique, ce qui réduit considérablement les problèmes de sécurité liés à l'hydrogène gazeux.Mais les densités énergétiques sont encore limitées, la cinétique de remplissage est encore très lente et le coût de certains hydrures est encore trop élevé. Un système de $30Nm^3$ (90kWh) coûte entre 80 et 280 € /kWh pour une masse de 230 à 420 kg et un volume de 60 à 90 litres .b- NaBH4 : Hydrogen on demand™ :

Cette méthode de stockage est celle mise au point par 'Millenium Cell', qui envisage ce type de stockage pour des applications portables, stationnaires et automobiles. Déjà PSA avec son prototype'H_2O 'et Ford avec l'Explorer 'et la 'Crown Victoria' utilisent cette méthode de

Stockage. Ford étudie la faisabilité du projet visant une autonomie de 300 miles avec un plein de 35 gallon de 50gallon. .

Le procédé est fondé sur la réaction entre le borohydrure de sodium $NaBO_2$ .Elle nécessite la présence d'un catalyseur qui peut être à base de cobalt ou de ruthénium. Ce procédé permet l'utilisation d'un fluide non toxique, non inflammable, facilement manipulable qui peut être utilisé dans les applications automobiles et stationnaires ; il peut d'ailleurs être stocké dans des réservoirs traditionnels. Cette technologie offre aussi l'avantage d'être à température ambiante et faible pression et surtout de produire un hydrogène totalement pur de CO et autres impuretés.

Des challenges technologiques doivent encore être relevés. Des émissions spontanées d'hydrogène sont à éviter, des catalyseurs moins couteux que le ruthénium doivent être développé (le cobalt requiert une température plus élevée). Enfin, le recyclage du $NaBO_2$. doit être envisagé .

2.4 Les applications d'hydrogène

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

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

2.4.1 Utilisation chimique :

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

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

2.4.2 Utilisation énergétique :

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

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + Q \qquad (II.1)$$

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte ; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de température, de 70 $°C$ à 100 $°C$ Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé.

2.5 L'électrolyseur de l'eau :

Si l'électrolyseur de l'eau est aujourd'hui le procédé de production d'hydrogène le plus souvent mis en œuvre après le vapore formage, sa part, de 4% dans le monde et 1% en Fronce, reste, modeste. C'est que le coût de l'hydrogène produit fluctue entre 5 et 10 euros par kilogramme, en fonction de la taille de l'installation et du prix de l'électricité qui l'alimente. Toutefois, sous réserve d'utiliser de l'électricité d'organique renouvelable ou nucléaire, l'électrolyse de l'eau présente l'avantage décisif de l'absence d'émission de gaz à effet de serre.

Comme depuis la fin du XVIIIe siècle, l'électrolyse de l'eau permet de dissocier chimiquement la molécule H_2O en oxygène (O_2) et hydrogène (H_2), sous l'influence d'un courant électrique continu circulant entre deux électrodes. Depuis sa découverte, ce procédé a fait l'objet de nombreux développements conduisant à trois technologies principales, en fonction du type d'électrolyte, liquide ou solide, séparant les deux électrodes. Il s'agit des électrolyseurs de type alcalin, à membrane à échange de proton (PEM) et à électrolyte céramique solide

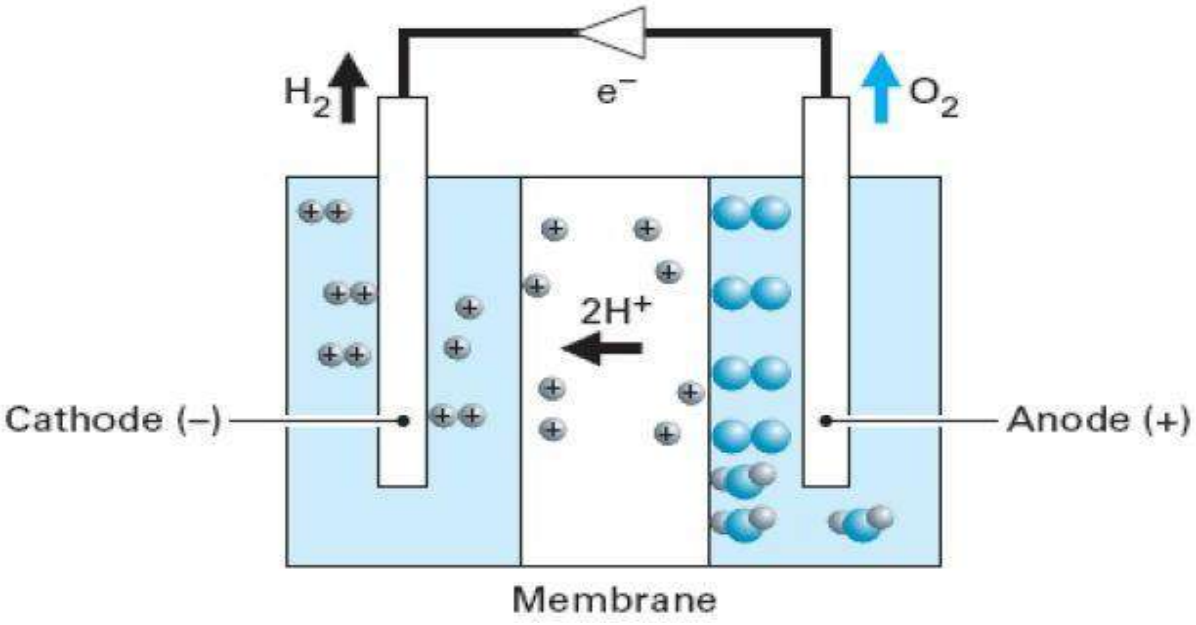


***Figure IV**: Cellule d'électrolyse de l'eau*

.

2.6 Les déférentes technologies de l'électrolyseur :

2.6.1 Electrolyseur alcaline :

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimique dont le chlore.

Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle. L'électrolyseur choisi est à technologie Alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Na) . La conduction Ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-)et sodium (Na^+) Les réactions anodiques et Cathodiques sont décrites ci-dessous

A l'anode: $2OH^- \rightarrow 1/2O_2 + H_2O + 2e^-$ *(II.2)*

A la cathode: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ *(II.3)*

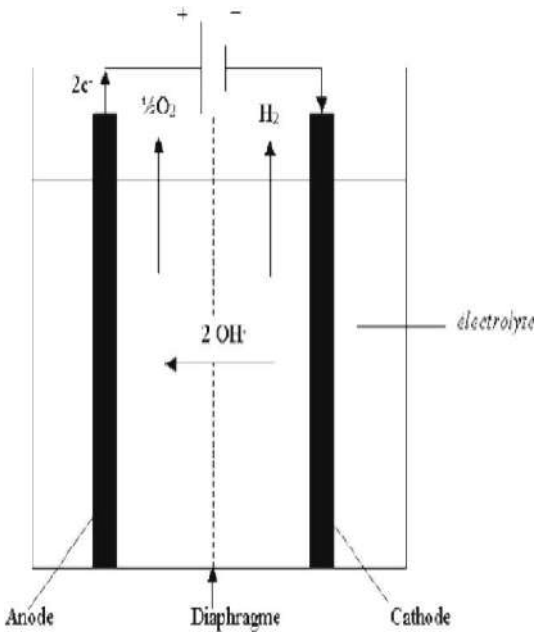


***Figure V**: Cellule d'électrolyse de l'eau*

.

2.6.2 Electrolyseur PEM :

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits $(H_2 et O_2)$, selon les réactions ci-dessous :

A l'anode: $3H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 3H_3O^+ + 2e^-$ *(II.4)*

A la cathode: $2H_3O^+ + 2O^- \rightarrow H_2 + 2H_2$ *(II.5)*

Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la Figure suivante :

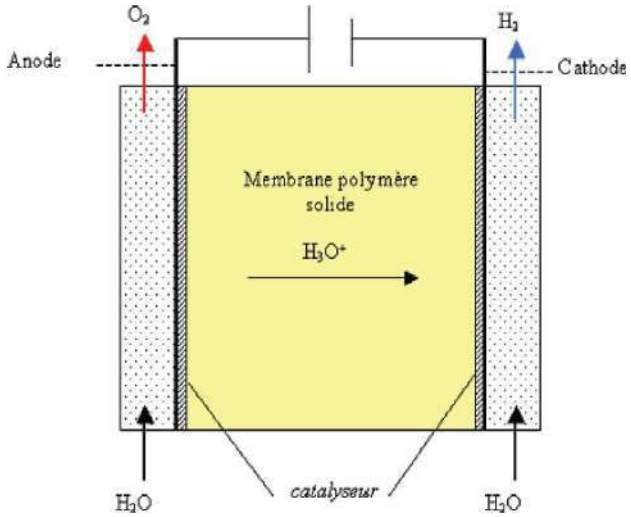


***Figure VI**:principe schématique de l'électrolyse PEM*

.

2.6.3 Electrolyseur 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 soit une conduction protonique soit une conduction d'ions supero xydes O_2^-- Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

-Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :

A l'anode: $2O_{2^-} \rightarrow O_2 + 4e^-$ *(II.6)*

La cathode : $2H_2O + 4e^- \rightarrow 2O_2^- + 2H_2$ *(II.7)*

-Electrolyte à conduction protonique :

A l'anode: $2H_2O \rightarrow 4H_+ + O_2 + 4e^-$ *(II.8)*

La cathode : $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$ *(II.9)*

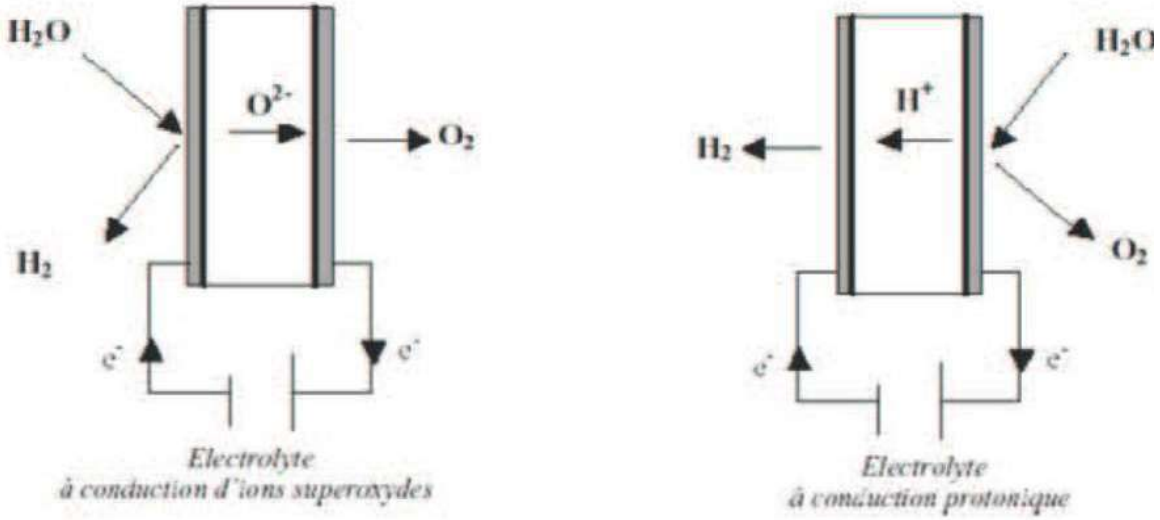


***Figure VII**:Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte .*

2.7 .Les piles à combustibles :

Une pile à combustibles est un dispositif que transforme l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique de façon continue, contrairement à une batterie, une pile à combustible peut produire un courant électrique continu (ainsi que de l'eau et de la chaleur) tant que l'anode est alimentée en combustible et la cathode en comburant, le principe de base de cette technologie repose sur la séparation spatiale de deux déni réactions électroniques : la réaction d'oxydation d'un combustible et la réaction de réduction de l'oxygène on distingue plusieurs piles à combustibles qui se différencient selon la nature de leur électrolyte, par le niveau de leur

température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans les quels chaque type peut être utilisé .

2.7.1 Principe de fonctionnement

Le principe de la pile à combustible a été démontré par L'Anglais William Grove, en 1839, le processus peut être décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale :

$2H_2+O_2 \longrightarrow 2H_2O$+électricité + chaleur (II.10)

Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé.

L'anode : (où se passe l'oxydation) est alimentée en combustible *(H_2, CH_3OH,...),* selon la réaction d'oxydation suivante :

$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e-$ (II.11)

-La cathode : (où se passe la réduction) est alimentée en comburant (O_2 , air, ….), selon la réaction de réduction suivante :

$$\boldsymbol{O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O} \qquad \textit{(II.12)}$$

Le catalyseur : pour que les deux demi-réactions soient possibles, il faut un catalyseur (c'est-à-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même). Afin que le catalyseur puisse travailler efficacement, la création de zones actives doit être assurée. Ces zones mettent en présence à la fois le gaz réactif, les électrons, les électrons, les protons et le catalyseur, cela se réalise au niveau de l'interface électrode-électrolyte.

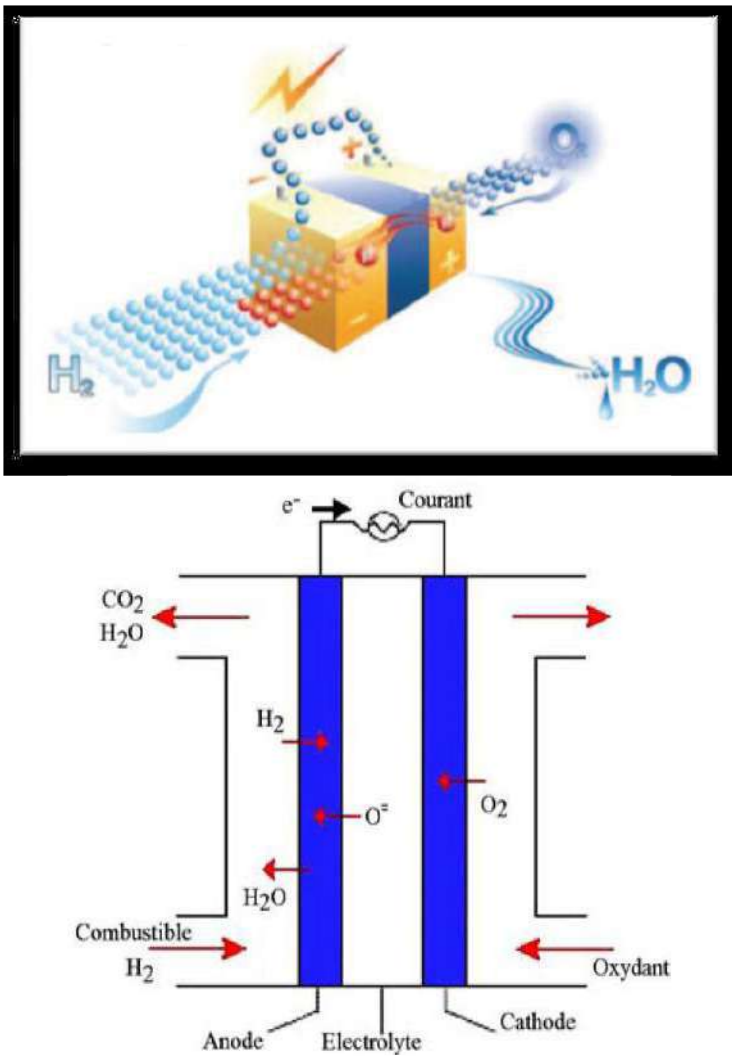


***Figure VIII**:Principe de fonctionnementd'une pile à combustible*

2.7.2 .Les déférentes types des piles à combustible :

Suivante la nature de l'électrolyte et température de fonctionnement les piles à combustibles sont regroupées en cinq catégories :

Les piles à combustibles échangeuse de protons (PEMFC. Proton Echange Menbrane Fuel Cell);

les piles à combustibles alcalines (AFC. Alkaline Fuel Cell) ;

les piles à combustibles à acide phosphorique (PAFC Acid Fuel Cell) ;

les piles à combustibles à carbonates Fondus (MCF, Molten Carbonate Fuel Cell) ; 5-les piles à combustibles à oxyde solide (SOFC, Solide Oxide Fuel Cell) ;

Le tableau ci-dessous donnes des caractéristiques des différentes piles présentées et permet alors d'effectuer des comparaisons entre les propriétés de chacune d'elles afin de permettre le choix approprié :

Le tableau suivant récapitule les différents types de piles à combustible et leurs caractéristiques.

types de pile	Température (°C)	Rendement électrique	Temps de mise en route	Réaction	Domaines d'application
AFC	60-90	25-50	Secondes	Anode: $H_{2\,(g)} \rightarrow 2H_{aq}^{+} + 2e^{-}$ Cathode : $1/2O_{2\,(g)} + 2H_{(aq)}^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2O_{(liq)}$ Cellule : $H_{2\,(g)} + 1/2O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{(liq)}$	Portables spatiales
EMFC	60-100	50-60	Secondes	Anode : $H_{2\,(g)} + O_2^{-} \rightarrow H_2O_{(g)} + 2e^{-}$ Cathode : $1/2O_{2\,(g)} + 2e^{-} \rightarrow O^{2-}$ Cellule : $H_{2\,(g)} + 1/2O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}$	Automobiles Portables, Maritimes,
DMFC	90-120	20-30	Secondes	Anode : $H_{2\,(g)} + 2(OH^{-}) \rightarrow 2H_2O_{(liq)} + 2e^{-}$ Cathode : $1/2O_{2\,(g)} + H_2O_{(liq)} + 2e \rightarrow 2(OH^{-})_{(aq)}$ Cellule : $H_{2\,(g)} + 1/2O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{(liq)}$	Portables
AFC	200	55	2-4 heures	Anode $2H_{2\,(g)} \rightarrow 4H^{+}_{(aq)} + 4e^{-}$ Cathode : $O_{2\,(g)} + 4H^{+}_{(aq)} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O_{(liq)}$ Cellule : $2H_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \rightarrow 2H_2O_{(liq)}$	Cogénération
MCFC	650	60-65	>10 heures	Anode : $H_{2\,(g)} + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O_{(g)} + CO_{2\,(g)} + 2e-$ Cathode : $1/2O_{2\,(g)} + CO_{2\,(g)} + 2e^{-} \rightarrow CO^{2-}$ Cellule : $H_{2\,(g)} + 1/2O_{2\,(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}$	Cogénération production centralisée d'énergie
SOFC	900-1000	55-65	>10 heures	Anod: Cathde : Cellue:	Cogénération production centralisée d'énergie

***Tableau V**: représente la déférente technologie des piles à combustibles*

2.7.3 Applications des piles à combustible :

On distingue habituellement les applications des piles à combustible entre applications Portables, stationnaires et embarquées

a) Applications portables :

Celles-ci incluent le téléphone mobile d'une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW et l'ordinateur portable d'une puissance moyenne de 10 W. Ces applications connaissent une très forte croissance et les recherches les plus importantes sont axées sur l'utilisation d'une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux l'apport d'énergie lors des pics d'émission. L'autonomie n'est alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur recharge son portable comme on recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes et chaque recharge donne 3 à 5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle, pour le même encombrement. La technologie qui est utilisée est la pile PEM du fait de sa basse température de fonctionnement et de sa technologie tout solide alimentée soit directement en hydrogène, soit avec du méthanol. En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle soit environ 0,80 €/Wh .

b) Applications stationnaires :

Compte tenu des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur intéresse de nombreux industriels. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances sont dans la gamme de 200 kW à quelques MW) et la production domestique (les puissances sont dans la gamme de 2 à 7 kW).De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. Ils sont généralement basés autour de la technologie PEMFC même si d'autres technologies (MCFC,SOFC) font également l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation. Dans le deuxième domaine, plusieurs projets sont également en cours déréalisation. Des tests sont actuellement réalisés avec plusieurs prototypes en situation réelle. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur (chauffage et eau chaude). Ils sont alim2entés par des combustibles classiques : un reformeur transforme le combustible hydrocarbure (généralement du gaz naturel) en hydrogène. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie pile à combustible

c) Applications embarquées :

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible vers le début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteur thermique), il faut distinguer deux sous-familles assez différentes suivant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou marchandises) exige une durée de fonctionnement bien plus importante

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les généralités sur l'hydrogène est :

-c'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel ;

-il n'est ni polluant, ni toxique ;

-sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau ;

-c'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité;

-son transport est aisé;

-ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible.

Chapitre III :

- ***Modélisation de système production d'hydrogène par l'énergie solaire***

3 Introduction:

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque que consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière

3.1 système solaire photovoltaïque:

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, c 'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 million tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d' environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 million de tonnes dispersées sous forme de rayonnement. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présenté un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 µ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 °k

3.1.1 Principes de calcule de l'énergie solaire:

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certain principes de base et définition méritent d'être rappelées, nomment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite

a) *La latitude(ψ):*C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considère, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif

b) la longitude : Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine, Ce dernier passe par l'observation de Greenwich et a pour longitude. Les longitudes situes à l'set de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives

c) *L'altitude :*L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer mesurée en mètre82(m)

d) La déclinaison(δ**):**C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. La déclinaison varie entre -23,45°

(le 21 décembre) et 23,45° (le 21 juin) (fig. IX). Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur

$$\delta=23.45.\sin\left(2\,\frac{284+n}{365}\right) \qquad \text{(III.1)}$$

Ou : n est le numéro de jour dans l'année.

e) Le temps solaire vrai (TSV):

Défini par l'angle horaire ρ entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le soleil culmine en un lieu donné.

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini :

$$TSV=12+\frac{\rho}{15} \qquad \textit{(III.2)}$$

f)La durée et le taux d'insolation

Par ciel claire et pendant la durée de jour d'ensoleillement S_0(de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement s d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale

Le taux d'insolation est donné par l'expression:

$$\delta=\frac{s}{s0} \qquad \textit{(III 3)}$$

La durée maximale S_0 est calculée par l'expression suivante:

$$\mathcal{S}_0=\left(\frac{2}{15}\right)\cos^{-1}(-\tan\psi\tan\delta) \qquad \textit{(III.4)}$$

Avec δ : *Ladéclinaison*

Ψ *: La titude du lieu*

g) *Position du soleil:*

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles:
La hauteur angulaire(h) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 00 (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai)Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il fout donc écrêter cette variable:

$$\sin(h)=\sin(\psi)\sin(\rho)+\cos(\psi)\cos(\rho)\cos(\delta) \quad (III.5)$$

L'angle horaireρ_s au lever de soleil s'obtient en écrivant $\sin h = 0$

$$\cos(\rho_s)=-\tan(\psi)\tan(\delta) \quad (III.6)$$

- Où(δ) la déclinaison calculée d'après l'équation (III I.1) et (ψ) la latitude du lieu.Azimut du soleil (β) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta)\sin(\rho)}{\cos(h)} \quad (III.7)$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure(IX)

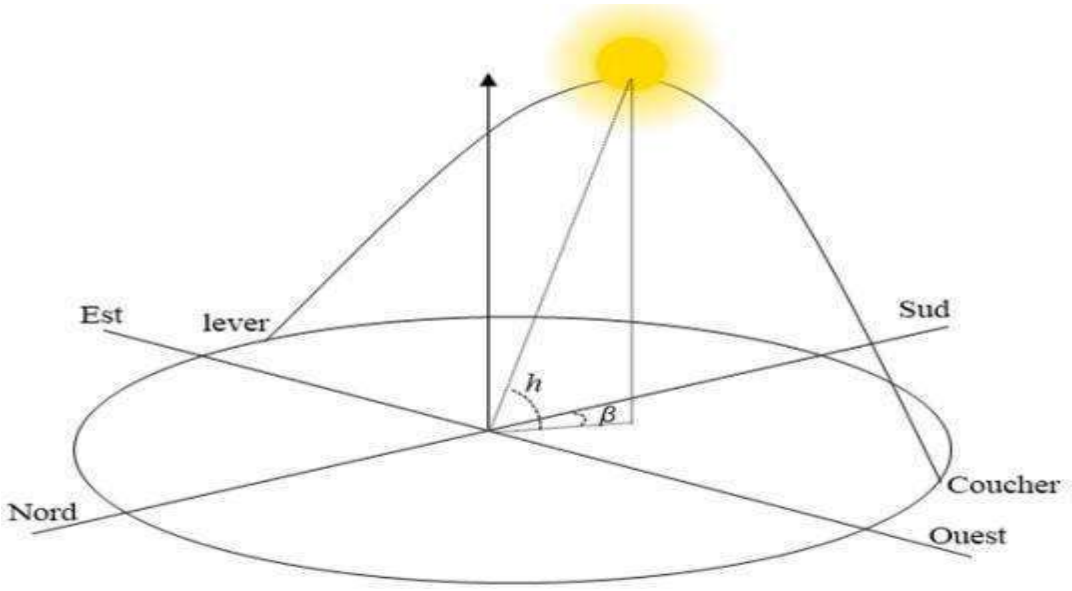


Figure IX*:Position du soleil*

3.1.2 Conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière (voir fig: X). Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique

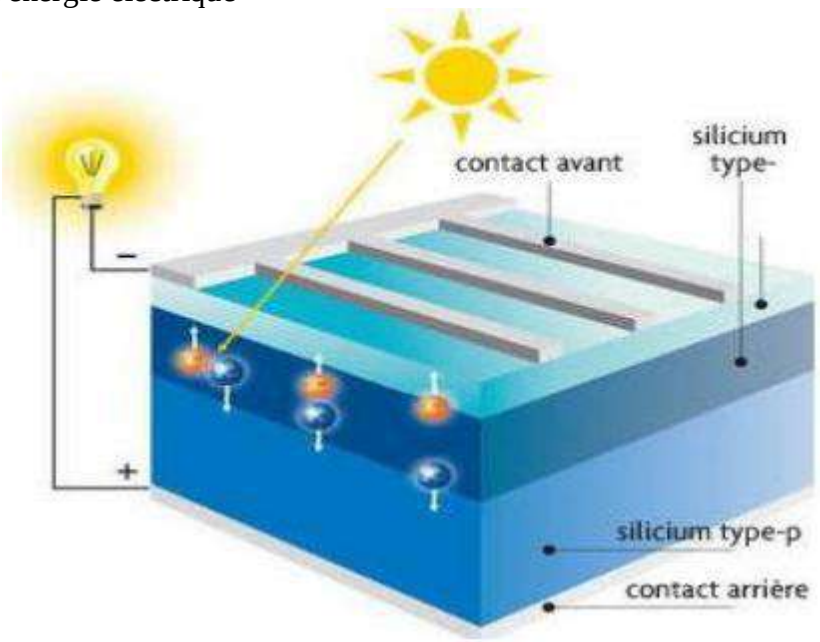


***Figure XI**:Principe de conversion photovoltaïque*

3.1.3 Le module photovoltaïque:

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure(XI). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même Courant, tandis que la mise en parallèle accroit le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère, EVA (éthylène- vynil- acétate) figure(XI)et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'un ou de polyéthylène

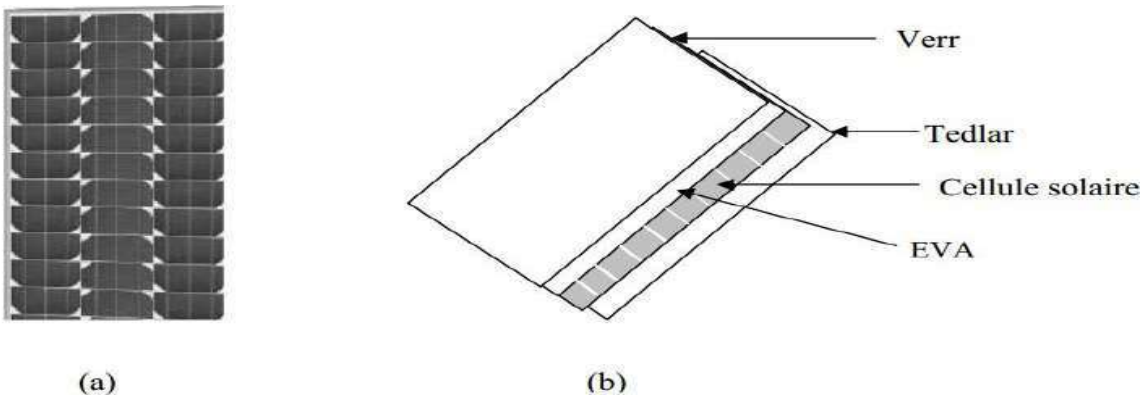


***Figure XII**: Module photovoltaïque*

a Module photovoltaïque

b Cellule solaire

3.1.4 Cellules photovoltaïque:

Pour les producteurs de cellules et de panneaux solaires, c'est une chance puisque l'achat de Silicium représente lamoitié de leurs dépenses.

Les panneaux photovoltaïques sont composés de cellules photovoltaïques de silicium monocristallin, poly cristallin ou amorphe. La grande différence réside dans la procédure de fabrication

- *Les cellules monocristallines:*

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un taux de rendement de 12 à 16%, mais la méthode de production est laborieuse et difficile et donc très cher, car il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur

Les cellules poly cristallines: Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations

Différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de11 à 13%, mais leur coût de production et moins élevé que les cellules monocristallines

c- Les cellule sa morphes: Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 10%. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium.

On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe qu'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits

La figure(XII) suivante nous résume les différents types de cellules photovoltaïques

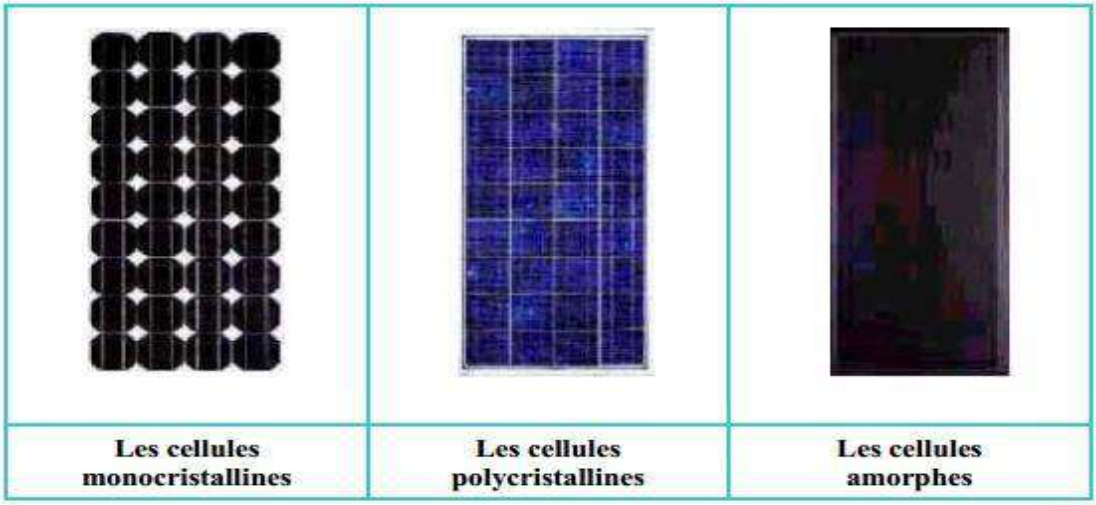


Figure XIII*: Types de cellules photovoltaïques*

3.1.5 .l'onduleur:

L'onduleur est alimenté directement par la batterie et débite sur des récepteurs en courant alternatif. L'onduleur transforme la tension continue des batteries en tension alternative qu'alimentent les récepteurs en courant alternatifs: téléviseurs vidéo ou réfrigérateur. Les onduleurs diffèrent par la forme d'onde du courant électrique qu'ils délivrent carrée, sinus reconstitué, la forme sinusoïdale étant la norme habituelle de: l'électricité fournie par le réseau électrique.

Les onduleurs à onde « non sinus» génèrent des harmoniques qui peuvent endommager dans les

cas extrêmes certains appareils électriques. Un convertisseur DC/ AC peut être couplé soit au Régulateur soit directement à la batterie, il doit alors être muni d'un dispositif anti-décharge profonde Les caractéristiques principales d'un onduleur sont les suivantes:

- Puissance nominale à 20°C en VA.
- Tension nominale d'entrée en Vcc.
- plage de la tension d'entrée en V.
- protection tension d'entrée basse en V
- Puissance de démarrage admissible en %.
- Intensité maximale admissible en A.
- Tension nominale de sortie en Vca.
- Plage de tension de sortie.
- Onde de sortie
- Fréquence nominale de sortie en HZ.
- Rendement maximal, généralement de l'ordre de 90%

3.1.6 Les batteries :

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet:

-La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande.

- l'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/ nuit, été/ hiver) et aléatoire (conditions météorologiques)

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes:

1- Autonomie: Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.

2- Courant desur charge: Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3à5 fois supérieur au courant d'utilisation

3- Stabilisation de la tension : Une batterie permet de fournir une tension constante, en élimination écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée

3.2 Différentes configuration des systèmes PV:

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants:

- un générateur photovoltaïque
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC)
- un système de régulation et de stockage
- un source auxiliaire d'appoints

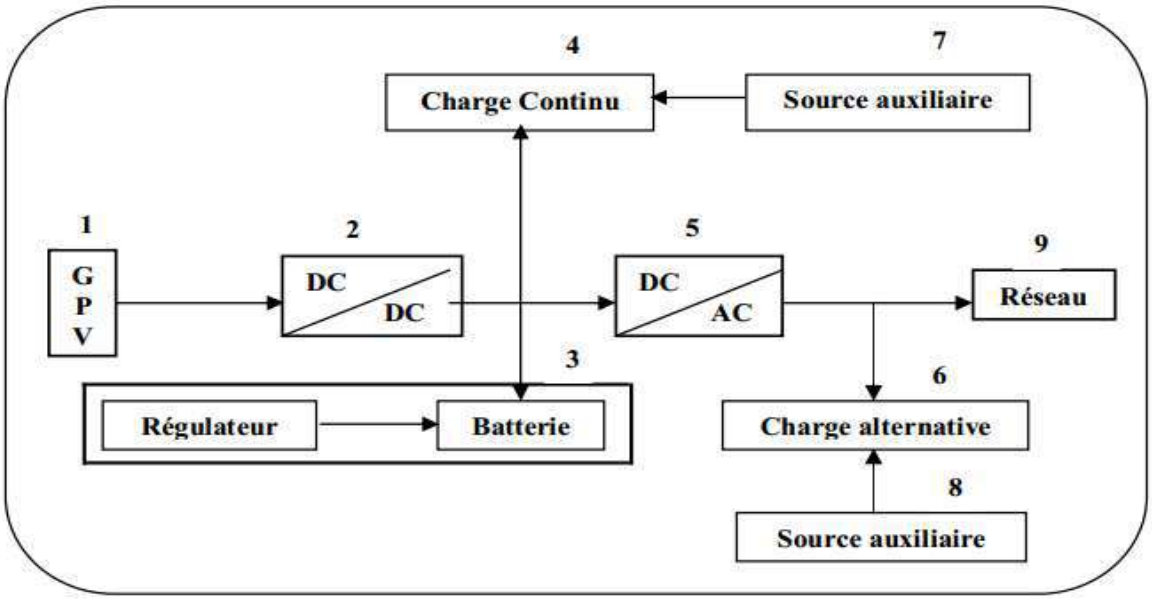


***Figure XIV**:Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque*

système autonome sans batterie:

Le système photovoltaïque autonome sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimente directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge **I.3.2. système autonome avec batterie:**Ces système sont représentés par les blocs [(1),(3),(4)]dans le cas où la charge et de type continu et les blocs[(1),(3),(5),(6)]si la charge et de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire

3.2.1 Système fonctionnant au fil du soleil :

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu [(1),(2),(4)].si la charge et de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1),(5),(6)]

3.2.2 Système avec appoint électrique:

pour ces système on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu' en cas d' insuffisances d'énergie électriques (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées) ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)];[(9),(7),(4),(3),(2),(1)]et ou de type alternatif [(1),(2),(3),(5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)].Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie

3.3 Modélisation électrique de générateur photovoltaïque

Le capteur photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques courant tension I-V ; cette modélisation est généralement utilisée pour approximer la sortie du capteur (tension, courant) en fonction des deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu par le capteur. Le courant fourni par le module photovoltaïque à une température donnée dépend uniquement de l'irradiation solaire et de la température de la cellule. Ainsi la caractéristique I-V du générateur photovoltaïque est basée sur celle d'une cellule élémentaire, modélisée par un circuit électrique. Pour déterminer le courant et la tension du module, nous utilisons le modèle développé parBorowy et Salameh en 1996. Ce modèle est basé sur le circuit équivalent à une diode (figXV), et à partir duquel la puissance horaire produite par le module, est déterminée à partir de l'éclairement reçu par le module, de la température ambiante et des caractéristiques du module

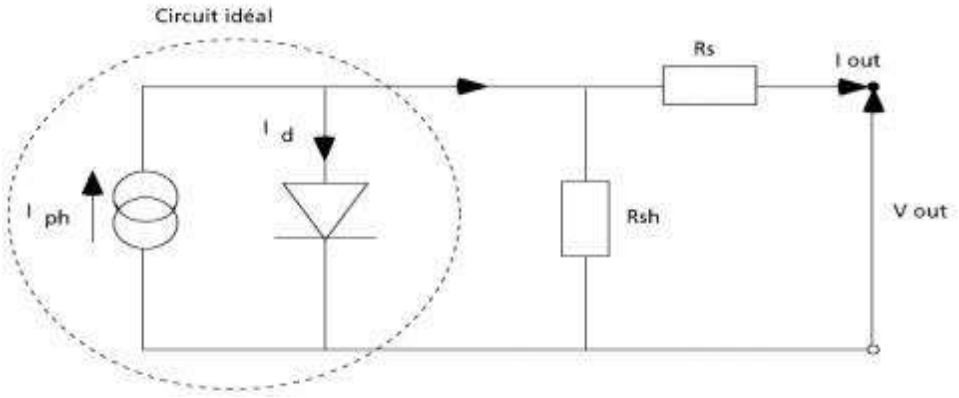


***Figure XVI**:Schéma équivalentd'une cellule photovoltaïque*

3.3.1 Influence de l'ensoleillement et de la température

a) Influence de l'ensoleillement:

Nous avons vu que le courant produit par la photopile (Iph) est pratiquementproportionnel au flux lumineux (ø). Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est

fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour Tj = 25 °C). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

-la puissance optimale de la cellule (Pm) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement;

-les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (voir figure XVII)

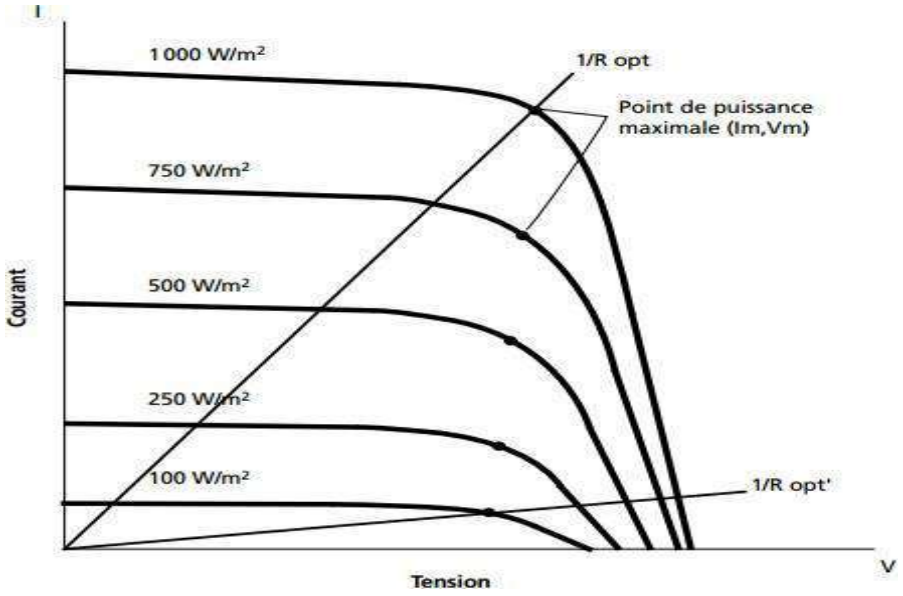


***Figure XVIII**:Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V*

b) Influence de la température:

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur (voir figure XIX). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm2/°C alors que la tension décroît de 2,2 mV/°C/cellule. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ 0,4%/°C. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque

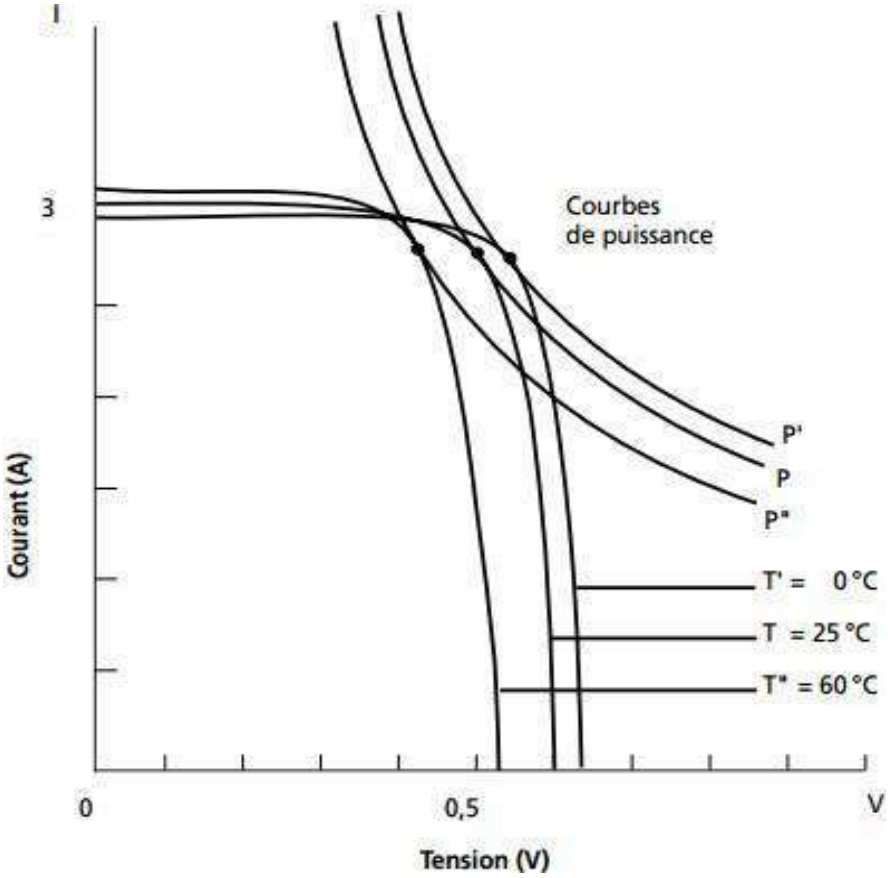


***Figure XX**:Influence de la température sur la courbe I-V*

3.4 Avantages/Inconvénients du photovoltaïque:

3.4.1 Les avantages:

- S'alimente des rayonnements du soleil et non de la chaleur, ce qui facilite sont utilisation dans les pays chauds comme dans les pays froid, en altitude comme en plaine.
- L'avantage majeur est le caractère inépuisable de cette énergie, contrairement au bois par exemple.
- D'un point de vue esthétique, les panneaux s'intègrent relativement bien.
- Pas d'entretien après 25 ans.
- Relativement simples et rapides à installer.
- Un système de capteur photovoltaïque peut produire jusqu'à80% des besoins d'énergie chauffage compris. Aucune modification du système de chauffage n'est nécessaire.
- Totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.

- Aucun mouvement, pas de pollution directe, aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité

3.4.2 Les inconvénients:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour de faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire le coût du générateur photovoltaïque et accru

3.5 MODELISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

3.5.1 Modèle de la cellule

En omettant les détails sur les explications du phénomène physique intervenant dans la conversion de la lumière en électricité, le schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la figureXXI Ce circuit est constitué d'une source de courant et d'une diode montée en parallèle. La source de courant délivre un courant Iph, directement proportionnel à l'intensité de la lumière, la diode représente la jonction p-n de la cellule solaire.

L'équation I-V du schéma (Fig. XXII) déduite directement à partir de la loi de Kirchhoff est :

$$I = I_{ph} - I_S\left(e^{\frac{qV}{mkT}} - 1\right) \qquad (\text{III}.8)$$

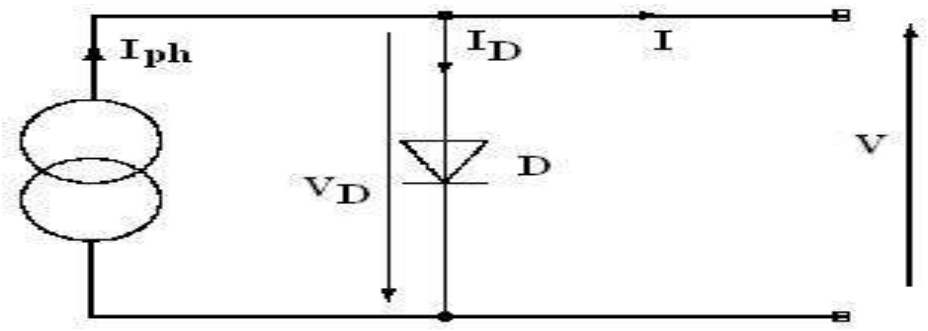


***Figure XXIII**: Schéma électrique équivalent simple d'une cellule photovoltaïque*

Deux résistances sont introduites dans le schéma, elles influencent la caractéristique I-V de la cellule :

- Rs Résistance série liée à l'impédance des électrodes et du matériau. Il en résulte une tension V différente de la tension aux bornes de la jonction p-n.
- Rsh Résistance shunt correspondant à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction. Il en résulte qu'une partie du courant Iph sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge.

L'équation complète de la cellule photovoltaïque s'écrira donc (le modèle bien connu à une diode) :

$$I = I_{ph} - I_s\left(e^{\frac{V+R_sI}{mV_T}} - 1\right) - \left(\frac{V + R_sI}{R_{sh}}\right) \quad (\text{III.9})$$

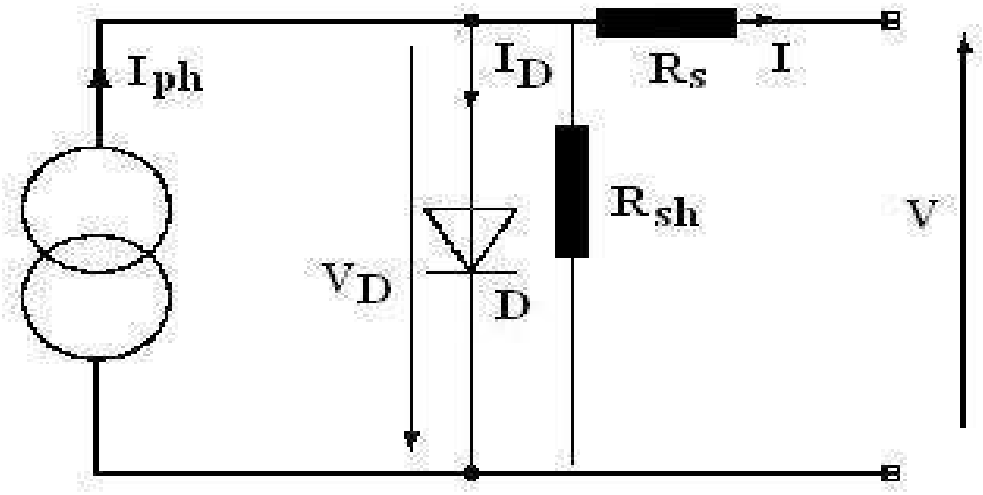


***Figure XXIV**:Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque*

3.5.2 Procédure expérimentale

En soumettant des cellules photovoltaïques à une lumière et en mettant une charge R à leurs bornes (Fig XXV), on mesure le courant et la tension produite par le module en fonction de divers paramètres (intensité de la lumière, spectre, charge, ...). On s'intéressera notamment au rendement, donné par le rapport entre la puissance P absorbée par le module et la puissance incidente Pinc, et on va aussi chercher la résistance R de la charge idéale correspondant à la puissance maximale fournie pour rendre le rendement maximal.

Le module dont on dispose contient 4 cellules disposées en parallèle. La surface utile est de 50 cm2, et les cellules sont au silicium polycristallin.

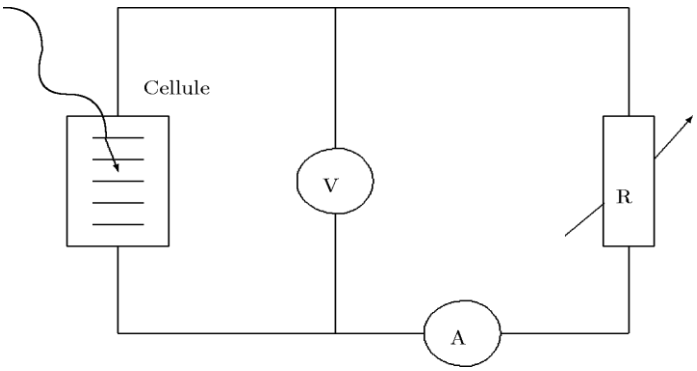


***Figure XXVI**:Schéma du dispositif expérimental*

Pour calculer le rendement d'un module, on doit connaître la puissance incidente; elle est mesurée avec un capteur qui donne une tension à la sortie proportionnelle à la puissance de la lumière. En mesurant la tension avec un voltmètre on a directement la valeur de l'irradiation.

En faisant varier la charge R aux bornes de la cellule (module), on retrouve la courbe caractéristique I-V du module (FigXXVII). Les caractéristiques principales (Vc, Icc, Pmax,...) peuvent être déduites. Pour la modélisation d'une cellule du panneau, un programme est nécessaire.

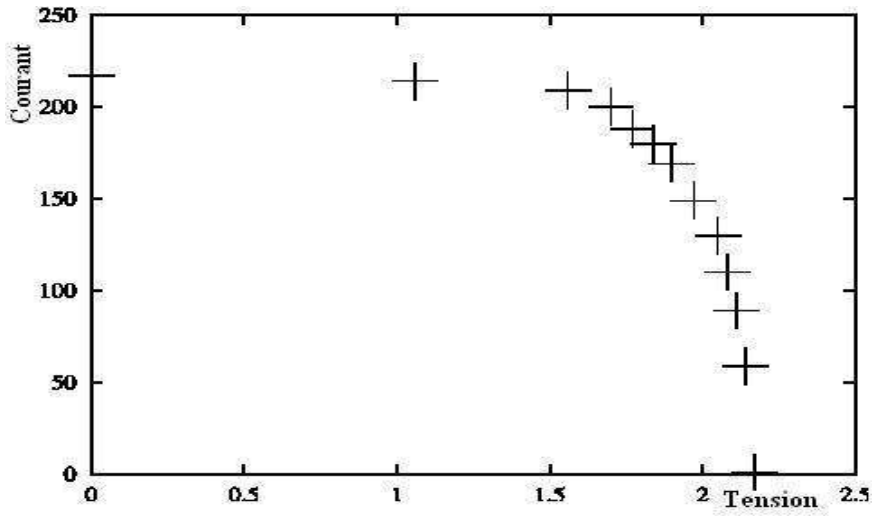


***Figure XXVIII**:Courbe I-V du panneau à la lumière du soleil (Irradiation = 717 W/m2)*

La courbe est différente pour chaque source de lumière. A titre d'exemple, pour une lampe à incandescence la valeur de Is est de 1.84 10-4A, alors que pour la lumière du soleil elle est aux environs de 3.04 10-4A.

3.5.3 Modélisation mathématique

Ayant la courbe caractéristique du module, la recherche des grandeurs inconnues de l'équation (III. 9) est possible. Nous développons l'algorithme suivant.

En premier lieu, supposons que le module soit idéal : on néglige la résistance shunt et la résistance série. Considérons aussi comme première approximation Iph = Icc (courant de court- circuit). En ne considérant que les points expérimentaux Vi supérieurs à Vc/2, le terme exponentiel est bien supérieur à 1, après simplification de l'équation 1 on obtient la relation suivante :

$$I = I_{cc} - I_S e^{V/mV_T} \quad (III.10)$$

En réarrangeant les termes, cette équation peut se linéariser sous la forme :

$$\mathrm{Ln}(I_{cc} - I) = \mathrm{Ln}(I_s) + \frac{1}{m}\frac{V}{V_T} \qquad (III.11)$$

Une régression linéaire est effectuée en ne prenant que les points supérieurs à Vc/2, on obtient ainsi à partir de la pente et l'ordonnée à l'origine les valeurs de m et Is. Ces valeurs constituent une estimation initiale des valeurs recherchées.

La résolution mathématique de l'équation (III. 9) décrivant le comportement d'une cellule photovoltaïque donne l'équation suivante :

$$I = -\frac{mV_T}{R_s} LambertW\left(\frac{R_s I_s R_{sh}}{mV_T(R_s+R_{sh})} e^{\frac{R_{sh}\left(R_s I_{ph}+R_s I_s+V\right)}{mV_T(R_s-R_{sh})}}\right) - \frac{VR_S - R_s I_{ph} R_{sh} - R_s I_s R_{sh}}{R_s(R_s+R_{sh})} \qquad (III.12)$$

Lambert W est la fonction W de Lambert, définie par W(x) × e W(x) = x . On obtient aussi une autre solution par rapport à la tension :

$$V = -mV_T \text{ LambertW}\left(\frac{I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}-I+I_s)}{mV_T}}\right) - IR_s + (I_{ph} + I_s - I_s)R_{sh} \quad (III.13)$$

Bien que la seconde solution apparaît plus simple, d'un point de vue numérique la première est meilleure, ceci est causé par la précision de calculs des compilateurs, qui est limitée. Chaque type réel a une plage définie, la seconde solution pose problème, car généralement la valeur de Rsh est très grande, augmentée d'un terme exponentiel, celle-ci dépasse la limite admise pour les types réels des logiciels de calculs. Donc pour le calcul numérique, on utilisera la première expression.

A partir de l'équation (III. 13), on peut déduire l'équation décrivant la tension de circuit ouvert Vc:

$$V_c = I_{ph}R_{sh} - mVV_T \text{ Lambert W}\left(\frac{I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{mV} V_T}\right) + I_s R_{sh} \quad (III.14)$$

Et l'intensité du courant en court-circuit est exprimée par la relation :

$$I_c = \frac{mV_T}{R_s} \text{ Lambert W}\left(\frac{R_s I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh} R_s (I_{ph}+I_s)}{mV_T(R_s+R_{sh})}}\right) + \frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{(R_s+R_{sh})} \quad (III.15)$$

La tangente au point Vc est :

$$\left.\frac{\partial V}{\partial I}\right|_{I=0} = -R_s + R_{sh}\left(\frac{\text{Lambert}\left(I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{mV_T}}\right)}{1 + \text{Lambert}\left(I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{mV_T}}\right)} - 1\right) \quad (III.16)$$

A partir des estimations initiales des paramètres Iph, Is et m ainsi qu'en combinant l'équation 5, nous obtenons une estimation initiale de la résistance shunt par l'expression :

$$R_{sh} = -V_c\left(-I_{ph} - I_s + I_s e^{\frac{V_c}{mV_T}}\right)^{-1} \quad \text{(III. 17)}$$

Aussi en combinant l'équation (III. 13), nous obtenons une estimation initiale de la résistance série, la valeur de la tangente est déduite à partir des résultats expérimentaux.

$$R_s = -\frac{\left(R_{ph} + tg + tg\ \text{Lambert W}\left(\frac{I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{mV_T}}\right)\right)}{\left(1 + \text{Lambert W}\left(\frac{I_s R_{sh}}{mV_T} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph}+I_s)}{mV_T}}\right)\right)} \quad \text{(III. 18)}$$

Cette gymnastique mathématique permet d'avoir une estimation initiale de toutes les grandeurs intervenant dans la modélisation du panneau photovoltaïque. Une méthode des moindres carrés non-linéaire est à appliquer pour obtenir les valeurs finales de ces paramètres. Dans ce but, on a opté pour l'algorithme de Powell
Avec cette méthode, pour le panneau dont nous disposons, nous avons obtenu les résultats suivants :

Rs = 6 10-17 Ω, Rsh = 1015 Ω, Is = 3.3159 10-6 A, Iph = 0.217969A, m = 1.9705 .
Ces résultats démontrent que le module utilisé peut être considéré comme idéal. La résistance série est très faible et la résistance shunt très importante. Donc, le courant Is est très faible devant le courant photovoltaïque Iph. De plus le facteur d'idéalité est proche de 2.
Nous abordons dans ce qui suit la modélisation du second élément du système de production d'hydrogène, l'électrolyseur.

3.6 . MODELISATION DE L'ELECTROLYSEUR

L'électrolyseur que nous utilisons est de type PEM (Proton Exchange Membrane). De manière générale, l'opération d'électrolyse consiste à diviser une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent, l'eau est divisée en hydrogène et oxygène gazeux. Dans un électrolyseur PEM, c'est la membrane qui transporte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux. Avec ce procédé l'électrolyse de l'eau distillée ou de la vapeur d'eau est possible.

3.6.1 Procédure expérimentale

L'électrolyseur est connecté au générateur DC. Il est préférable de débuter l'expérience Avec le voltage le plus élevé U = 2 V et de diminuer progressivement. En début d'opération la Valeur du courant peut être élevée, après environ 1 minute le système devient stable.
Les valeurs du courant et de la tension sont enregistrées et la courbe caractéristique de L'électrolyseur est tracée (FigXXIX).

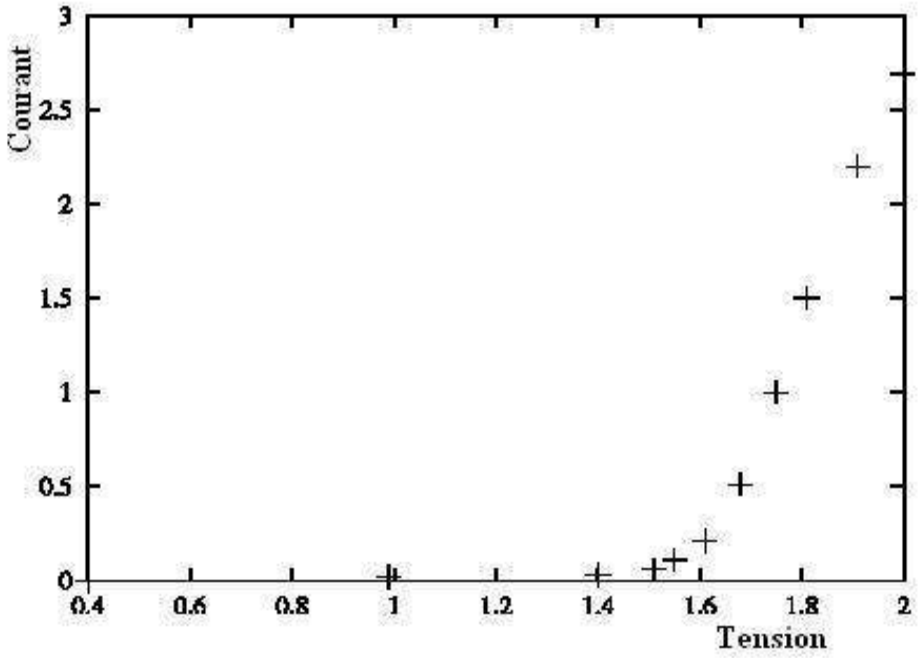


***Figure XXX**:Courbe I-V de l'Electrolyseur*

3.6.2 Modélisation de l'électrolyseur

Ayant obtenu expérimentalement la courbe I-V de l'électrolyseur, nous décrivons le comportement électrique par les équations mathématiques adaptées Soit " a " le coefficient correspondant à l'établissement du régime de l'électrolyseur :

$$\begin{aligned} V_{cel} < a \quad & I_{cel} = bV_{cel}^{c} \\ V_{cel} \geq a \quad & I_{cel} = dV_{cel} + e \end{aligned} \qquad (\text{III. } 19)$$

Nous obtenons ainsi les coefficients suivants :

a = 1.6100 ; b = 1.059328 10-2 ; e = - 10.516734 ; c = 4.9032 ; d = 6.651525

L'algorithme utilisé dans ce cas pour obtenir ces coefficients est une modification de L'algorithme de Csendes d'optimisation globale par la méthode des intervalles. Cette Méthode est très puissante et permet de converger vers la solution en peu de temps comparé à D'autres techniques, mais la principale difficulté est l'estimation initiale de l'ordre de grandeur des coefficients.

Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons étudié la technologie photovoltaïque, commençant par le principe de calcul de l'énergie solaire.

Ensuite on a expliquéle fonctionnement des cellules photovoltaïque et ses différents types et ses caractéristiques.

Le système photovoltaïque possède plusieurs types de configuration selon l'utilisation et selon le mode de stockage.

Chapitre IV : Dimensionnement et simulation de système étude

4 INTRODUCTION

la machine Learning, ou apprentissage statistique, est un domaine de la modélisation statistique et de l'intelligence artificielle.

L'objectif du machine Learning est de reconnaître parmi des données une structure ou un modèle stochastique ou déterministe) du phénomène **à l'origine** de ces données, souvent trop difficiles à détecter ou à mesurer manuellement. À partir de ces structures, on peut chercher à classifier des individus, des objets, à prédire la valeur d'une variable à un certain horizon, à expliquer l'apparition ou non d'une caractéristique.

Le machine Learning est par exemple utilisé pour :

- prédire la quantité de ventes d'un produit sur les trois prochains mois, en fonction des ventes observées sur le même produit dans le passé,
- Prédire le taux de production d'un produit en fonction du changement des conditions météorologique ou bien en fonction des différentes dimensions du matériel utilisé.
- reconnaître automatiquement un chiffre manuscrit ou un visage.

Au-delà d'une ou deux variable, il devient difficile de voir à l'œil nu des structures dans les données, Le machine Learning, combiné aux méthodes récentes de big data, permettent en effet de traiter des jeux de données de plus en plus volumineux, tant en termes d'observations que de variables.

Parmi les algorithmes de modélisation statistique les plus connus, nous trouvons la régression linéaire, la régression logistique, les arbres de classification et de régression, l'analyse factorielle, le support Victor machine, les réseaux de neurones… Il existe également de nombreuses façons de combiner ces méthodes afin d'en trouver une meilleure.
Dans notre travail, nous avons modéliser le taux de production d'hydrogène en fonction des différentes conditions météorologique et différentes dimensions du panneau alors on va construire un modèle de prédiction pour l'ensemble de donnée qu'on a obtenu a partir des expérimentations.
Les résultats présentés dans ce chapitre sont basées sur une analyse technico-économique effectuée sous Python.

4.1 Modélisation de la Production d'hydrogène par la Machine Learning :

4.1.1 Les données de système:

Ci-dessous des représentations graphiques de nos données expérimentales

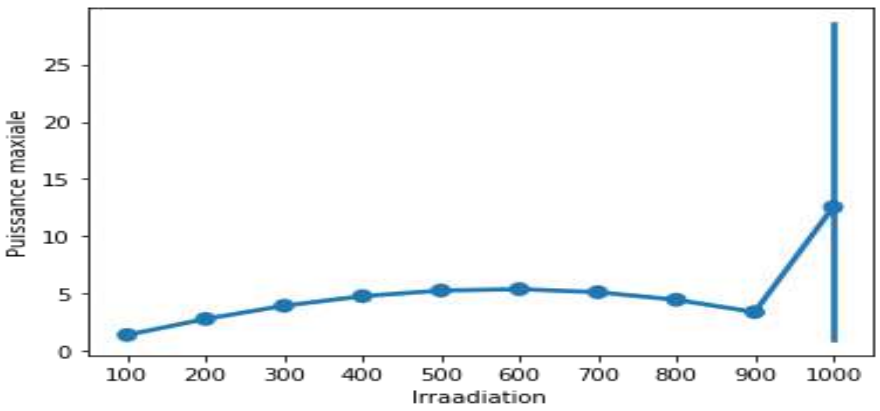


Figure XXXI la puissance maximale en fonction du Irradiation

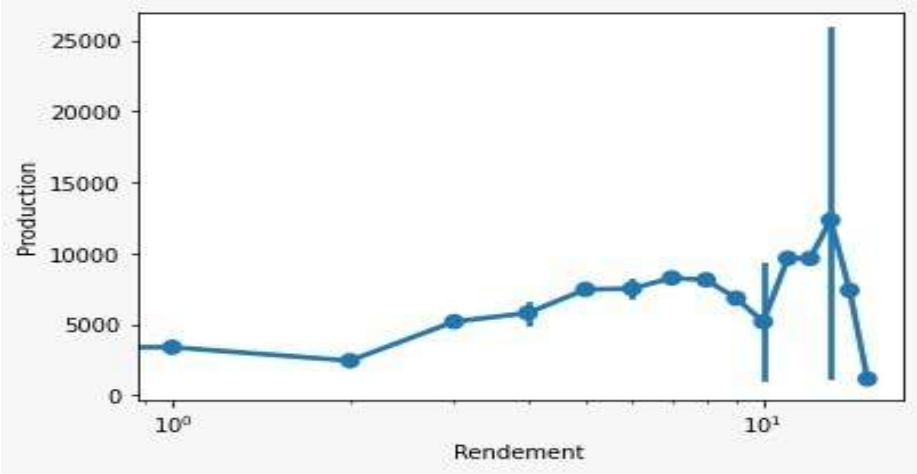


Figure XXXII la production d'hydrogène en fonction du rendement

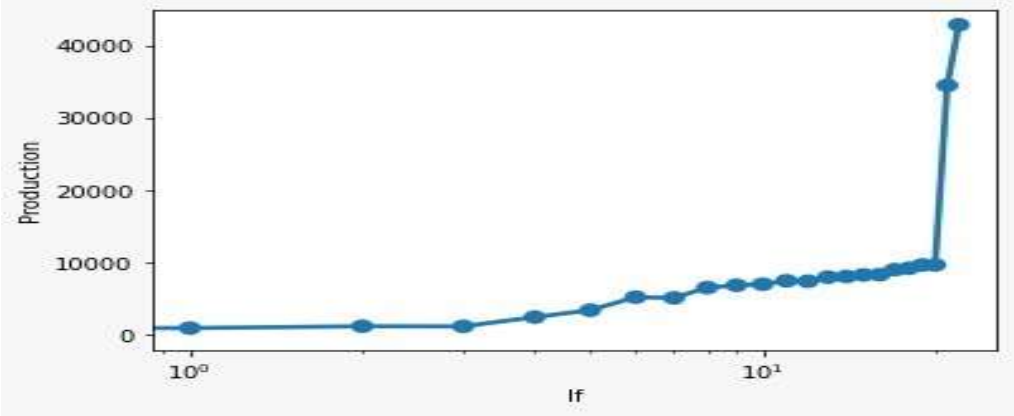


***Figure XXXIII** : la production d'hydrogène en fonction du l'intensité au point de fonctionnement*

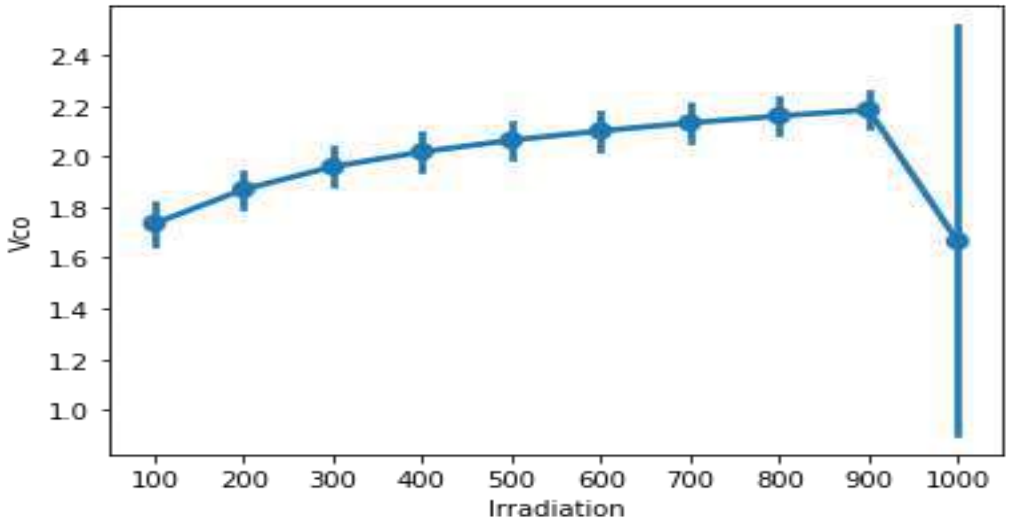


***Figure XXXIV** : la tension de circuit ouvert en fonction du Irradiation*

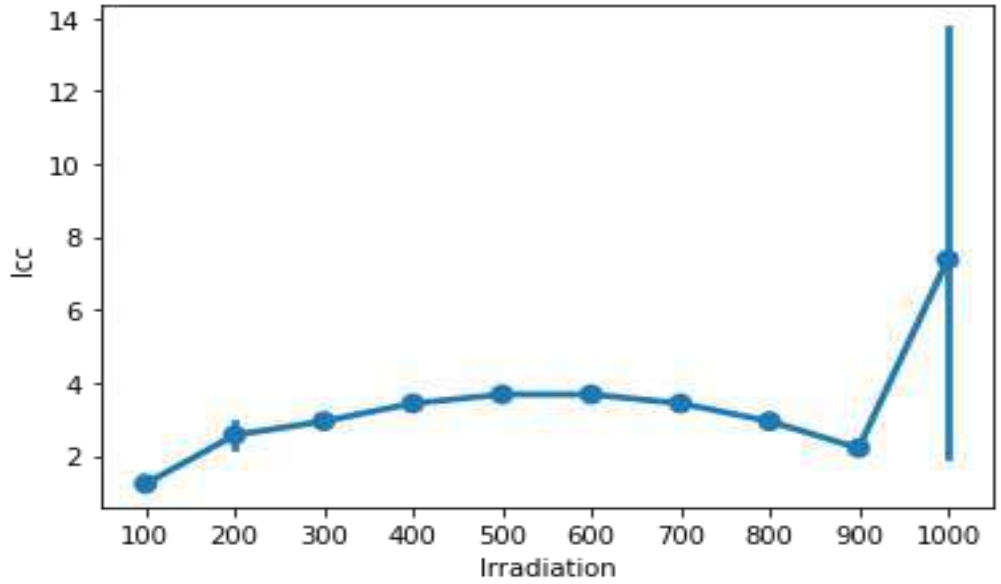


***Figure XXXV** : Intensité de court-circuit en fonction du Irradiation*

Les étapes de système

On a suivre quelque étapes ;

4.2 Analyse exploratoire et visualisation et prétraitement des données

Dans cette étape on a essayé d'analyser les données qu'on va utiliser dans notre modèle, tel que : l'irradiation (Irr) et la température(Temp) , le nombre de cellules en série (Ns) et le nombre de cellules en parallèles (Np) et cela pour voir les paramètres qui influencent sur le taux de production de l'hydrogène.

Pour comprendre les données, nous avons examiner certains faits clés concernant diverses variables, y compris leur relation avec la variable cible, c'est-à-dire la production.

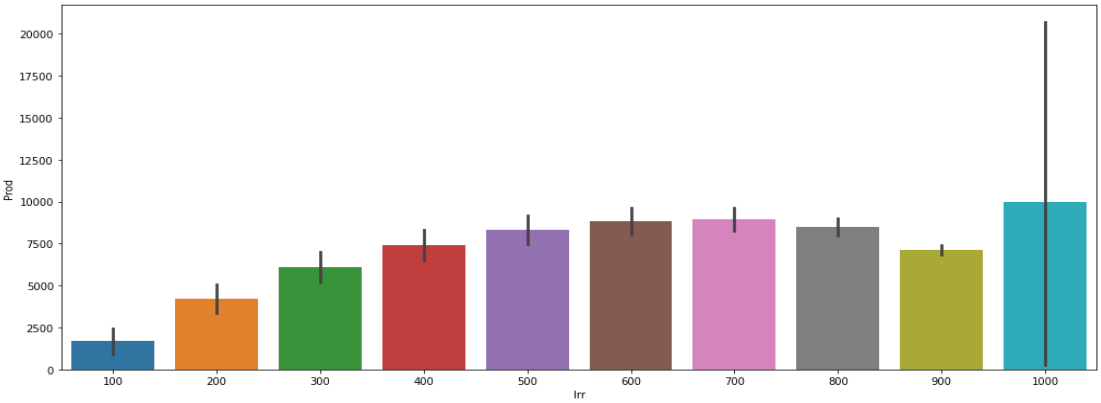


***Figure XXXVI** : la production d'hydrogène en fonction du Irradiation*

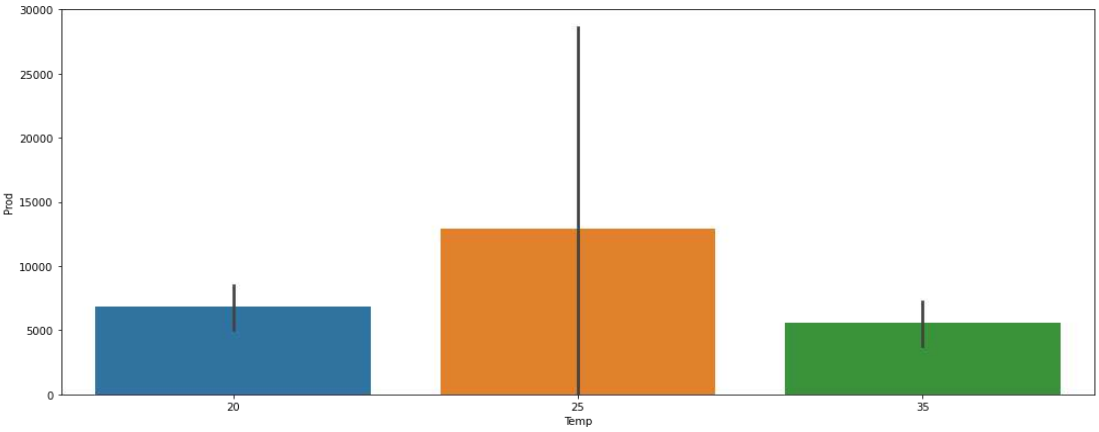


***Figure XXXVII** : la production d'hydrogène en fonction du la température*

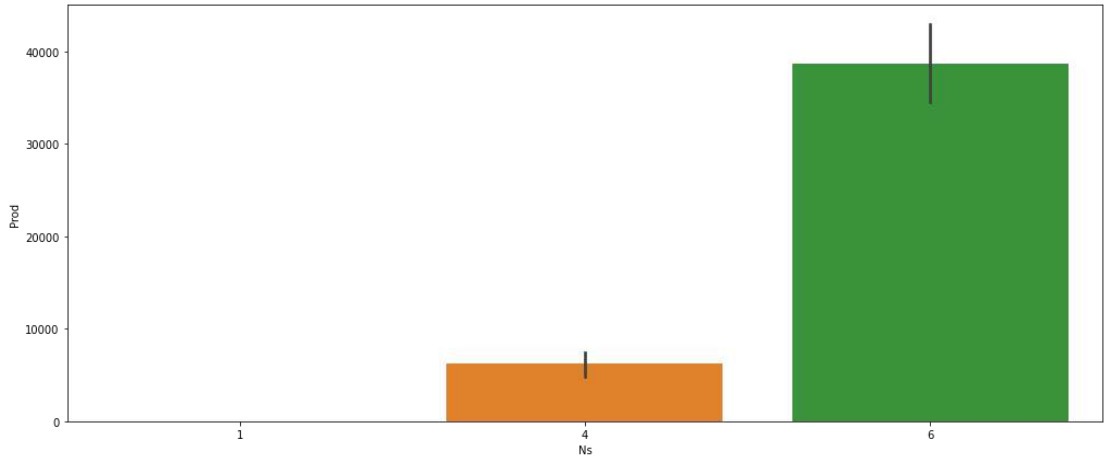


***Figure XXXVIII** : la production d'hydrogène en fonction du nombre de cellules en serie*

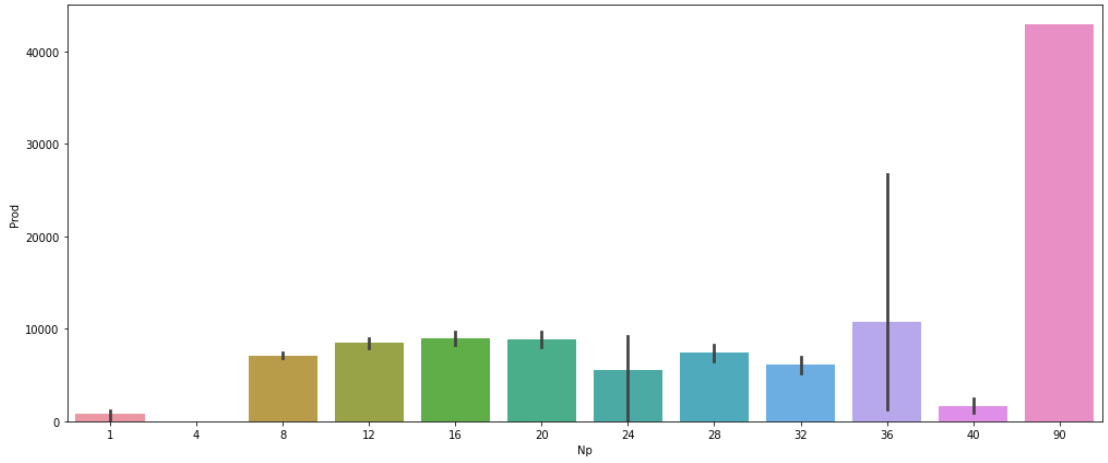


***Figure XXXIX** la production d'hydrogène en fonction du nombre de cellules en parallèles*

Puis nous avons assemblé les données finales pour la modélisation en divisant l'ensemble de données par lignes en test et d'entrainement afin d'avoir un ensemble sur lequel nous avons effectué l'évaluation du modèle. L'ensemble de données est également divisé en colonnes dans une matrice (X) contenant les données d'entrée et un vecteur (y) contenant la cible (ou les étiquettes).

```
[11]: #manipulation des données et divisions des données en training et test

m=[]
for i in df.columns.values:
    m.append(i.replace(' ','_'))
   # df.columns = m
X = data[features]
Y = data[target]
Train_X, Test_X, Train_Y, Test_Y = train_test_split(X, Y, train_size=0.8, test_size=0.2, random_state=1)
Train_X.reset_index(drop=True,inplace=True)

print('Original set  ---> ',X.shape,Y.shape,'\nTraining set  ---> ',Train_X.shape,Train_Y.shape,'\nTesting set   ---> ',

Original set  --->  (26, 4) (26, 1)
Training set  --->  (20, 4) (20, 1)
Testing set   --->  (6, 4)  (6, 1)
```

4.3 Apprentissage automatique et construction des modèles :

Dans cette étape, nous avons sélectionné les modèles que nous voulons essayer, puis utiliser de données d'apprentissage pour entrainer ce modèle et ainsi vérifier les performances du modèle à l'aide du dataset de test.

Quelques exemples de model de machine Learning, qu'on a testé :

- la régression linéaire ;
- K-nn ;
- les Support Victor Machine (SVM) ;
- les réseaux de neurones ;

- les random forests.

Nous avons commencé par l'importation des bibliothèques nécessaires et l'importation du fichier contenant nos données.

Après l'entrainement de chaqu'un de ces models on a mesurer sa precision et on a le tester .

```
[12]: #Importing Linear Regression model from sklearn
      from sklearn.linear_model import LinearRegression
      regressor = LinearRegression()
      regressor.fit(Train_X,Train_Y)  #Fitting training data

[12]: LinearRegression()

[13]: predict = regressor.predict(Test_X)
      regressor.score(Train_X,Train_Y)

[13]: 0.8916368340206833

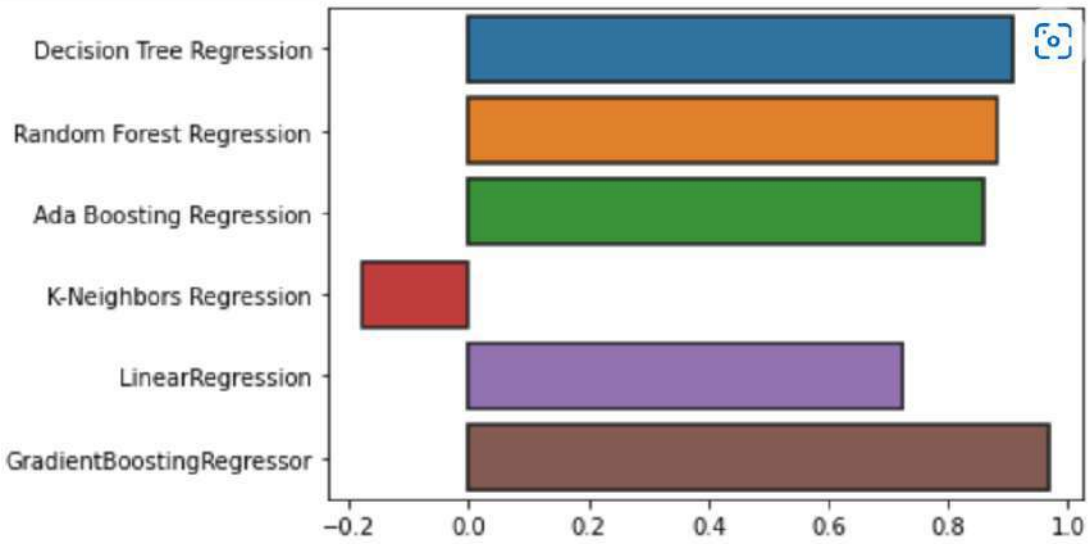
[14]: df = pd.DataFrame({'Actual': Test_Y.values.flatten(), 'predictions':predict.flatten()})

      df
```

[14]:

	Actual	predictions
0	6833.803	7916.950873
1	6511.071	5586.335591
2	7958.798	7450.827816
3	8307.897	6782.984947
4	2.406	1754.752793
5	909.445	4187.966422

on a pu faire une comparaison entre ces deniers en terme de precision et exactitude pour la prediction du production.



4.4 implémentation du DNN

les réseaux de neurones profonds(DNN) : ont été inventés. Plutôt que de se contenter d'une seule couche cachée, les Deep Neural Networks vont encore plus loin en combinant de multiples couches cachées pour encore plus de bénéfices.
Nous avons créé et implémenté un model DNN contiendront quelques couches de plus que le modèle linéaire

- La couche de normalisation,
- Deux couches cachées, non linéaires et Dense avec la non-linéarité de la fonction d'activation ReLU (relu).
- Une couche Dense linéaire à sortie unique.

Ci-dessous une capture d'une partie de notre model DNN

```
from tensorflow import keras
from tensorflow import keras
from tensorflow.keras import layers
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
def build_and_compile_model(norm):
    model = keras.Sequential([
      norm,
      layers.Dense(16,input_dim=4, activation='relu'),
      layers.Dense(64, activation='relu'),
      layers.Dense(1)
```

Apres l'entrainement de notre model on a comparer entre les valeurs prédits et les valeurs de test qu'on a introduit pour mesurer sa précision.

```
[ ]: test_predictions = dnn_model.predict(Test_X).flatten()
     print(test_predictions)
     #a = plt.axes(aspect='equal')
```

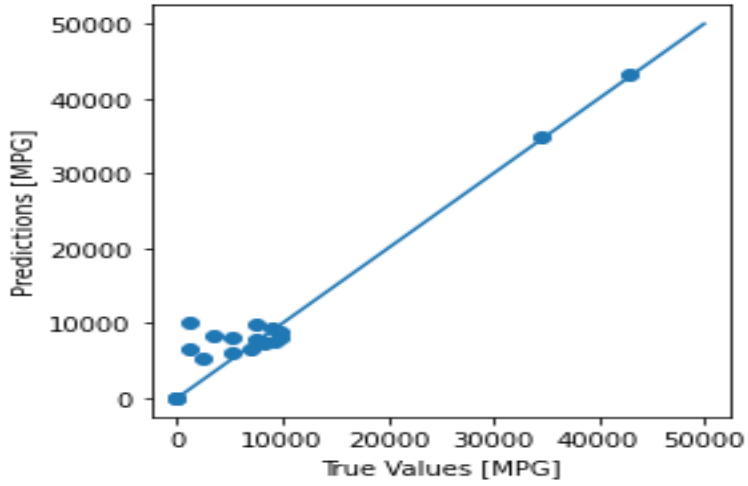
```
[26]: df = pd.DataFrame({'Actual': Test_Y.values.flatten(), 'predictions':test_predictions.flatten()})

      df
```

[26]:

	Actual	predictions
0	6833.803	7104.625000
1	6511.071	7935.214355
2	7958.798	7270.742676
3	8307.897	7066.599121
4	2.406	1.550568
5	909.445	8433.568359

Nous avons ensuite testé notre model avec des données prises aléatoirement de notre base de données et nous avons comparé les valeurs cibles exactes et les valeurs prédites, nous avons obtenu ce graphe.



Nous avons constaté que notre prédit raisonnablement bien.
Nous avons essayé de faire une prédiction avec notre modele DNN conçu pour une température qui varie entre 20 et 70 et pour Ns = 4 et Np de 20 a 40 et une irradiation de 100.

```
[32]: data = pd.read_csv('test2.csv',sep = ';')
      Test2=data
      print(Test2)
```

```
   Irr  Temp  Ns  Np
0  100    20   4  40
1  100    30   4  36
2  100    40   4  32
3  100    50   4  28
4  100    60   4  24
5  100    70   4  20
```

```
[ ]: test_predictions = dnn_model.predict(Test2).flatten()
     print(test_predictions)
```

```
[565]: df = pd.DataFrame({ 'predictions':test_predictions.flatten()})

       df
```

[565]:

	predictions
0	5083.222168
1	6748.023926
2	9917.301758
3	13736.908203
4	17603.511719
5	21470.117188

nous avons obtenu ce graphe:

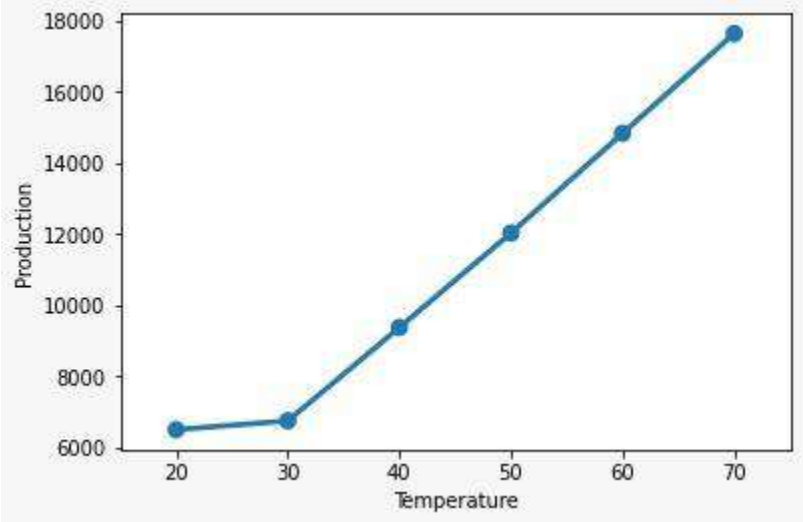


***Figure XL** : la production d'hydrogène en fonction du nombre de température*

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons modélisé le taux de production d'hydrogène en fonction des différentes conditions météorologique et différentes dimensions du panneau, pour cela nous avons établis un programme dans le logiciel Python. L'efficacité de l'électrolyseur est améliorée par l'augmentation de la température de Fonctionnement. La valeur de la température étant limitée par la structure technique de l'électrolyte qui est dans notre cas une membrane échangeuse de proton. Les débits d'oxygène et d'hydrogène produits par l'électrolyseur sont inhérents à la température de fonctionnement et à l'état saturé ou non de la membrane. Une régulation on/off de l'électrolyseur est recommandée pour les différentes saisons.

Conclusion générale

Conclusion générale

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 parle secteur énergétique et les transports, le recours à l'hydrogène (H2) comme vecteur énergétique est l'une des solutions envisagées pour l'avenir énergétique.

Si on ne regarde que du point de vue de l'utilisation, l'hydrogène semble être la meilleure solution pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. En effet, l'hydrogène semble inépuisable et est présent partout sous forme d'eau, De plus, il ne crée a priori aucune pollution.

L'électrolyse de l'eau est le moyen le plus propre pour l'obtenir. Dans cette étude, la technologie liée à l'hydrogène solaire a été évaluée d'un point de vue technique. Les principaux éléments constituant le système n'étant pas encore commercialisés, l'évaluation économique de ce type de système a été délibérément omise.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la méthode de production d'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque et l'électrolyseur.

L'électrolyseur à Membrane polymère est considéré par beaucoup comme une technologie d' avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les piles à combustibles de Technologie PEM, et de la réduction des coûts associée. Cette technologie reste encore peu Employée au regard de la production mondiale d'hydrogène. Tout cela justifie la poursuite des travaux de recherche.

L'objectif global de note travail est l'étude d'un système photovoltaïque en vue de produire le Maximum de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, la production d'énergie électrique est assurée par Les panneaux photovoltaïques.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Assani Dahouenon, M. (2011). Le manuel du Technicien Photovoltaïque. PERACOD, Dakar et Sénégal.
[2]Baghdadi, F. (2011). Modélisation et simulation des Performances d'une installation hybride de conversion d'énergies. Mémoire de Magister en Génie mécanique. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
[3] Belatel, M. Aissous, Z etFerhat, F. (2012). Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte. Des Energies Renouvelables, 1, 13-28.
[4] Belghitri, H. (2010). Modélisation et simulation optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque. Mémoire de Magister en physique énergétique et matériaux. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen.
[5] Belhadj, M. (2008). Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister en Microélectronique-photovoltaïque. Centre Universitaire, Bechar.
[6] Bonnet, Ch-E. (2009). Le Secteur du Photovoltaïque en Chine. Rapport de recherche en photovoltaïque. Chambres de commerce et d'industrie, Français en Chine.
[7] Boukhers, D. (2007). Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque Application au Pompage. Mémoire Magister en électrotechnique. Université Mentouri, Constantine.
[8] Bouziane, K. (2011). Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par Electrolyse de l'eau. Mémoire de Magister en Génie des procèdes. Université Kasdi Merbah, Ouargla.
[9] Bouzid, A. Azizi, M. (2008). Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'un ferme Etude de l'onduleur triphasé lié à cette application. Mémoire de projet de fin d'étude en Electrotechnique. Université Mohamed Boudiaf, Oran.
[10] Bruno, S. Jean, Y. (2013). L'HYDROGÈNE : VECTEUR DE LA TRANSITION ÉNERGETIQUE ?. Rapport de recherche.
[11] Chennouf, N. Perspectives de Développement de la production Industrielle de L'hydrogène dans le sud Algérien a partir des Energies Renouvelables. Thèse de Doctorat en Génie Procédés. Université Kasdi Merbah, Ouargla.
[12]Christine, M. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?. 15, 1-3.[13] Darfilal, D. Fraine et Y. Seladji, C. (2013). Etude, dimensionnement et simulation par TRNSYS d'un système de production massive d'hydrogène par voie solaire au site d'Adrar. Des Energies Renouvelables, 4, 667-677.
[14]///E:/chpitre4/La%20fili%C3%A8re%20hydrog%C3%A8ne%20n%27est%20pas%20m
[15]///E:/chpitre4/Prix%20du%20panneau%20photovolta%C3%AFque%20en%20Alg%C3%A9rie%20%20Portail%20Alg%C3%A9rien%20des%20ENERGIES%20RENOUVELABLES.html
[16]Gueridi, A. (2011). Dimensionnement d'un système hybride pour subvenir aux besoins de l'université de Chlef. Mémoire de Magister de l'école Doctorale. Université Hassiba Ben Bouali, Chlef.
[17]///G:/mimoir prodution de hadrogéne/chpitre4/Batterie solaire _ plomb ouvert _ GEL _ AGM. Prix public pour parc 12V, 24V ou 48V - SOLARIS-STORE.html

[18] Hamour, M. (2012). Contribution à l'Etude des contraintes Thermomécaniques dans les piles à combustibles, Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Université Mouloud

Bibliographie

Mammeri, Tizi-Ouzou.
[19] Jean-Marie, T. (2011). Filière hydrogène de la production au stockage. Rapport de recherche. Université de Picardie, France.
[20] Khineche, K. (2014). Modélisation et Simulation D'un Système de Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque. Mémoire Master Académique Electrotechnique Industeriel. Université Kasdi Merbah, Ouargla.[21] Labbé, J. (2006). L'hydrogène Electrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse de Doctorat spécialité énergétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris.[22] Mechalikh, M-N. Hamad, Ch-E. (2013). Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master en Machine électrique et électronique de puissance. Université Kasdi Merbah, Ouargla.[23] Ould Mohmed Yahya, A. Ould Mohamed, A et Youm, I. (2008). Etude et modélisation d'un générateur photovoltaique. Des Energies Renouvelables, 3, 473-483.
[26] Pierre, H. Bernard, B. Franco, R. Willi, W. Jean-Marc, Z. (2005). L'HYDROGÈNE, FUTUR VECTEUR ENERGÉTIQUE .Rapport de recherche. Université, Genève.
[27] Royer, J. Djiako, T. Schiller, E et Sada sy, B. (1998). Le Pompage Photovoltaïque. IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA, Canada.
[28] Sahli, M. (2010). Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible, Mémoire de Magister en physique, Université Mentouri, Constantine.
[29] Saker, S. (2013). Modélisation et Contrôle du système Pile à Combustible, Convertisseurs et Super condensateur, Mémoire Magister en Électrotechnique, Université Mohamed Khider, Biskra.
[30] Tayeh, T. (2014). Composés à base de magnésium pour le stockage et/ou la production délocalisée d'hydrogène. Thèse de Doctorat physico-chimie de la matière condensée, Université de Bordeaux, Français.
[31] Vighetti, S. (2010). Système Photovoltaïque raccordés au réseau : Choix et Dimensionnement des étages de conversion. Thèse de doctorat en Génie Electrique.
[32] Viseur, M. (2008).Etude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie, Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Libre de Bruxelles, Igeat.
[33] Zouache, F. (2009). Etude de la Concentration Solaire sur les Performances des Système Photovoltaïque. Thèse de Magistère en Electronique. Université de Mentouri, Constantine.

Résumé

Résumé

L'énergie est un facteur primordial dans le développement que connait le monde dans les différents domaines.

Les énergies fossiles comme le charbon le pétrole ainsi que l'énergie nucléaire ont un grave impact sur l'environnement, de plus ces énergies ne sont pas renouvelables,

Les énergies renouvelables comme le solaire l'éolien,……sont considérés commues l'alternatif à ces énergie classiques.

L'Algérie dispose d'un potentiel énorme en ce qui concerne les énergies renouvelables, ce qui nous à motivé pour effectuer ce travail qui consiste à étudier l'intérêt d'utiliser l'hydrogène comme moyenne de stockage dans les systèmes photovoltaïque.

Mots clé: Hydrogène, électrolyseur PEM, photovoltaïque, pile à combustible.