



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A. MIRA– BEJAIA**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**



**Département de Génie électrique**

**Mémoire de Fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en  
Électrotechnique  
Option : Commande électrique

**Thème :**

**Production de l'hydrogène vert par  
énergie solaire**

**Présenté par :**

LACENE Cylas

**Encadré par :**

Mme Mokrani

**Soutenu le :** 15/09/2024

**Année universitaire :** 2023/2024

# *Remerciements*

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu tout-puissant de m'avoir donné la force et la volonté durant mes études et pour la réalisation de ce projet.

Je tiens à adresser un grand merci à Mme Mokrani pour son encadrement et son soutien constant, et je lui en suis sincèrement reconnaissant.

Je souhaite également exprimer ma gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Un remerciement tout particulier va à ma famille pour son soutien constant, son accompagnement et pour m'avoir permis d'en arriver là.

Enfin, un très grand merci à tous mes amis pour leur aide, leurs encouragements, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

## CHAPITRE I : Généralités sur l'hydrogène

1. Introduction .....	1
2. Généralités sur l'hydrogène .....	1
2.1. Définition de l'hydrogène .....	1
2.2. Différents types d'hydrogène .....	2
2.3. Caractéristiques de l'hydrogène .....	3
2.3.1. Propriétés physiques .....	3
2.3.2. Propriétés énergétiques .....	4
3. Applications de l'hydrogène .....	6
3.1. Applications chimiques .....	6
3.1.1. Réduction des oxydes métalliques .....	6
3.1.2. Source de chaleur industrielle .....	6
3.2. Applications énergétiques .....	7
3.2.1. Piles à combustibles .....	7
3.2.2. Utilisation de l'hydrogène vert dans les turbines .....	8
3.3. Applications de l'hydrogène dans la mobilité .....	9
3.3.1. Carburant .....	10
4. Stockage de l'hydrogène .....	11
4.1. Stockage sous forme gazeuse .....	11
4.2. Stockage sous forme liquide .....	12
4.3. Stockage sous forme d'hydrures métalliques .....	12
4.4. Stockage sous basse pression .....	13
5. Transport de l'hydrogène .....	14
6. Avantages et inconvénients de l'hydrogène .....	15
7. Considérations sur la production d'hydrogène .....	16
7.1. Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures .....	16
7.2. Production d'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique) .....	17

7.3. Production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire .....	17
7.4. Production d'hydrogène par les énergies renouvelables .....	18
7.5. Production d'hydrogène par l'énergie solaire .....	19
8. Aperçu sur l'hydrogène vert .....	20
8.1. Définition de l'hydrogène vert .....	20
8.2. Limites des technologies de production de l'hydrogène vert .....	20
9. Conclusion partielle .....	21

## **CHAPITRE II : Étude des électrolyseurs**

1. Introduction .....	22
2. L'électrolyseur .....	22
2.1. Principe général sur l'électrolyseur .....	22
2.2. Fonctionnement d'un électrolyseur .....	22
2.3. Alimentations d'un électrolyseur .....	23
2.4. Différents types d'électrolyseur .....	24
2.4.1. Électrolyseur alcalin .....	24
2.4.2. Électrolyseur à haute température .....	24
2.5. Électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) .....	25
2.5.1. Principe de l'électrolyse PEM .....	26
2.5.2. Matériaux de l'électrolyse PEM .....	27
2.5.3. Rendements des PEM .....	28
2.5.4. Dimensionnements de l'électrolyseur PEM .....	29
2.5.4.1. Production d'hydrogène à haute pression .....	29
2.5.4.2. Production d'hydrogène à haute température .....	30
2.5.4.3. Rendement faradique .....	30
2.5.4.4. Estimation du taux de production d'hydrogène .....	32
2.6. Avantages et inconvénients de l'électrolyse PEM .....	34
3. Conclusion .....	35

## **Chapitre III : Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

1. Introduction .....	36
2. Système solaire photovoltaïque .....	36
2.1. Principes de calcul de l'énergie solaire .....	36
2.2. Position du soleil .....	37
2.3. Conversion photovoltaïque .....	38
2.4. L'effet photovoltaïque .....	39
2.5. Module photovoltaïque .....	39
2.6. Cellule photovoltaïque .....	40
2.6.1. Cellules à base de silicium monocristallin .....	40
2.6.2. Cellules à base de silicium multi cristallin (Polycristallin) .....	41
2.6.3. Cellules à base de silicium amorphe .....	41
2.6.4. Cellules à base organiques et plastiques .....	42
3. Systèmes photovoltaïques .....	44
3.1. Système autonome .....	44
3.2. Système PV raccordé au réseau .....	45
3.3. Système PV hybride .....	45
4. Générateur photovoltaïque .....	46
4.1. Module photovoltaïque .....	46
4.2. Montage en série .....	47
4.3. Montage en parallèle .....	47
5. Commande MPPT .....	48
5.1. Principes de conversion dans les systèmes PV .....	48
5.2. Étape d'adaptation entre un générateur PV et une charge .....	48
5.3. Convertisseur DC/DC .....	49
5.4. Étape d'adaptation de type BOOST .....	50
5.5. Principe de la commande MPPT .....	51
5.6. Simulation du système photovoltaïque .....	52
6. Conclusion .....	57

## **Chapitre IV : Intégration PV-électrolyseur**

1. Introduction .....	59
-----------------------	----

2. Présentation du Système Global .....	59
3. Dimensionnement du Système .....	60
3.1. Électrolyseur .....	60
3.1.1. Chute de tension d'activation .....	60
3.1.2. Tension réversible .....	60
3.1.3. Potentiel idéal $V_i$ (électrochimique) .....	61
3.1.4. Variation de l'énergie libre de Gibbs (J/mol) .....	61
3.1.5. Débit d'hydrogène (ml/min) .....	61
3.1.6. Chute de tension de diffusion .....	62
3.1.7. Puissance électrique .....	62
3.2. Modélisation du réservoir d'hydrogène .....	63
4. Résultats de simulation .....	64
5. Conclusion .....	67

Conclusion général

## Liste des figures

Fig. I.1: Différents types de l'hydrogène

Fig. I.2: Densité de masse d'énergie de quelques carburants. [1]

Fig. I.3 : Véhicule à hydrogène

Fig. I.4 : Différentes forme de stockage 1 kg d'hydrogène

Fig. I.5: Réaction de l'hydrogène avec le métal

Fig. I.6: Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène

Fig II.1 : Principe de l'électrolyse alcaline. [23]

Fig II.2 : Principe d'une électrolyse à haute température. [23]

Fig II.3 ; Principe d'une électrolyse PEM

Fig II.4 : Schéma simulation simulink du rendement faradique

Fig II.5 : Rendement faradique en fonction de densité de courant et de la température [29]

Fig II.6: Schéma Matlab Simulink de la production d'hydrogène en m<sup>3</sup> /h

Fig II.7: Résultat de la simulation pour  $N_{\text{cell}}=20$

Fig II.8: Résultat de la simulation pour  $N_{\text{cell}}=500$

Fig. III.1: Position du soleil [31].

Fig. III.2: Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N). [35]

Fig. III.3 : Module photovoltaïque

Fig. III.4 : Cellules à base de silicium monocristallin.

Fig. III.5 : Photos de cellule multi cristalline. [36]

Fig. III.6 : Panneau solaire en silicium amorphe. [37].

Fig. III. 7 : Cellule PV organique [37].

Fig. III.8 : Système PV autonome

Fig. III.9: Système PV raccordé au réseau.

Fig. III.10: Module photovoltaïque

Fig. III.11 : Caractéristiques de groupement série des cellules [43]

Fig. III.12 : Caractéristiques de groupement parallèle des cellules

Fig. III.13 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [48]

Fig. III.14 : Convertisseurs DC-DC [48]

Fig. III.15 : Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur

Fig. III. 16 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

Fig. III. 17 : Principe de la commande MPPT

Fig III.18: Paramètre du PV

Fig.III.19 : Caractéristique I-V de GPV avec irradiances (w/m<sup>2</sup>) [1000 500 100].

Fig.III.20 : Caractéristique P-V de GPV avec irradiances (w/m<sup>2</sup>) [1000 500 100].

Fig III.21 : Schéma bloc sous Simulink du convertisseur Boost

Fig.III.22 : Caractéristique V(t) de GPV avec MPPT

Fig.III.23 : Caractéristique I(t) de GPV MPPT

Fig.III.24 : Caractéristique P(t) de GPV avec MPPT.

Fig.IV.1 : Schéma global de l'intégration du système PV MPPT avec l'électrolyseur et le réservoir de stockage d'hydrogène

Fig.IV.2 : Les entrées et sorties principale d'un électrolyseur

Fig.IV.3 : Débit d'Hydrogène Produit sous des Conditions d'Irradiation fixe en ml/min

Fig.IV.4 : La pression à l'intérieur du réservoir modèle d'hydrogène

Fig.IV.5 : Débit d'Hydrogène en Fonction de l'Irradiation Solaire (400 à 900 à 300 W/m<sup>2</sup>)

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les propriétés physiques de l'Hydrogène [2]

Tableau I.2 : les différents types de piles à combustibles. [3]

Tableau I.3 : les méthodes de la production d'hydrogène [11]

Tableau I.4: estimations des couts des différentes techniques de production d'hydrogène

Tableau II.1 : liste des principaux fabricants d'électrolyseurs PEM [25]

Tableau III.1: Comparatif des différentes technologies cellules. [39]

Tableau III.3: Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC. [50]

# Introduction générale

L'approvisionnement énergétique mondial est aujourd'hui essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossiles et nucléaire. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques, les gazes à effet de serre, et les retombées radioactives liées au nucléaire, sont des phénomènes mis en cause dans le réchauffement climatique. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le moyen et long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la santé et le bien-être humain et sur l'économie mondiale. L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable, provoquent une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergies renouvelables et non polluantes [1]. Ces dernières pourraient répondre à ce besoin mais leur attrait est limité par leur disponibilité intermittente et par l'absence d'un moyen de stockage adéquat de l'électricité. En effet, les batteries ne sont pas adaptées au stockage à long terme d'énergie car leurs processus de fabrication est polluant et leurs durée de vie laisse à désirer [2]. L'hydrogène associé aux piles à combustibles pourrait donc les remplacer partiellement ou totalement comme tampon énergétique. Surtout s'il est produit à partir d'énergies vertes.

Ce mémoire se propose de détailler cette approche en quatre chapitres distincts. Le premier chapitre introduit l'hydrogène en tant que produit chimique et vecteur d'énergie, en soulignant son importance croissante dans la transition énergétique. Le deuxième chapitre explore les électrolyseurs, en examinant les différents types, matériaux et technologies disponibles pour la production d'hydrogène. Le troisième chapitre se concentre sur l'énergie solaire photovoltaïque, en discutant de ses principes de fonctionnement, de son efficacité et des défis associés à son intégration dans le réseau électrique. Enfin, le quatrième chapitre présente une simulation du couplage entre un système photovoltaïque et un électrolyseur, illustrant comment ces technologies peuvent être combinées pour maximiser la production d'hydrogène vert.

À travers cette analyse, nous visons à démontrer comment l'hydrogène produit à partir de l'énergie solaire peut contribuer à une transition énergétique plus durable et à la réduction des impacts environnementaux des systèmes énergétiques actuels.

# **CHAPITRE I : Généralités sur l'hydrogène**

## 1 Introduction :

L'hydrogène est perçu comme un vecteur énergétique plutôt que comme une énergie primaire, comme l'est l'électricité par exemple. Il faut donc disposer de technologies capables de le fabriquer. De nombreuses études sont en cours, telles que celles qui se concentrent sur les combustibles fossiles, le nucléaire ou les énergies renouvelables.

L'hydrogène joue un rôle essentiel dans l'industrie chimique et pétrochimique. Il est principalement employé pour la fabrication d'ammoniac et de méthanol, ainsi que pour le processus de raffinage du pétrole. Il est aussi utilisé dans les domaines de la métallurgie, de l'électronique, de la pharmacologie et dans le traitement des aliments.

Chaque année, 50 millions de tonnes d'hydrogène sont déjà produites pour répondre à ces besoins. Cependant, s'il fallait utiliser ces 50 millions de tonnes pour produire de l'énergie, elles ne représenteraient que 1,5 % de la demande mondiale d'énergie primaire. En utilisant l'hydrogène comme source d'énergie, il est nécessaire d'accroître sa production [3].

## 2 Généralités sur hydrogène :

### 2.1 Définition de l'Hydrogène :

En effet, 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 ( $H_2$ ) est constituée de deux atomes d'hydrogène. On utilise couramment le terme "hydrogène" pour désigner spécifiquement 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 [3].

L'hydrogène est également présent dans les organismes vivants, qu'ils soient d'origine animale ou végétale. La biomasse constitue donc une autre source potentielle d'hydrogène. Cependant, pour extraire l'hydrogène de ces sources primaires telles que les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau, il est nécessaire d'apporter de l'énergie, tout comme pour la production d'électricité. C'est pourquoi l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique [3].

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) [1]. On appelle technologie de l'hydrogène l'ensemble des technologies étudiées pour produire l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques [3].

## 2.2 Différents types de l'hydrogène :

### a) L'hydrogène vert :

Est fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable [1].

### b) L'hydrogène gris :

Est fabriqué par procédés thermochimiques avec comme matières premières des sources fossiles (charbon ou gaz naturel) [3].

### c) L'hydrogène bleu :

Est fabriqué de la même manière que l'hydrogène gris, à la différence que le CO<sub>2</sub> émis lors de la fabrication sera capté pour être réutilisé ou stocké [3].

### d) L'hydrogène jaune :

Plus spécifique En France, l'hydrogène jaune est produit par électrolyse, tout comme l'hydrogène vert. Cependant, sa particularité réside dans le fait que l'électricité utilisée provient principalement de l'énergie nucléaire. Récemment, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) a proposé une nouvelle terminologie pour désigner les différents types d'hydrogène :

- **Hydrogène Renouvelable** (anciennement appelé “vert”): produit à partir d'électrolyse alimentée par des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire ou éolienne.
- **Hydrogène Fossile** (anciennement appelé “gris”): issu de procédés traditionnels basés sur les combustibles fossiles.
- **Hydrogène Bas-Carbone** (regroupant les anciens “bleu” et “jaune”): obtenu en capturant et en stockant le dioxyde carbone émis lors de la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles.

## La production de l'hydrogène

L'hydrogène «gris», le plus courant, est également le plus polluant

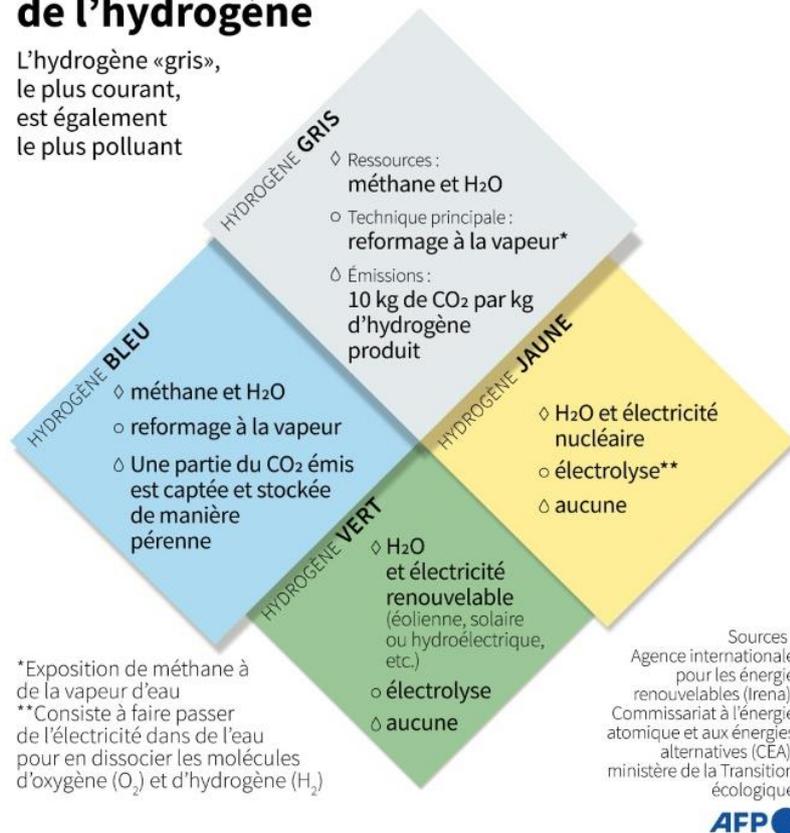


Fig. I.1: Différents types de l'hydrogène

## 2.3 Caractérisations de l'hydrogène :

### 2.3.1 Propriétés physiques :

L'hydrogène, élément chimique de symbole H, est incolore, inodore et insipide. Il constitue 75 % de la masse de l'univers et est l'élément le plus léger. Toutefois, il se trouve généralement combiné avec d'autres éléments tels que l'oxygène, le carbone et l'azote [4]

Sur terre, on le trouve principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Le tableau I.1 présente 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	13.8 K
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.1 : Propriétés physiques de l'Hydrogène [4]

### 2.3.2 Propriétés énergétiques :

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène offre plusieurs avantages : il possède une densité de masse énergétique très élevée. Selon la figure I.2, l'énergie fournie par unité de masse d'hydrogène est deux fois supérieure à celle fournie par l'énergie conventionnelle, près de trois fois supérieure à celle de l'essence et environ six fois supérieure à celle du méthanol

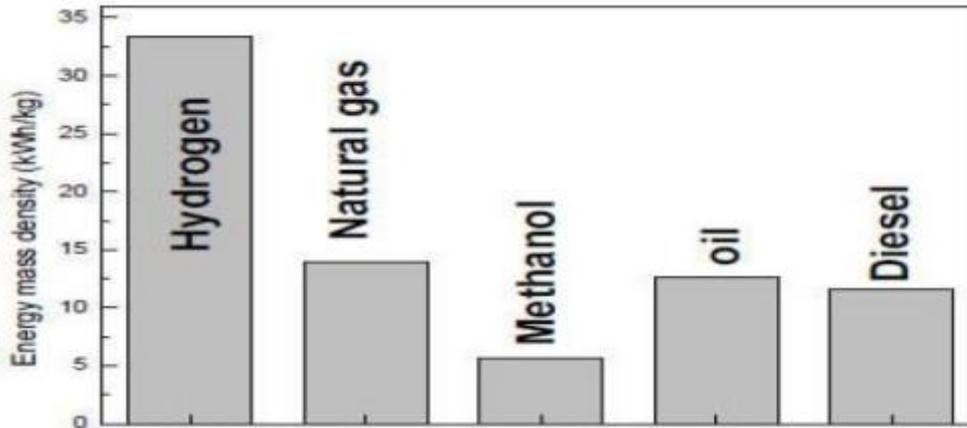


Fig. I.2: Densité de masse d'énergie de quelques carburants. [3]

- L'hydrogène est un vecteur d'énergie extrêmement polyvalent. Contrairement aux sources d'énergie conventionnelles, qui ne peuvent être converties en énergie utile (mécanique, thermique ou électrique) par un seul processus (la combustion), l'hydrogène peut être converti en énergie utile de cinq manières différentes :
  - Transformation directe en vapeur
  - Conversion directe en chaleur par combustion catalytique
  - Conversion directe en électricité par des procédés électrochimiques
  - Utilisation comme 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 I.1. La seule particule émise est le NOx et cela lors de la combustion de l'hydrogène. Toute autre forme d'utilisation d'hydrogène (hydratation, génération de vapeur, Combustion catalytique, etc.) ne produit ou produit très peu d'éléments nocifs pour l'environnement [3].
- Aussi Lorsqu'il s'agit d'utiliser de l'hydrogène comme carburant, il est essentiel de prendre des précautions de sécurité élémentaires. Cependant, par rapport aux dangers associés à d'autres combustibles, notamment la toxicité et les risques d'incendie, l'hydrogène est le carburant présentant le moins de risques. [3]

### 3 Applications d'hydrogène :

L'hydrogène peut être utilisé de deux manières différentes [3] :

- Comme produit chimique dans l'industrie : Dans ce cas, il entre en tant que réactif dans des procédés chimiques tels que le raffinage du pétrole ou la production d'ammoniac.
- Comme vecteur d'énergie : L'hydrogène est alors utilisé comme carburant ou source d'énergie. Actuellement, l'hydrogène est principalement utilisé à des fins industrielles. Bien que son application majeure se limite au secteur spatial, il est en passe de devenir un vecteur énergétique universel.
- Dans la mobilité : L'hydrogène joue un rôle croissant en tant que carburant dans le secteur des transports. Les véhicules à hydrogène, tels que les voitures, les bus et les camions, utilisent l'hydrogène comme source d'énergie pour produire de l'électricité dans les piles à hydrogène, offrant ainsi une alternative propre aux carburants fossiles.

#### 3.1 Applications chimiques :

L'hydrogène réagit avec de nombreux éléments non métalliques. Il forme de l'ammoniac en se combinant avec l'azote en présence d'un catalyseur, du sulfure d'hydrogène avec le soufre, du chlorure d'hydrogène avec le chlore, et de l'eau avec l'oxygène. La réaction entre l'oxygène et l'hydrogène se produit à température ambiante en présence d'un catalyseur tel que le platine finement divisé. Lorsqu'un mélange d'hydrogène et d'air ou d'oxygène est enflammé, une explosion se produit. L'hydrogène réagit également avec certains métaux, comme le sodium et le lithium, pour former des hydrures. Il agit comme un agent réducteur sur les oxydes métalliques, entraînant l'oxygène et laissant le métal à l'état libre.

De plus, dans de nombreuses réactions d'électrolyse, l'hydrogène est un sous-produit essentiel. Quantités considérables d'hydrogène sont utilisées dans la synthèse de l'ammoniac et du méthanol, ainsi que dans des procédés tels que l'hydrogénation des huiles pour la production de graisses comestibles, la formation de pétrole de synthèse à partir du charbon et l'enrichissement de la fraction d'essence à partir des huiles de pétrole [3]

##### 3.1.1 Réduction des oxydes métalliques :

La production d'acier à partir de l'hydrogène et des minerais de fer est connue sous le nom de DRI (Direct Reduced Iron). Ce processus se classe parmi les 4 plus importants.

Consommateur actuel d'hydrogène, Il est prévu que cette demande augmente dans les années à venir, étant donné que la demande en acier devrait augmenter de 6 % par rapport à la demande

actuelle d'ici 2030 [5].

On étudie actuellement l'hydrogène pour l'utiliser comme agent réducteur à la place du monoxyde de carbone, qui est actuellement utilisé pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et réduire la consommation de gaz naturel et de charbon dans ce domaine. Il est probable que cette technologie soit mise au point vers 2030. [5]

### 3.1.2 Source de chaleur industrielle :

De nos jours, l'industrie utilise la chaleur pour diverses utilisations, telles que la fonte, la gazéification, le séchage, ou encore pour l'activation d'une multitude de réactions chimiques. Cette tâche peut être parfaitement remplie par l'hydrogène en raison de sa grande valeur calorifique,

Il serait possible de substituer le charbon et d'autres carburants fossiles et polluants actuellement utilisés. Le désavantage réside dans le fait qu'à l'heure actuelle, aucun de ces secteurs mentionnés précédemment n'exploite l'hydrogène pour son potentiel calorifique. On peut utiliser directement l'hydrogène comme un fourneau ou de manière indirecte en évaporant de l'eau, par exemple, et en réutilisant cette vapeur [6].

## 3.2 Applications énergétiques

### 3.2.1 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<sub>2</sub> : représente le dihydrogène, une molécule composée de deux atomes d'hydrogène.

O<sub>2</sub> : représente le dioxygène, une molécule composée de deux atomes d'oxygène.

H<sub>2</sub>O : représente l'eau, qui est le produit de la réaction entre le dihydrogène et le dioxygène.

Q : représente l'énergie dégagée ou absorbée pendant la réaction. Cette énergie peut être sous forme de chaleur (Q = chaleur).

Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte. Il s'agit de la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, allant de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires varient, mais le principe reste inchangé. Le

Tableau I.3 détaille les divers types de piles couramment développées. Toutes ces piles fonctionnent généralement autour d'un même point, correspondant à un rendement brut de l'ordre de 50%

L'avantage de l'utilisation de la pile à combustible dans des systèmes stationnaires réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire de se connecter à un réseau électrique, ce qui est idéal pour les zones éloignées ou difficiles d'accès, et les frais de connexion au réseau sont très abordables.

Essentiels. La PAC pourrait répondre aux besoins en énergie en utilisant de l'hydrogène à travers divers modes de transport pour des bases de vie situées à la fois en Groenland et au milieu du Sahara algérien. Autrement, un raccordement avec un électrolyseur alimenté par des énergies renouvelables (si disponible) pourrait générer l'hydrogène requis en situation de mise en place [5].

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

Tableau I.2 : Différents types de piles à combustibles. [5]

### 3.3 Applications de l'Hydrogène dans la Mobilité :

La pile à combustible est en effet extrêmement polyvalente, tout comme les moteurs à combustion interne, et elle se trouve partout, des petites villes aux grandes centrales électriques. La circulation des véhicules à PAC a commencé avec succès.

Peu à peu à travers le monde. La Toyota Mirai, qui est disponible depuis 2015 et qui est actuellement à sa seconde génération, ainsi que le Hyundai Nexo, sont les principaux véhicules touristiques disponibles actuellement [6]. Dans le domaine des véhicules routiers utilitaires, des entreprises telles que Cummins travaillent sur des prototypes de semi-remorques avec une autonomie moyenne de 500 km pour des réservoirs de 80 kg. D'hydrogène pur. Autrement dit, de nombreux pays sont en train de mettre en place des infrastructures pour accueillir davantage d'appareils utilisant l'hydrogène comme source d'énergie. Par exemple, le Japon prévoit d'atteindre d'ici 2030[6] :

- Le nombre de véhicules à PAC doit passer de 40 000 unités à 80 000 unités.
- Promouvoir la révision de la réglementation, l'avancement technologique et la création de stations hydrogène par le secteur public et privé.
- Garantir une alimentation optimale de ces stations en hydrogène provenant d'énergies renouvelables.
- Augmenter le nombre de bus à PAC de 200 à 1200 unités.
- Augmenter le nombre de chariots élévateurs à PAC de 500 à 10 000 unités.
- La commercialisation de camions à PAC.

Il n'y a pas d'accord entre les transports ferroviaires et maritimes sur l'utilisation des piles à combustible. Les transports maritimes et ferroviaires sont également soumis aux normes de pollution, ce qui les pousse à utiliser des systèmes d'hybridation entre piles à combustible.

Les vaisseaux navals ont besoin de combustibles et de batteries car le système de batteries ne sera pas seulement trop lourd, mais aussi moins efficace en raison de sa rapidité de drainage des batteries. Pour les trains, il est possible de les connecter à la PAC, que ce soit pour les trains urbains ou régionaux. La substitution des trains électriques urbains par des piles à combustible permettra de désencombrer le réseau ferroviaire, tout comme les trains régionaux qui utilisent principalement des moteurs thermiques à base de diesel [7].

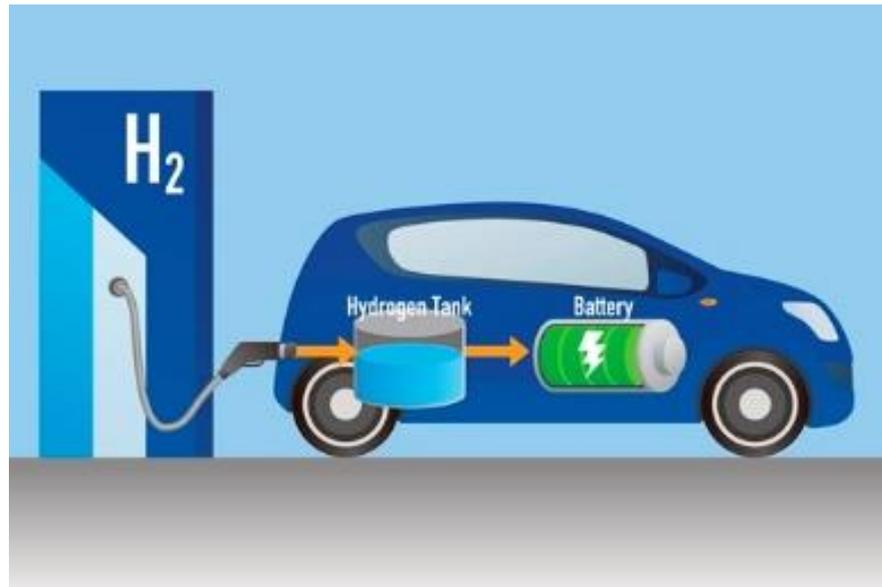


Fig. I.3 Véhicule à hydrogène

### 3.3.1 Carburant

L'utilisation de l'hydrogène comme combustible peut être une option bénéfique pour alimenter les moteurs à combustion interne ou les turbines.

En ce qui concerne les moteurs, divers fabricants ont pris part à ce défi de transformer les moteurs diesel à combustion interne en moteurs à hydrogène. Par exemple, nous mentionnons l'expérience de Yamaha qui a réussi à transformer un moteur V8 de 5.0L de cylindrée en hydrogène sans subir de perte de puissance significative (472 PS en version essence et 455 PS avec 92 l'hydrogène) [7]. Cependant, Cummins, qui propose également des moteurs diesel pour des marques de poids lourds et utilitaires telles que Kenworth ou Dodge, a également commencé à convertir leurs moteurs (6.7L diesel et 15L diesel) à l'hydrogène pour les tester et probablement les commercialiser. [10] On a commencé à tester des prototypes de petits moteurs (1.6L 3 cylindres turbo) dans des courses d'endurance. Les moteurs ont réussi à terminer la course, ce qui témoigne en partie de leur fiabilité.

Il serait avantageux de se tourner vers ce genre de conversion afin de diminuer les coûts de recherche et développement, car la conversion d'un moteur à essence à un moteur à hydrogène implique principalement l'utilisation d'une culasse différente, de différents injecteurs et d'un nouveau système d'allumage [11].

La NASA a réalisé des tests pour l'aviation au milieu du 20ème siècle en substituant le kérosène par l'hydrogène. L'essai a été extrêmement concluant. Effectivement, l'avion a volé pendant plusieurs minutes avant que des turbulences ne commencent à se manifester.

En ce qui concerne la contenance du gaz, la NASA a ajouté un réservoir à l'extrémité d'une aile suivi d'une forte protection contre les éléments ainsi que la dissipation de l'hydrogène, tandis que dans l'autre aile est placé un autre réservoir d'hélium afin de pressuriser le réservoir d'hydrogène et de purger ce dernier. Cet appareil est témoin de la parfaite capacité de l'aviation à pouvoir se convertir à l'hydrogène pour l'avenir. D'ailleurs, aujourd'hui beaucoup d'entreprise se mettent à développer de nouveaux prototypes afin de perfectionner, sécuriser, et commercialiser les vols avec de l'hydrogène [11].

## 4 Stockage de l'hydrogène :

### 4.1 Stockage sous forme gazeux

L'hydrogène gazeux est une solution prometteuse pour la régulation. Toutefois, il y a de nombreuses limitations. Léger et volumineux, il est nécessaire de comprimer l'hydrogène au maximum afin de diminuer la taille du réservoir. Des avancées ont été réalisées : de 200 bars À l'heure actuelle, la pression de la bouteille distribuée dans l'industrie est de 350 bar. L'évolution consiste maintenant à utiliser des réservoirs capables de supporter une pression électrique de 700 bar. En outre, l'hydrogène est le composant le plus petit de l'univers, il est donc nécessaire de dénicher des matériaux capables de contenir de l'hydrogène sans risque de fuite [12].

### Volume de stockage pour 1 kg d'hydrogène



Fig. I.4 Différentes forme de stockage 1 kg d'hydrogène

## 4.2 Stockage sous forme liquide

Cette technologie nécessite une grande quantité d'énergie pour refroidir jusqu'à atteindre la température requise pour son fonctionnement :  $-253^{\circ}\text{C}$ . Il est envisageable de stocker l'hydrogène sous cette forme, mais cela demande des avancées supplémentaires. En effet, cette approche existe déjà. Appliquée dans le domaine de l'espace. Cependant, après l'hélium, l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier. Il est possible de le stocker en utilisant de l'hydrogène liquide, mais cela est très coûteux et impossible pour les particuliers de l'utiliser en ce moment. Il convient également de mentionner qu'environ 3 à 4 % de l'hydrogène s'évapore quotidiennement.

## 4.3 Stockage sous forme d'hydrures métalliques :

Cette approche consiste à capter l'hydrogène dans les interstices d'une poudre d'alliage métallique comprimée, à l'instar d'une éponge qui absorbe de l'eau. Cette méthode présente de nombreux bénéfices, tels qu'une construction facile et un niveau de sécurité élevé. La voiture Il est actuellement hors de portée des hydrures existantes en raison de son poids.

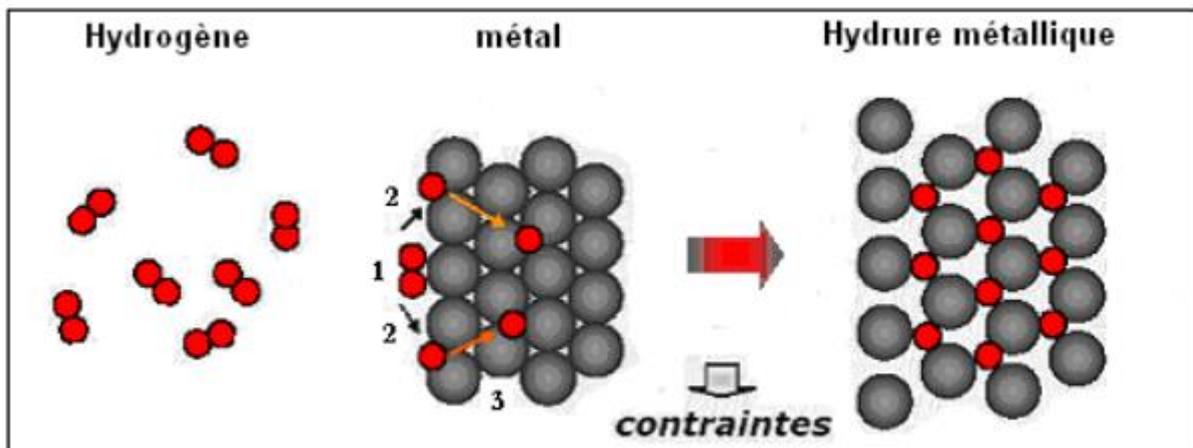


Fig. I.5: Réaction de l'hydrogène avec le métal

## 4.4 Stockage sous basse pression

Cette méthode pourrait être une option pour le stockage sous pression de gaz. La solution consisterait à conserver l'hydrogène dans des matériaux capables de l'absorber et de le restituer si besoin est. Il peut être composé d'un matériau carboné ou d'un mélange de métal.

Le conditionnel est utilisé car ce mode de stockage reste à l'état de recherche et n'a pas encore été développé.

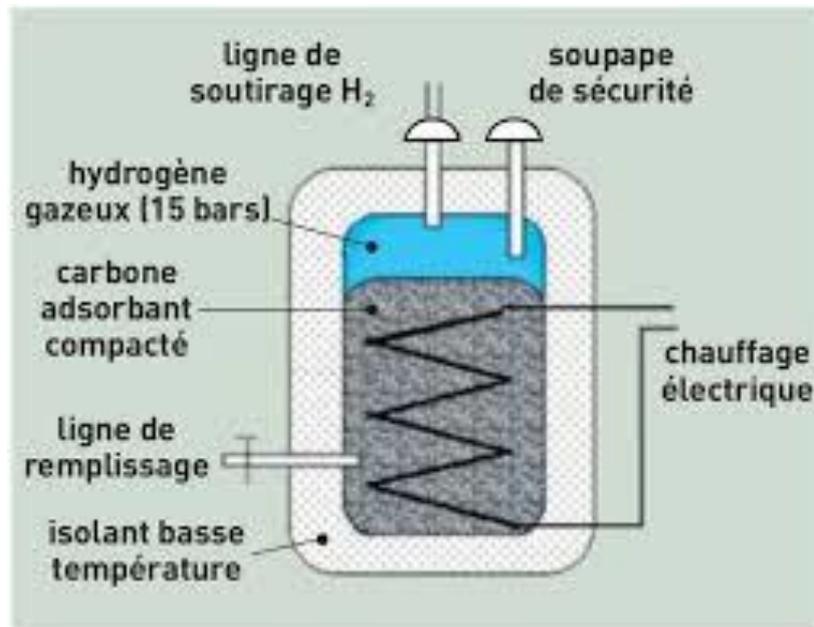


Fig. I.6: Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène.

## 5 Transport de l'hydrogène

En centralisant la production, on peut profiter de sources d'énergie renouvelables plus compétitives et faire des économies d'échelle. Cependant, une telle approche peut déplacer la production à des centaines ou des milliers de kilomètres des points de demande.

Cela requiert des canalisations d'hydrogène spécialisées. Les pays, en raison de leurs particularités géographiques et de leurs politiques énergétiques, sont également dépendants d'un échange intercontinental d'électricité. Jusqu'à présent, le Japon et l'Allemagne sont principalement des importateurs nets ; tandis que l'Australie, le Maroc et le Chili sont des exportateurs nets.

Trois modes de transport d'hydrogène sont actuellement disponibles : le transport en bouteilles par route ou par voie ferrée, le transport par canalisations spéciales et le transport maritime. Les frais de transport et d'entreposage diffèrent en fonction du mode de transport et peuvent fluctuer. Être trois fois plus cher que le coût de l'hydrogène lui-même.

Les remorques à tubes qui peuvent contenir jusqu'à 600 kg d'hydrogène gazeux à une pression de 150-250 bars sont actuellement la solution la plus couramment utilisée. Et cela même si le transport coûte entre 0,5 et 1,5€ par kg d'H<sub>2</sub>. Pour des trajets inférieurs à 400 km [13]

Les pipelines peuvent être une alternative plus avantageuse pour des distances allant jusqu'à 1500 km, avec des prix allant de 0,2 à 0,3€ par kg d'H<sub>2</sub>. Cependant, des obstacles techniques et légaux pourraient entraver la combinaison des réseaux de gaz naturel actuels avec du H<sub>2</sub>.

Ou leur transformation totale en canalisations d'hydrogène pur. L'hydrogène a une densité trois fois inférieure à celle du CH<sub>4</sub>, ce qui contraindrait les utilisateurs finaux à consommer davantage de gaz pour obtenir la même quantité d'énergie. De plus, les réglementations nationales varient en ce qui concerne les limites de tolérance de mélange dans les réseaux.

Au-delà de 1500 km, les routes maritimes apparaissent comme des options plus sûres et plus rentables. L'hydrogène gazeux n'est pas assez dense pour des distances aussi longues, et des solutions de recharge sont envisagées [13] :

- L'hydrogène liquide (nécessite une intensité énergétique élevée pour la conversion et le transport).
- L'ammoniac (toxique et peut poser des problèmes pour le transport maritime).
- Les transporteurs d'hydrogène organique liquide, également connus sous le nom de LOHC, sont des molécules qui ont pour objectif de transporter de l'hydrogène organique sous forme liquide à température ambiante. La conversion nécessite entre 35 et 40% d'énergie. Initiale).
- À l'heure actuelle, les trois options entraînent une augmentation du prix de l'hydrogène au port entre 100 et 300 %. Les frais de conversion et de reconversion s'élèvent à 1 à 2€ par kg d'H<sub>2</sub>, tandis que les frais de transport s'élèvent à 0,3 à 1,2€.

## 6 Avantages et inconvénients de l'hydrogène

### ➤ Les avantages

- Le principal avantage réside dans le fait que l'hydrogène génère environ 2,8 fois plus d'énergie par unité de masse que l'essence. Lorsqu'il est brûlé, sa seule émission est la

vapeur d'eau. Ainsi, un avantage majeur de l'hydrogène réside dans le fait qu'une fois qu'il est brûlé, le CO<sub>2</sub> n'est pas produit.

- L'H<sub>2</sub> est le composé le plus répandu dans le domaine de l'eau, représentant environ trois quarts de toutes les matières. Il est facile à fabriquer et à transporter.
- Il n'est pas nocif, non toxique et très léger (facile à diffuser dans l'eau), ce qui en fait un combustible parfait pour les piles et permet de diminuer la dépendance au pétrole.

### ➤ **Les inconvénients**

- Elle est légère, ce qui signifie qu'elle a une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage que le gaz naturel.
- Son taux d'inflammabilité et de détonation avec l'air est supérieur à celui du gaz naturel. À l'exception d'une condition appelée « confinée », c'est-à-dire que le gaz est confiné avec de l'air dans un espace fermé.
- L'hydrogène présente un risque moindre que le gaz naturel. Pour l'hydrogène, l'énergie explosive théorique par m<sup>3</sup> de gaz est 3,5 fois plus faible en cas de confinement. Il faut 10 fois moins d'énergie pour l'enflammer que pour les hydrocarbures classiques et sa flamme est quasiment invisible.
- Sa réputation auprès du public est médiocre et son acceptabilité (n'est donc pas encore établie).

## **7 Considération de production d'hydrogène**

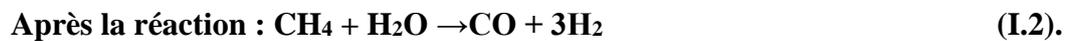
Afin d'être économiquement et écologiquement viable, la production d'hydrogène doit répondre à trois critères [14] : La compétitivité implique que les dépenses de production ne soient pas trop élevées.

- La production d'hydrogène ne doit pas demander une quantité excessive d'énergie pour être efficace.
- La propreté : il est essentiel que le processus de fabrication soit sans polluants, sinon cela compromettra l'un des principaux atouts de l'hydrogène.

## 7.1 Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures

### a. Produit de l'hydrogène à partir la vaporeformage

L'hydrogène actuel est principalement produit par le vapocraquage du gaz naturel ou vaporeformage. De nos jours, cela concerne 95% de l'hydrogène généré. Le procédé le plus répandu consiste à vaporiser du Méthane ; En présence d'un catalyseur au nickel, le gaz naturel de la vapeur d'eau est réagi à une température de 900°C et à une pression de 20 à 30 bars, avec une  $\Delta H$  de 206 KJ/mol. La notation  $\Delta H$  représente l'enthalpie de réaction, également appelée chaleur de réaction. Elle indique la quantité d'énergie thermique absorbée ou dégagée lors d'une réaction chimique, à pression constante.



Un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène est obtenu. Selon la réaction, le monoxyde de carbone est converti en dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et en hydrogène additionnel à une température de 200 à 400°C et à une  $\Delta H$  de 41 KJ/mol.



Au total, pour une molécule de  $\text{CH}_4$ , on obtient par ce procédé quatre molécules d'hydrogène à  $\Delta H=165$  KJ/mol, selon la réaction :  $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$  (I.4)

### b. Produit de l'hydrogène à partir l'oxydation partielle

La seconde façon de produire de l'hydrogène est l'oxydation partielle d'hydrocarbures, par la production de gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène).

Cette approche est valable pour les résidus pétroliers lourds et le charbon. Celle-ci utilise des températures extrêmement élevées (entre 1200 et 1500°C), des pressions élevées (entre 20 et 90 bar ou plus), de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Les conditions techniques complexes et coûteuses sont expliquées par le faible coût de la matière première.

### c. Produit de l'hydrogène à partir la gazéification

Le processus de gazéification implique la combustion de charbon de bois dans un réacteur. À une température extrêmement élevée (de 1200 à 1500°C), les gaz émis se régénèrent pour produire du  $\text{H}_2$  et du  $\text{CO}$ .

## 7.2 Produit de l'hydrogène à partir d'algues vertes et bactéries (biologique)

Les algues pourraient également être utilisées comme source d'hydrogène. Effectivement, pendant la photosynthèse, les végétaux verts convertissent l'eau en hydrogène et oxygène. Le CO<sub>2</sub> est associé à l'hydrogène afin de créer des tissus végétaux, tandis que l'oxygène est libéré dans les plantes l'atmosphère. L'ambiance. Il est possible d'espérer que ce genre de procédé sera techniquement développé d'ici 2 ans et disponible sur le marché d'ici 5 à 8 ans.

## 7.3 Produit de l'hydrogène à partir l'énergie nucléaire

Les réserves nucléaires terrestres sont élevées. C'est la raison pour laquelle on envisage l'utilisation de l'énergie nucléaire qui présente l'avantage de ne pas générer de CO<sub>2</sub> afin de produire de l'hydrogène. Les moyens de production sont orientés vers la dissociation de la molécule d'eau, qui est également très abondante. La dissociation peut être réalisée en suivant deux approches :

- La transformation de l'eau en courant électrique généré par une centrale nucléaire.
- Une centrale nucléaire alimente en chaleur des cycles thermochimiques endothermiques. Le rendement énergétique des cycles thermochimiques est plus élevé : environ 50%, voire 60% en cas de cogénération d'électricité. Dans cette direction, on utilise l'énergie nucléaire pour générer la chaleur indispensable à la réalisation des réactions. La dissociation de l'eau est effectuée à la suite de plusieurs réactions dont les sous-produits sont réutilisés.

Couleur	Technologie	Source d'énergie ou d'électricité	Empreinte carbone	Terminologie
Hydrogène vert	Thermolyse	Biomasse	Basse (< 3 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Hydrogène renouvelable
	Vaporeformage	Biométhane	Basse	Hydrogène renouvelable
	Électrolyse de l'eau	Solaire, éolienne, hydroélectricité	Minimale	Hydrogène renouvelable
Hydrogène rose	Électrolyse de l'eau	Nucléaire	< 2 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub>	Hydrogène bas-carbone
Hydrogène jaune	Électrolyse de l'eau	Réseau électrique (FR)	Basse (< 3 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Hydrogène bas-carbone
Hydrogène bleu	Vaporeformage, Gazéification	Gaz naturel, charbon + CCUS	< 3 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub>	Hydrogène bas-carbone
Hydrogène turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Pas de carbone (co-produit)	/
Hydrogène gris	Vaporeformage	Gaz naturel	~11 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub>	Hydrogène carboné
Hydrogène marron	Gazéification	Lignite	Très élevée (> 20 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Hydrogène carboné
Hydrogène noir	Gazéification	Charbon bitumineux	Très élevée (> 20 kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> )	Hydrogène carboné

Tableau I.3 : Méthodes de la production d'hydrogène [13]

#### 7.4 Production de l'hydrogène par les Énergies renouvelables :

Selon Pierre-Etienne Franc, directeur de l'activité mondiale en énergie hydrogène au sein du groupe Air Liquide, « l'électricité est le principal moteur qui, en collaboration avec l'hydrogène, nous permettra un jour de nous débarrasser des énergies fossiles ». L'hydrogène et les énergies renouvelables intermittentes, comme l'énergie solaire et éolienne, peuvent établir

un lien étroit et vertueux. Quand la lumière du soleil ou le vent souffle, les panneaux solaires ou les éoliennes génèrent de l'énergie électrique. Mais cette électricité est perdue si elle n'est pas utilisée immédiatement. Elle n'est pas utilisée pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Il est alors question de « Power to hydrogen ».

En effet, cet hydrogène propre et durable peut être utilisé dans diverses applications où il se substituera aux ressources fossiles. Il suscite l'intérêt des industriels en tant que moyen de décarboner leurs procédés. De plus, il peut alimenter les stations de recharge pour les véhicules fonctionnant à l'hydrogène (voitures, camions, bus, chariots élévateurs, bateaux). Ces véhicules n'émettent ni particules fines ni CO<sub>2</sub>, ne rejetant que de l'eau.

À titre d'exemple, le projet Hy Balance, mené par Air Liquide au Danemark, représente le plus grand site européen de production d'hydrogène décarboné. Son électrolyseur de 1,2 MW fournit de l'hydrogène destiné à l'industrie et à la mobilité. De même, le projet **GRHYD**, piloté par Energie du côté de Dunkerque, expérimente l'injection d'hydrogène vert à hauteur de 20 % dans les réseaux de chauffage au gaz naturel. Ces initiatives illustrent la voie vers une utilisation plus durable de l'hydrogène dans notre société.

L'électricité générée par une pile à combustible alimentée en hydrogène répond à divers besoins, tels que l'alimentation électrique de zones isolées ou la fourniture de secours à des sites sensibles. De plus, l'hydrogène peut servir de moyen de stockage pour l'énergie renouvelable produite localement, comme illustré dans la figure I.6. En résumé, cette approche garantit l'autonomie des sites non reliés au réseau électrique national, souvent appelés "non électrifiés".

[13]

#### **7.4.1 Production de l'hydrogène par l'énergie solaire**

Parmi les pistes prometteuses dans le secteur des énergies renouvelables, l'électrolyse de l'eau à l'aide de cellules solaires se distingue particulièrement. Des développements récents en Belgique ont abouti à la création d'une nouvelle méthode de production d'hydrogène à partir d'un système alimenté par l'énergie solaire. Cette procédure permet de séparer l'eau en deux composants distincts : l'hydrogène d'un côté et l'oxygène de l'autre. Grâce à des panneaux solaires spécialement conçus, 15 % de l'énergie solaire disponible est convertie pour produire de l'hydrogène gazeux. Chaque panneau a une capacité maximale de production de 250 litres d'hydrogène par jour. Les chercheurs ont consacré dix ans à atteindre ce résultat. Un panneau solaire de 1,6 m<sup>2</sup> est capable de convertir 15 % de l'énergie solaire en hydrogène gazeux à partir

de la vapeur d'eau. En comparaison, un panneau solaire classique, qui convertit l'énergie solaire en électricité, affiche généralement un rendement de 18 à 20 %. Cette avancée ouvre des perspectives passionnantes pour l'utilisation durable de l'hydrogène dans notre société.

## **8 Aperçu L'hydrogène vert**

Cependant, les méthodes traditionnelles employées pour produire de l'hydrogène sont associées à la pollution de l'environnement à travers le globe. C'est pourquoi le domaine de l'énergie et de l'environnement travaille à l'élaboration de méthodes plus durables pour la production d'hydrogène à partir des ressources renouvelables.

### **8.1 Définition de l'hydrogène vert**

L'hydrogène « vert » est l'hydrogène qui satisfait à certains critères de durabilité, mais il n'y a pas encore de définition universellement acceptée, car il n'existe pas de norme internationale pour l'hydrogène vert. [14], cependant, l'hydrogène vert est souvent perçu comme étant généré de manière écologique et durable, en utilisant une source renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne.

### **8.2 Limites des technologies de production de l'hydrogène vert**

Il est considéré que l'absence de chaîne de valeur pour l'hydrogène propre est l'un des principaux défis à surmonter dans le domaine afin de favoriser le développement d'une économie de l'hydrogène à faible empreinte carbonique.

- ❖ Les méthodes de stockage et de transport de l'hydrogène demeurent un aspect limité des systèmes énergétiques de l'hydrogène. L'amélioration de leur efficacité est liée à la résolution de deux questions principales : la transformation de l'hydrogène en un système à plus grande densité (comme la liquéfaction) et l'amélioration de la sécurité de transport et des réservoirs de stockage.
- ❖ Le coût de production de l'hydrogène est relativement élevé en raison de l'immaturité de ses technologies, ce qui empêche toute concurrence avec les technologies conventionnelles basées sur les ressources en hydrocarbures ;
- ❖ Il s'agit d'un marché en développement qui nécessite des normes et des réglementations internationales, qui ne sont pas disponibles actuellement, ce qui constitue un obstacle majeur au développement d'un marché mondial de l'hydrogène ;

- ❖ Le secteur de l'hydrogène présente des risques dans sa chaîne d'approvisionnement ainsi que des incertitudes sur son marché, qui devraient persister pendant un certain temps, en particulier lorsque les marges sur le produit final sont restreintes ;
- ❖ L'hydrogène ayant une barrière énergétique très faible de 0,017 mJ pour la combustion dans l'air, et une plage d'inflammabilité élevée de 4 à 74 %, il a tendance à brûler très facilement avec peu de sources d'allumage/d'étincelles ; en outre, il est très difficile d'éteindre une telle flamme en combustion.

## 9 Conclusion

En somme, notre étude a révélé les avantages considérables de l'hydrogène en tant que moyen de transport d'énergie intermédiaire. Il propose différentes applications pour répondre à divers besoins énergétiques humains, tels que les transports, les applications stationnaires et les applications portables. Son efficacité énergétique élevée est un avantage majeur. De plus, l'hydrogène est une source d'énergie respectueuse de l'environnement, notamment si sa production provient d'une source d'énergie non polluante telle que le rayonnement solaire. Cette particularité est essentielle étant donné les préoccupations grandissantes concernant l'effet de serre. En résumé, l'emploi de l'hydrogène vert offre une opportunité prometteuse pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques. Avec ses différentes méthodes de fabrication, ses caractéristiques polyvalentes et ses multiples options de stockage et de transport, Par conséquent, ce chapitre fournit un résumé complet des différentes technologies pouvant être utilisées pour produire de l'hydrogène propre, des limites de ces technologies et des défis qui entravent le développement de l'économie de l'hydrogène

## CHAPITRE II : Description des électrolyseurs

## 1 Introduction

Comme mentionné dans le chapitre 1, l'hydrogène vert, qui revêt une grande importance tant sur le plan économique qu'environnemental, est produit à partir d'eau distillée par électrolyse, un processus alimenté par des sources d'énergie renouvelable. Les électrolyseurs jouent un rôle essentiel dans cette production, offrant une alternative écologique de plus en plus prisée aux combustibles fossiles.

Dans ce chapitre, nous allons examiner en profondeur le fonctionnement des électrolyseurs, en analysant les principes électrochimiques fondamentaux qui sous-tendent cette méthode. Nous mettrons un accent particulier sur le type d'électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane), en explorant ses caractéristiques spécifiques.

De plus, nous avons réalisé une simulation pour évaluer le rendement faradique et la production d'hydrogène en  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ,

## 2 Electrolyseur

### 2.1 Principe général sur l'électrolyseur :

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau en hydrogène et en oxygène en utilisant une différence de potentiel entre deux électrodes immergées dans une cellule d'électrolyse. Cela crée un champ électrique directionnel, ce qui crée un champ électrique, les cations sont dirigés vers la cathode, tandis que les anions se dirigent vers la cathode. Anode.

### 2.2 Fonctionnement d'un électrolyseur

La réaction électrochimique de l'électrolyse de l'eau consiste à diviser l'eau en Hydrogène ( $2\text{H}$ ) en utilisant un courant électrique.

Ainsi, nous examinons la transformation de l'eau dans le contexte d'un courant électrique. L'analyse électrique est constituée de deux électrodes et d'un conducteur pour l'extraction de la solution électrique. Le sujet Le processus consiste à fournir du courant électrique aux deux pôles. Intégré à la solution de livraison, les ions positifs sont déplacés vers la cathode en raison de la migration électronique. Les ions négatifs se trouvent à l'anode. Des dépôts bruts ou bouillants se forment dans les électrodes. en fonction du genre d'ions présents dans la solution. Les extraits obtenus des dispositifs de stockage varient. Selon leur condition (invasive ou solide).

## 2.3 Alimentations d'un électrolyseur

Quatre catégories d'alimentation électrique de l'analyseur sont disponibles grâce à des générateurs continus. Il est capable de différencier les deux après l'électrolyse. On obtient le signal en utilisant le correcteur CA à double rotation. La source d'alimentation pour l'utilisation du courant d'impulsion élevé est un autre type d'alimentation. Fréquence, les phénomènes survenant dans les électrodes sont identiques. Le terme "système d'alimentation" fait référence à l'ajout d'acide ou de solution de base. [15]

Après la dissociation de l'acide sulfurique dans l'eau, l'eau et les molécules acides se transforment en ions. Il en va de même. Elle se produit lorsque l'hydroxyde de sodium (NaOH) est dissous. Les molécules se dissocient en ions, ce qui entraîne une conduction ionique ou électrolytique dans l'eau. Si une solution est acide, l'ion  $\text{H}_3\text{O}^+$  est présent. Il se déplace. L'électrode négative.

Quand le cation part de l'anode, la réaction au niveau de la cathode est telle que :



Au niveau de l'anode, l'équation bilan de la réaction de production de dioxygène s'écrit :



Pour l'hydroxyde de sodium, l'atome d'hydrogène passe à la cathode et l'oxygène à l'anode. L'eau se décompose dans les électrodes et l'équation fait référence à la génération d'hydrogène.



Le pôle connecté à l'extrémité positive du générateur est appelé anode, et tous les anions se dirigent vers lui contribue à la production d'oxygène.

Le pôle connecté au côté négatif du générateur est appelé cathode, où tous les cations se déplacent vers eux.

## 2.4 Différents types d'électrolyseur

### 2.4.1 Electrolyseur alcalin

L'électrolyse alcaline est la méthode la plus connue pour la fabrication de produits. L'électrolyse de l'hydrogène, ainsi que la production de nombreux composés chimiques tels que le chlore, témoigne d'une grande maturité industrielle dans l'industrie chimique. Au sein de L'analyseur électrique alcalin utilise une solution humide d'hydroxyde de potassium appelée électrolyte.

(KOH). On assure ainsi la connexion ionique grâce aux ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>) et potassium (K<sup>+</sup>). Décrivez les interactions anodiques et cathodiques [16]

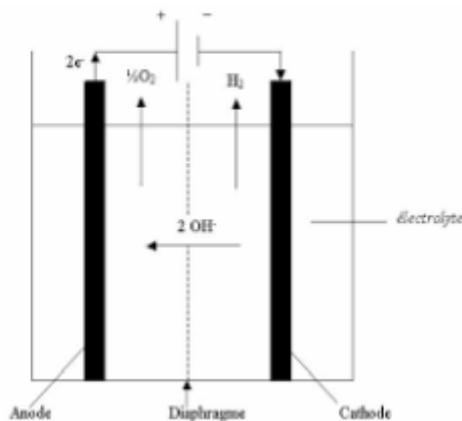


Fig. II.1 : principe de l'électrolyse alcaline. [16]

#### 2.4.2 Electrolyseur à haute température

L'électrolyse à haute température (entre 700 et 1000°C) fonctionne en décomposant les molécules d'eau en vapeur au niveau de la cathode.

La décomposition dépend donc de la nature de l'électrolyte, cependant, les températures élevées peuvent entraîner une décomposition. Requièrent l'emploi de matériaux spécifiques : c'est la raison pour laquelle l'électrolyte et les électrodes sont utilisés. On les fabrique à partir de céramiques [24]. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions super oxydes O<sub>2</sub><sup>-</sup>

Les réactions à l'électrode sont présentées ci-dessous en fonction du type d'électrolyte [15].

➤ Electrolyte à conduction d'ions super oxydes :



➤ Électrolyte à conduction protonique :

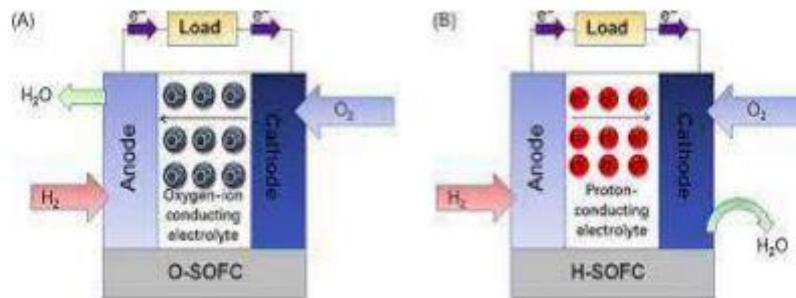


Fig II.2 : principe d'une électrolyse à haute température. [16]

## 2.5 Électrolyseur membrane échangeuse de protons (PEM)

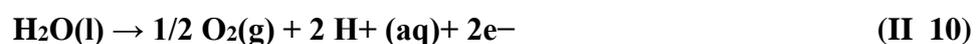
L'électrolyse PEM (membrane échangeuse de protons) est une méthode de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau consistant à séparer les électrodes par une membrane polymère étanche au gaz et fortement acide, laissant passer les ions  $\text{H}^+$ . Très réactive, elle peut être utilisée efficacement des énergies intermittentes. Elle demande néanmoins des matériaux très chers. Elle utilise une membrane polymère extrêmement fine (20-300 micromètres) qui est étanche au gaz et présente une forte acidité, permettant ainsi la circulation des ions  $\text{H}^+$  (protons). En d'autres termes, elle renferme des groupes fonctionnels sulfoniques ( $\text{R-SO}_3\text{H}$ ) qui jouent un rôle dans le processus d'échange d'ions. [17]

### 2.5.1 Principe de l'électrolyse PEM

Le principe de l'électrolyse PEM se distingue de celui de l'électrolyse alcaline en ce que l'électrolyte est un matériau polymère solide, constitué d'une membrane conductrice de protons. Les électrodes sont déposées de part et d'autre de ce matériau. [18]

#### a) Réaction chimique

➤ Réaction à l'anode est :



On parle aussi de réaction OER (Oxygen Evolution Reaction). Ensuite, les protons  $H^+$  « migrent vers la cathode à travers la membrane sous l'effet du champ électrique et du gradient de concentration où ils sont réduits en hydrogène moléculaire (avec les électrons provenant du pôle négatif du générateur) . [18]

➤ **Réaction à la cathode est :**



On parle aussi de réaction HER (Hydrogen Evolution Reaction).

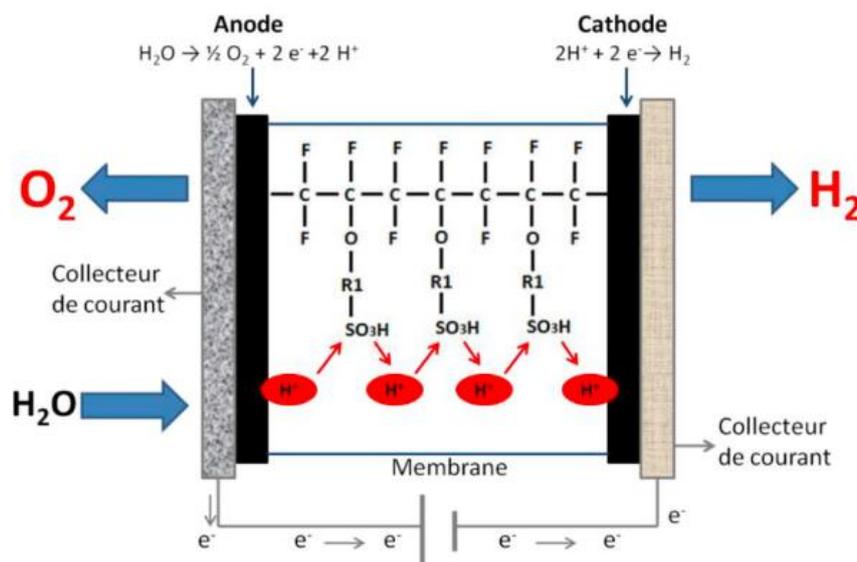


Fig. II.3 ; Principe d'une électrolyse PEM

C'est le principe inverse de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC).

### 2.5.2 Matériaux de l'électrolyse PEM

Les électrodes sont constituées d'une couche de catalyseurs (catalyseurs + ionomère) et d'une couche de diffusion. On utilise la couche de diffusion afin d'améliorer la circulation du courant et de faciliter le transport des réactifs et des produits. [17]

Le choix des catalyseurs nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs :

- L'activité catalytique vis-à-vis des réactions concernées,
- La stabilité chimique vis-à-vis de l'électrolyte et des produits de la réaction,
- La stabilité électrochimique en fonction du potentiel des électrodes,

- Le coût,
- La facilité à former, sur les membranes, des dépôts poreux, homogènes, adhérents ayant des
- Surfaces spécifiques importantes,
- La stabilité mécanique sous fort dégagement gazeux,
- La conductivité électronique,
- La sensibilité à l'empoisonnement,
- La morphologie (taille des cristaux, cristallinité, réseaux...). »

### **a. Cathode**

La platine est le catalyseur le plus attractif, cependant son coût pose problème (> 30 k€ kg<sup>-1</sup>). Certains catalyseurs tels que le cobalt et le fer pourraient également être efficaces pour la cathode, cependant ils ne sont pas stables dans les conditions d'électrolyse PEM. Une idée qui est en train d'être explorée est de les associer à des composés organiques [17]

### **b. L'anode**

Un des défis réside dans l'importance du potentiel de fonctionnement (1.6V par rapport à ESH), qui ne peut pas être porté par tous les matériaux utilisés.

En général, il est préférable d'utiliser l'oxyde d'iridium ou de ruthénium. L'iridium est rarissime 40 fois plus rare que l'or et 10 fois plus rare que le platine. [17]

#### **➤ Pour la membrane**

La membrane est généralement constituée d'un polymère échangeur de cation, avec le Nafion comme polymère le plus couramment employé. Nafion est un ionomère composé d'un squelette hydrophobe de type poly (tetrafluoroéthylène) (PTFE) sur lequel sont greffées des chaînes pendantes perfluorées (perfluorovinylether) terminées par des groupes sulfoniques. [17]

#### **➤ Plaques bipolaires et couches de diffusion**

Dans un stack de cellules d'électrolyse PEM, les plaques bipolaires ont pour rôle de fournir du courant et d'évacuer les gaz. Il s'agit des plaques équipées de tranchées perpendiculaires.

Elles font face à des contraintes complexes : un potentiel élevé et un environnement acide, le titane (ou un revêtement en titane) est fréquemment utilisé.

### 2.5.3 Rendements des PEM

De manière indépendante, le processus ne génère aucun gaz à effet de serre, ni lors de la production ni lors de l'utilisation d'hydrogène. La production d'électricité pose un problème, car elle est souvent très carbonée, ainsi que le rendement de l'opération.

Les prévisions concernant les performances des électrolyseurs PEM diffèrent considérablement. Voici quelques points de vue, que j'enrichirai avec le temps : Les performances énergétiques varient de 48% à environ 65%. [18]

Sociétés	Pays	Débit (Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Pression (Bars)	Energie consommée kWh Nm <sup>-3</sup> (Rendement ΔH)
Proton On Site	USA	0-230	1-30	4,2 (84 %)
Mitsubishi Corp.	Japon	1 30	1 à 8 400	Données indisponibles
Hydrogenics	Canada	0-2	1 à 8	4,2 (72 %)
CETH2	France	0-5 0-20	1-16 1-16	5,0 (70 %) 5,2 (65%)
HELION Hydrogen Power	France	0-10	1-50	Données indisponibles
GINER Electrochemical systems	USA	3	85	3,5
ITM Power	Grande Bretagne	0-5	1 à 200	6,25-7,14 (57-50 %)
h-tec Wasserstoff-Energy-System	Allemagne	3,6	30	Données indisponibles

Tableau II.1 : Liste des principaux fabricants d'électrolyseurs PEM [17]

### 2.5.4 Dimensionnements de l'électrolyseur PEM

Dans cette partie, nous expliquerons comment calculer la quantité de production

Dans les conditions normales actuelles de pression et de température, la teneur en hydrogène et Conditions couramment utilisées dans les électrolyseurs PEM commerciaux actuels

$$\dot{\eta} \text{ H}_2 = \frac{N_{\text{cell}} I}{N_e} \eta_f \quad (\text{II } 12)$$

$$\dot{\eta} \text{ H}_2 = \dot{n} \text{ H}_2 \text{O} = 2 \dot{n} \text{ O}_2 \quad (\text{II } 13)$$

$\eta \cdot H_2$  : quantité d'hydrogène produite

$n \cdot H_2O$  : quantité d'eau consommée

$n \cdot O_2$  : quantité d'oxygène produite

$\eta_f$  : rendement faradique

$N_{cell}$  : le nombre de cellules

$N_e$  : nombre d'électrons dans la réaction

$I$  : intensité du courant

#### **2.5.4.1 Production d'hydrogène à haute pression**

Afin de générer de l'hydrogène, il est nécessaire d'avoir un compresseur ou une pompe à l'entrée de l'électrolyseur ou à sa sortie. En d'autres termes, il est possible d'obtenir directement de l'hydrogène comprimé à la cathode ou de pomper de l'eau à l'anode. Ces deux approches Toutes deux peuvent produire de l'hydrogène à une pression élevée. Mais selon certaines personnes, études [19] Le pompage d'eau a démontré une réduction de la consommation d'eau. D'énergie pour la production de la même quantité d'hydrogène par rapport à la compression de ce gaz à l'électrolyseur sort [19,20].

#### **2.5.4.2 Production d'hydrogène à haute température**

Afin de modifier la température de l'électrolyseur et ainsi modifier le taux de production d'hydrogène, il sera nécessaire d'apporter une chaleur, que ce soit de l'extérieur ou par la surtension. L'intérêt de l'utilisation de la chaleur par Cette méthode contribue à l'environnement en diminuant la consommation d'énergie électrique, tout en réduisant la consommation d'énergie. Cette chaleur nécessite un équipement supplémentaire, (comme les concentrateurs solaires). En cas de surtension de la cellule, la consommation d'énergie. Électrique sera croissante [19,20]. Soit en volt la tension appliquée à la cellule d'électrolyse [19],

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

-si,  $E^\circ < U_{cell} < V^\circ$  Il est essentiel d'avoir un apport externe de chaleur afin de garantir une transformation autotherme (tension réversible).

-si,  $U_{cell} > V^\circ$  La chaleur requise est générée par la surcharge électrique dans la cellule (tension irréversible).

Étant donné que  $E^\circ$  correspond à la tension thermodynamique minimale nécessaire pour la dissociation d'une molécule d'eau (V),

$V^\circ$  La tension enthalpique ou thermo-neutre est la tension nécessaire pour que l'électrolyseur produise lui-même de la chaleur (V). La tension appliquée à la cellule de l'électrolyse est appelée  $U_{cell}$ .

### 2.5.4.3 Rendement faradique

Afin de saisir le concept du rendement faradique, il est nécessaire de se référer à l'intérieur de l'électrolyseur, plus précisément à la membrane. Elle facilite le transfert des ions  $H^+$  de l'anode vers la cathode, mais parfois également l'inverse, c'est-à-dire la recombinaison de  $H_2$  afin qu'il puisse être renvoyé. Il est ré-oxylé en protons, ce qui permet de réduire l'oxygène en eau. Cette capacité à réversibilité Il s'agit de la porosité des membranes et des courants parasites qui causent des perturbations. L'efficacité du principal courant. Autrement dit, le rendement faradique correspond au rapport. Entre la quantité de courant nécessaire pour générer une quantité spécifique d'hydrogène et la consommation de courant à l'électrolyseur [20]

$$\eta f = a_1 \cdot \exp\left[\frac{a_2 + a_3 T + a_4 T^2}{J} + \frac{a_5 + a_6 T + a_7 T^2}{J^2}\right] \quad (\text{II } 14)$$

Les paramètres de l'équation [27]

$$a_1 = 99.5 \%$$

$$a_2 = -9.5788 \text{ m}^2 / \text{A}$$

$$a_3 = -0.0555 \text{ m}^2 / (\text{A } ^\circ\text{C})$$

$$a_4 = 0$$

$$a_5 = 1502.7083 \text{ m}^4 / \text{A}$$

$$a_6 = -70.8005 \text{ m}^4 / (\text{A } ^\circ\text{C})$$

$$a_7 = 0$$

$J$  : la densité électrique [ $A/m^2$ ]

$T$  : température [ $^{\circ}C$ ]

Voici le schéma bloc Simulink pour le rendement faradique :

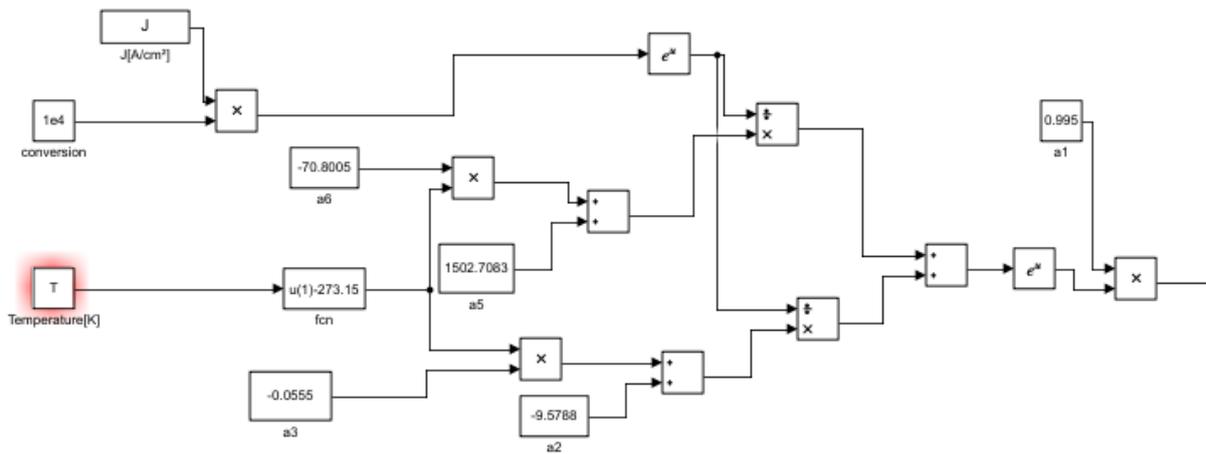


Fig. II.4 : Schéma simulation Simulink du rendement faradique

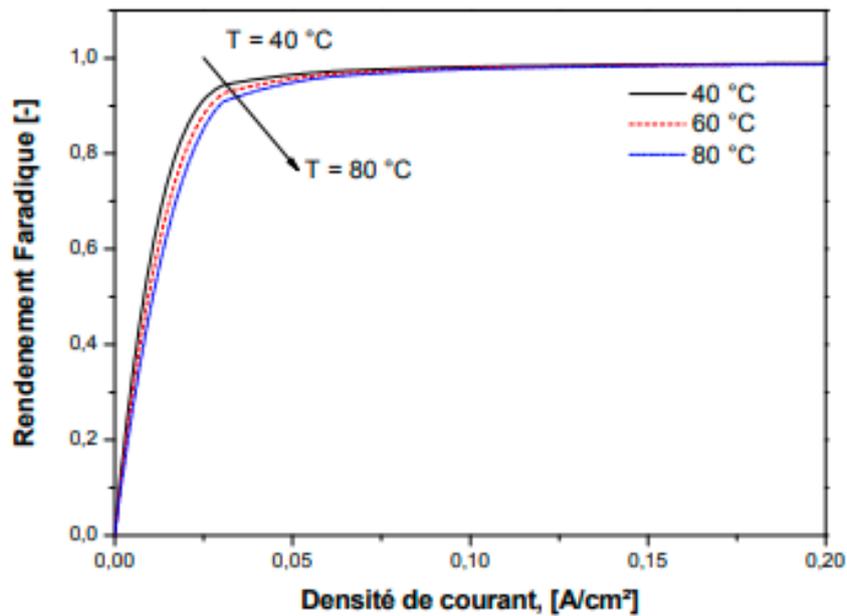


Fig. II.5 : rendement faradique en fonction de densité de courant et de la température [19]

Selon la Fig. II.5 : il est observé que la densité de courant augmente le rendement Faradique, ce qui entraîne une diminution des courants parasites. De plus, l'augmentation de la température réduit la résistance et favorise ainsi les courants parasites, ce qui entraîne une baisse du rendement Faradique [19]. Un schéma bloc Simulink est proposé afin d'évaluer le taux de production d'hydrogène et de calculer le rendement Faradique.

#### 2.5.4.4 Estimation du taux de production d'hydrogène

Dans cette partie nous allons faire un schéma Simulink afin de représenter la production d'hydrogène en Nm<sup>3</sup>/h. Nous ferons usage d'une version modifiée de la loi de Faraday, qui intègre l'efficacité faradique à la température. Le calcul considérera une température de 333 K (qui correspond à 60°C) et des cellules avec une surface de 100 cm<sup>2</sup>. Et nombre de cellules égale à  $N_{cell} = 20$

$$nH_2 = \frac{N_{cell} \cdot S_{cell} \cdot J}{2F} \cdot \eta_f \quad (\text{II 15})$$

$nH_2$  : quantité d'hydrogène

$N_{cell}$  : nombre de cellules

$J$  : densité de courant

$S_{cell}$  : surface des cellules

$F$  : constante de faraday

$\eta_f$  : rendement faradique

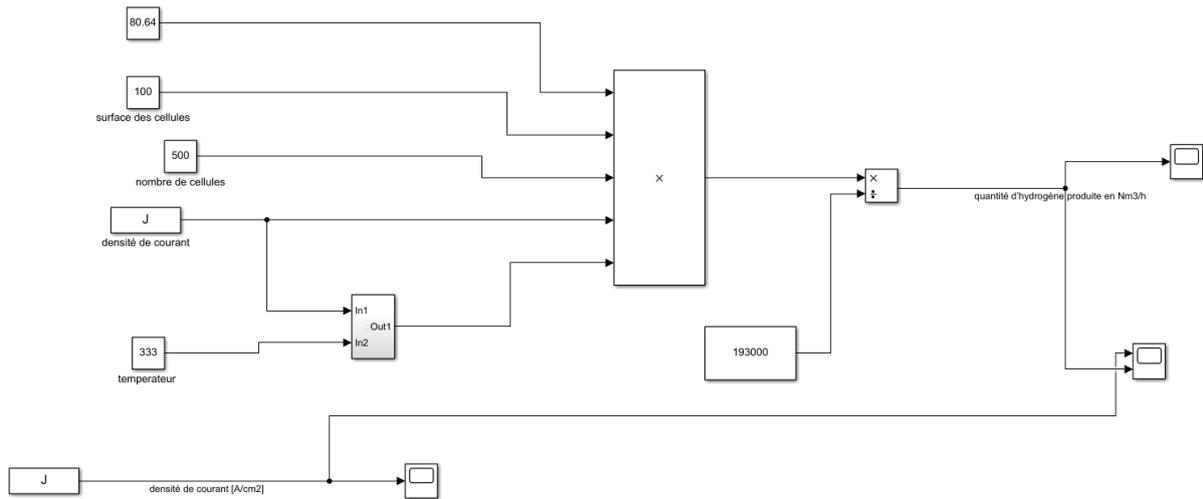
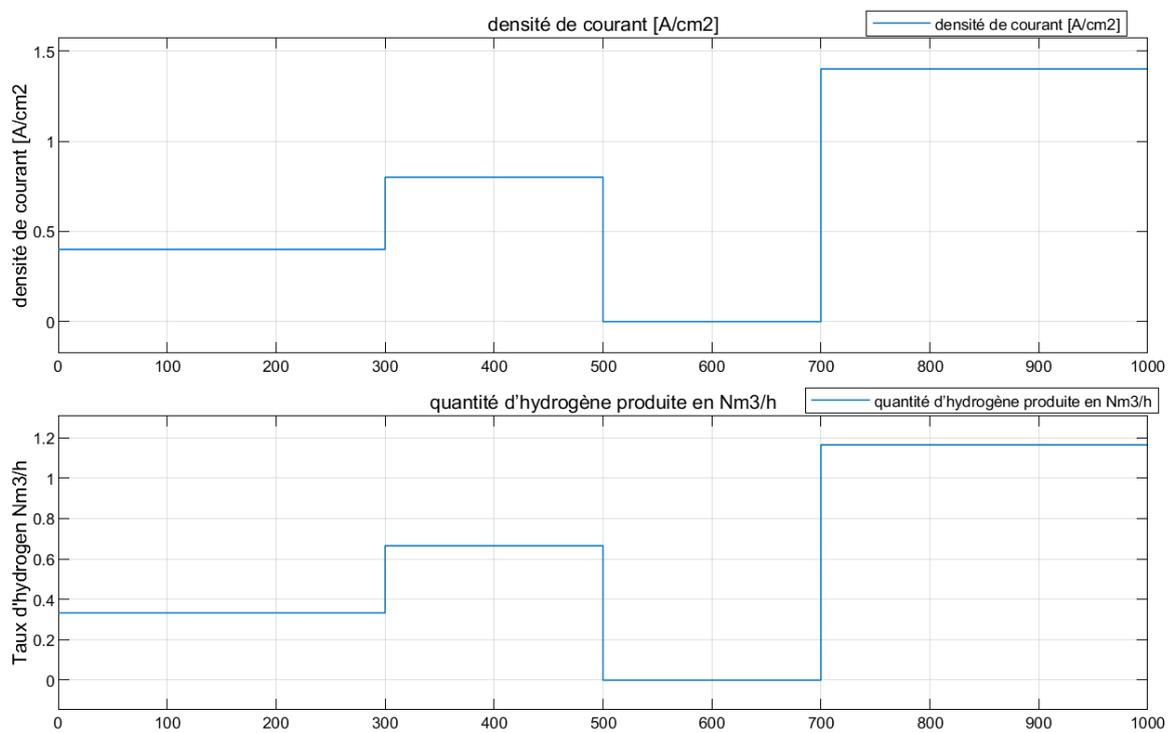


Fig. II.6: schéma Matlab Simulink de la production d'hydrogène en m3 /h

Fig. II.7: résultat de la simulation pour  $N_{\text{cell}}=20$

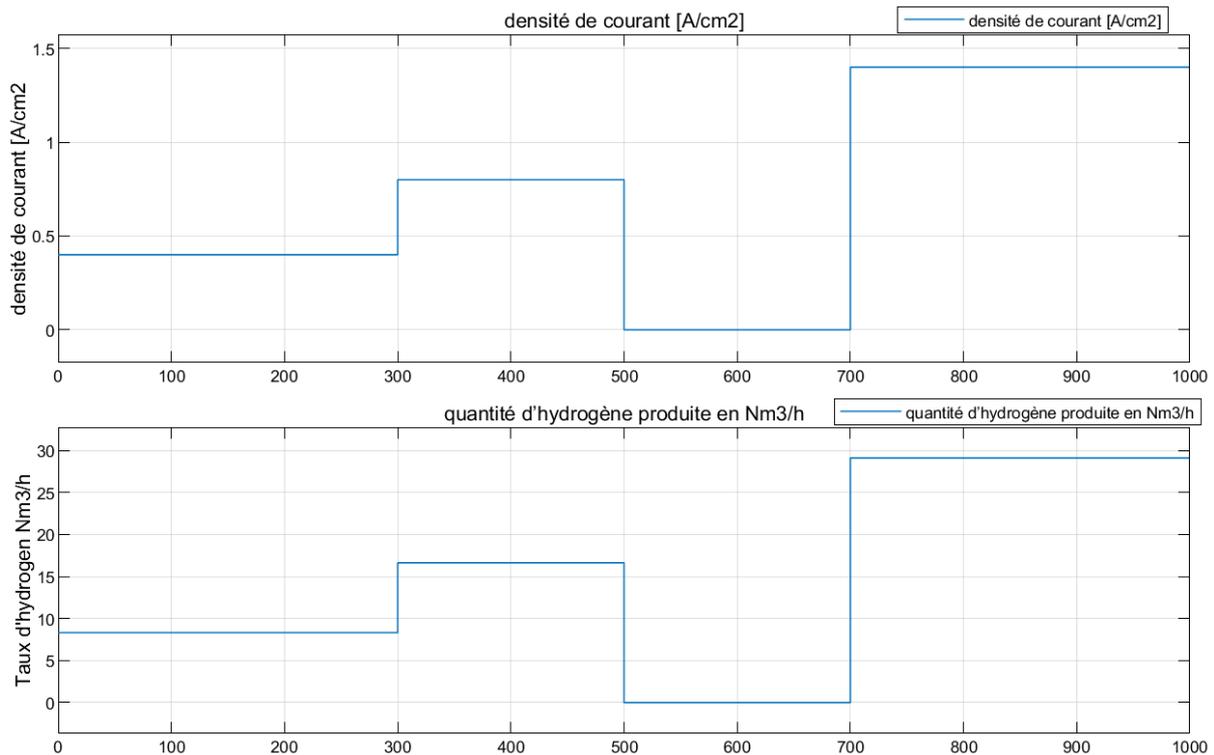


Fig II.8: résultat de la simulation pour  $N_{\text{cell}}=500$

En observant les deux graphiques avec des concentrations de cellules différentes (20 cellules et 500 cellules), il est évident que la densité du courant et le débit d'hydrogène augmentent, La densité de courant et la quantité d'hydrogène produite sont donc en effet proportionnellement liées. Cependant, le changement du nombre de cellules a un impact direct sur la densité de courant,

## 2.6 Avantages et inconvénients de l'électrolyse PEM

### ➤ Les avantages [17]

- Plus compacts (l'électrolyte prend moins de place) ;
- Plus portables (l'absence de liquide est pratique) ;
- Plus réactifs (ils peuvent être combinés avec une source d'énergie intermittente, permettant le « power to gas ») ;
- Il y a moins de contamination entre les gaz produits ;
- Peuvent fonctionner à des densités de courant supérieures, de l'ordre de  $2,0 \text{ A/cm}^2$
- L'hydrogène produit est Plus pur.

➤ **Les inconvénients [17]**

- Les besoins en métaux nobles (platine, iridium, ruthénium) pour les électrodes et en titane pour les plaques de séparation.
- Le prix élevée de la membrane
- Une durée de vie plus courte que les électrolyseurs alcalins

### **3 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'approfondir notre compréhension des électrolyseurs et de leur importance dans la production d'hydrogène, une énergie propre et prometteuse pour l'avenir. Après avoir étudié les principes de fonctionnement des électrolyseurs et examiné les divers types disponibles, nous avons pu constater comment chaque technologie répond à des exigences particulières. L'accent mis sur les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) a souligné leur pertinence dans l'industrie actuelle, en raison de leur efficacité et de leur capacité d'adaptation. Les PEM sont largement adoptés pour les avantages qu'ils offrent, notamment en matière de rendement. Cette technologie se positionne donc comme essentielle pour la transition énergétique, permettant une utilisation croissante dans des applications variées et durables.

De plus, une simulation a été réalisée pour évaluer le rendement faradique et la quantité d'hydrogène produite en fonction de la densité de courant. Cette simulation a permis d'analyser de manière précise la performance des électrolyseurs PEM sous différentes conditions, fournissant des données essentielles pour optimiser leur efficacité et leur intégration dans des systèmes énergétiques futurs.

# Chapitre III : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

## 1 Introduction

Les préoccupations mondiales actuelles se concentrent sur le développement des énergies renouvelables pour faire face aux défis énergétiques contemporains. Parmi ces sources, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue par sa capacité à fournir une énergie propre et inépuisable, et se révèle particulièrement prometteuse pour l'alimentation des électrolyseurs. Ce chapitre se penche sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour alimenter ces dispositifs. Nous explorerons les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, leur efficacité, ainsi que les défis associés à leur intégration dans les réseaux électriques afin d'assurer une alimentation stable des électrolyseurs. Ensuite, nous nous concentrerons sur le suivi du point de puissance maximal (MPPT), une technique essentielle pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques lors de l'alimentation des électrolyseurs. En conclusion, nous présenterons une simulation du modèle MPPT, illustrant son rôle clé dans la maximisation de la production d'énergie solaire pour le fonctionnement optimal des électrolyseurs.

## 2 Système solaire photovoltaïque :

Le soleil fait partie d'une multitude d'étoiles. Sa longueur est de 13990000 km, soit environ 50 fois plus grande que celle de la Terre. Aujourd'hui, il est constitué de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments. C'est l'énergie de fusion nucléaire qui donne au soleil sa puissance. Le soleil est considéré comme une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium qui transforme chaque élément. La réaction se produit en transformant 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. À une température d'environ 25 millions de degrés Celsius dans son noyau. Donc, à chaque instant, Le soleil est réduit de 4 million de tonnes de rayonnement dispersé. Sa lueur, à une certaine Avec une vitesse de 300000 km/s, cela prend 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  $\mu$  m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780 °k [21].

## 2.1 Principes de calcul de l'énergie solaire :

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite [22].

- a) **La latitude( $\psi$ )** : C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, 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 [22].
- b) **La longitude** : Symbolise l'angle établi entre le plan méridien du lieu en question et le plan méridien d'origine. Celui-ci utilise l'observation de Greenwich et possède une longitude. Les longitudes de ce méridien sont positives tandis que celles de l'Ouest sont négatives [22].
- c) **L'altitude** : L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer mesurée en mètre(m) [22].
- d) **La déclinaison( $\delta$ )** : Il s'agit de l'angle entre le soleil et le plan équatorial. Elle exprime la rotation du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Les variations de déclinaison sont de  $-23,45^\circ$  (le 21 décembre) à  $23,45^\circ$  (le 21 juin) (fig. I.1). La variation de cet angle est très faible tout au long de la journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil en utilisant une rotation sur un cône d'axe équateur [22].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right)$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année

## 2.2 Position du soleil :

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- La hauteur angulaire( $h$ ) : L'angle déterminé par la direction du soleil et le plan horizontal est responsable de la longueur de la traversée de l'atmosphère. Il oscille entre 00 (au lever et au coucher) et son maximum au zénith (au cours du midi en temps solaire réel). Lorsque le sinus est en tension le côté négatif réside dans le fait que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie selon les saisons). Il est. Écrivez donc cette variable :

$$\sin(h) = \sin(\psi) \sin(\rho) + \cos(\psi) \cos(\rho) \cos(\delta)$$

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

$$\cos(\rho) = -\tan(\psi) \tan(\delta)$$

- Où ( $\delta$ ) la déclinaison calculée d'après l'équation (I.1) et ( $\psi$ ) la latitude du lieu.  
Azimut du soleil ( $\beta$ ) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [22].

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta) \sin(\rho)}{\cos(h)}$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure (III.1)

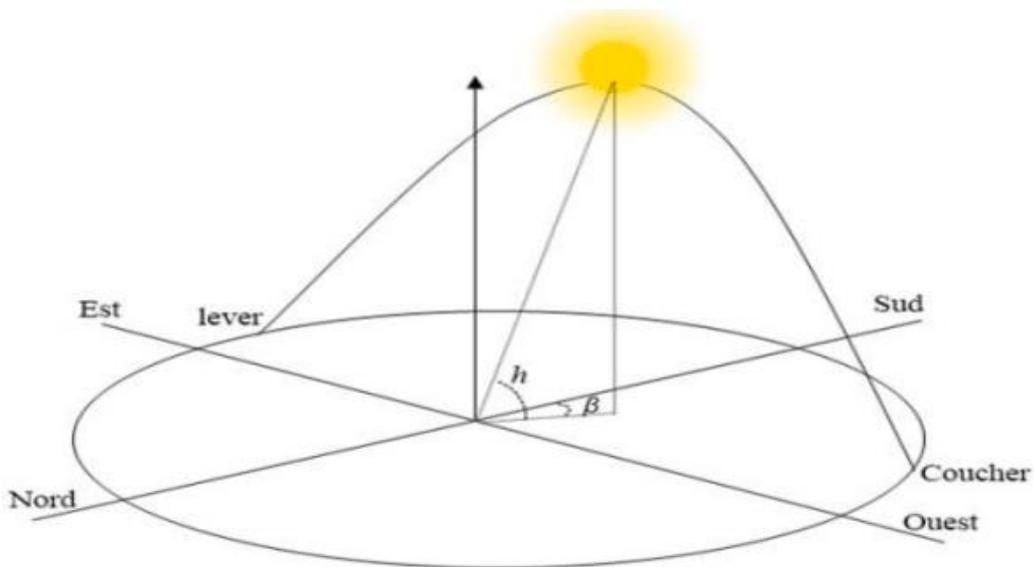


Fig. III.1: Position du soleil [22].

### 2.3 Conversion photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque solaire est l'une des énergies renouvelables les plus couramment employées. À travers l'espace, elle est envoyée à la Terre sous la forme de photons et de rayonnement électromagnétique. La méthode implique la transformation directe du rayonnement solaire en électricité. La conversion photovoltaïque repose sur l'utilisation de

convertisseurs photovoltaïques ou de cellules photovoltaïques, qui constituent l'élément essentiel. [24]

## 2.4 L'effet photovoltaïque

La photovoltaïque se produit lorsque l'on absorbe un photon dans un matériau constitué de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), appelé jonction p-n (ou n-p). L'effet de ce dopage provoque la présence d'un champ électrique permanent dans le matériau (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Lorsqu'un photon indésirable (grain de lumière) entre en contact avec les électrons du matériau, il transmet son énergie ( $h\nu$ ) à l'électron qui se trouve libéré de sa bande de valence et est donc soumis au champ électrique intérieur. En raison de ce champ, l'électron se déplace vers la face supérieure, ce qui laisse place à un trou qui se déplace en sens inverse. Les électrons sont collectés grâce à des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure. et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure, ainsi se crée un courant électrique. [25]

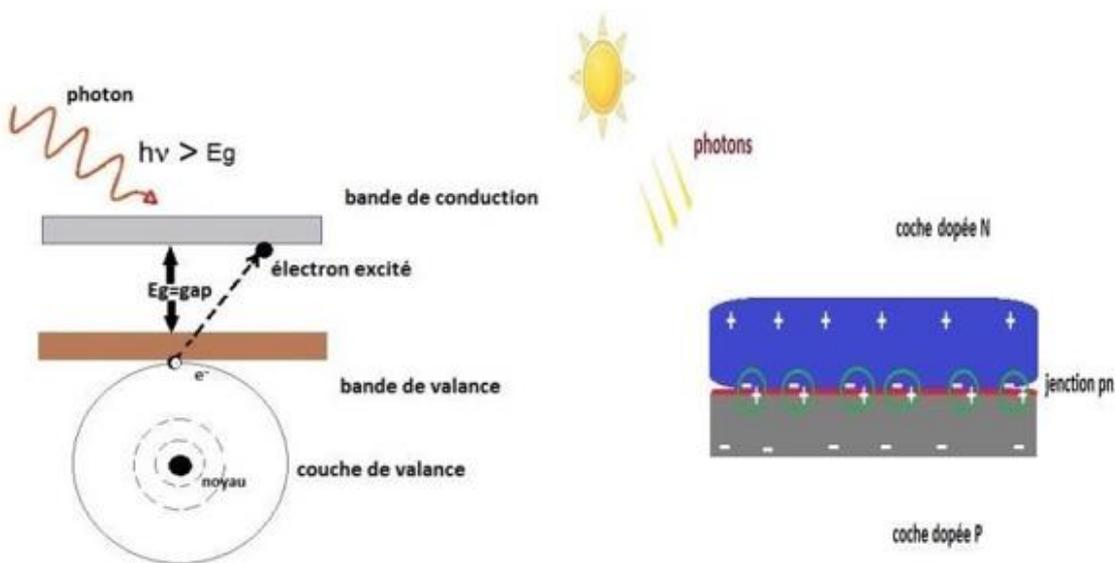


Fig. III.2: Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N). [26]

## 2.5 Module photovoltaïque :

On peut fabriquer une cellule photovoltaïque en utilisant différents semi-conducteurs. En effet, trois filières technologiques majeures existent aujourd'hui : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces secteurs ont une répartition inégale du marché. Les

connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même Courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère

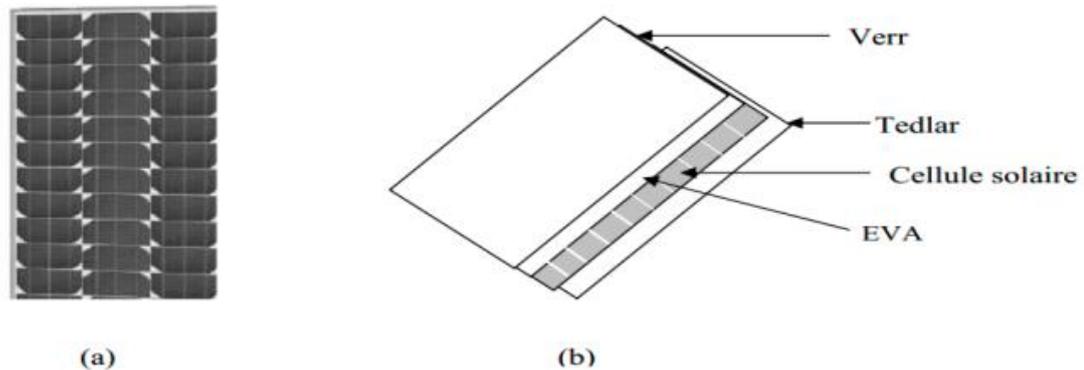


Fig. III.3 : Module photovoltaïque

a : Module photovoltaïque

b : Cellule solaire

## 2.6 Cellule photovoltaïque :

L'élément essentiel qui permet de convertir directement l'énergie solaire (rayon lumineux) en énergie électrique est la cellule photovoltaïque. Ce processus de transformation s'appuie sur un principe bien connu, à savoir l'effet photovoltaïque. Il est essentiel de trouver des matériaux semi-conducteurs qui permettent d'optimiser les deux étapes essentielles de l'effet photovoltaïque, à savoir l'absorption de la lumière incidente et la collecte des électrons en surface.

### 2.6.1 Cellules à base de silicium monocristallin :

Les cellules sont fabriquées avec du silicium parfaitement cristallisé découpé dans des barres. C'est le matériau le plus répandu, et de plus il a l'avantage d'avoir un très bon rendement, entre 12 % et 16 %. L'inconvénient en est le prix, du fait d'un procédé de fabrication long et

énergivore. On l'emploie en plein air pour les grandes et moyennes puissances (habitations, relais, télécommunications...). [27]



Fig. III.4 : Cellules à base de silicium monocristallin.

### 2.6.2 Cellules à base de silicium multi cristallin (Poly cristallin)

De nos jours, le silicium multicristalin (polycristalin) est la technologie la plus couramment employée. Elle représente à elle seule près de la moitié du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux des siliciums, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14 % selon le fabricant. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les couts de production sont donc plus faibles [27]

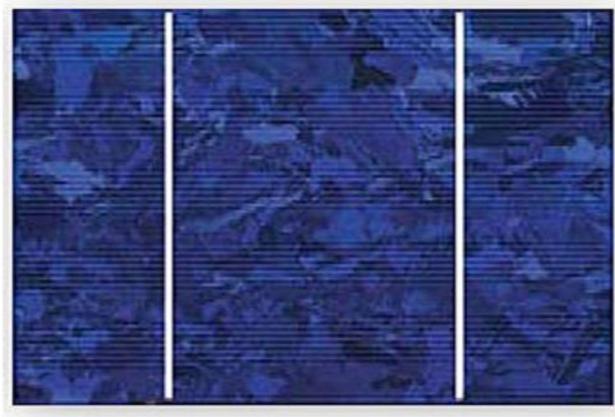


Fig. III. 5 : Photos de cellule multi cristalline. [36]

### 2.6.3 Cellules à base de silicium amorphe

La couche mince de silicium est appliquée sur une plaque de verre ou un autre support polyvalent. Les atomes sont organisés de manière irrégulière, ce qui entraîne en partie une mauvaise semi-conduction. Partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est requise, les cellules amorphes sont employées, comme pour alimenter des montres, des calculatrices ou des luminaires de secours. Elles ont un coefficient d'absorption élevé, ce qui permet de très faibles épaisseurs, d'environ un micron. En revanche, il présente un faible taux de conversion (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement lorsqu'elles sont exposées à la lumière. [28]



Fig. III.6: Panneau solaire en silicium amorphe. [28].

### 2.6.4 Cellules base organiques et plastiques :

Leur structure est constituée d'une double couche de molécules évaporées sous vides, avec un rendement de conversion de 0,95%. Ces cellules se divisent en deux types : les cellules "humides" et les cellules polymères organiques, également appelées cellules "plastiques". Le développement de ces technologies est extrêmement rapide, les records de performance sont souvent dépassés (actuellement près de 6%).Elles offrent aussi la possibilité d'utiliser des applications légères, nomades et adaptables. [25]

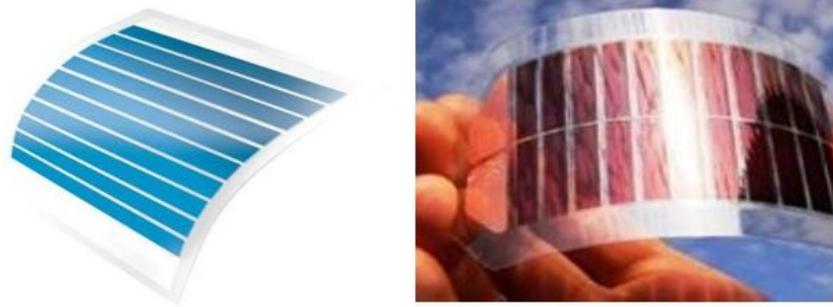


Fig. III. 7 : Cellule PV organique [28].

Technologies	Monocrystalline	Polycrystalline	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Excellente performance : de 14 à 20 %.</li> <li>-Longévité : significative (30 ans)</li> <li>-Le coût de production est élevé.</li> <li>-Puissance : 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup>. 7 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>-Rendement médiocre avec un éclairage limité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement : 11 à 15 %.</li> <li>-Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>Le prix de production est plus abordable</li> <li>-Capacité : 100 Wc/m<sup>2</sup>. 8 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>-Rendement médiocre avec un éclairage limité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible : 5 à 9 %.</li> <li>-Durée de vie : assez importante (20ans)</li> <li>-Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies</li> <li>-Puissance : 50Wc/m<sup>2</sup>. 16 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>-Fonctionnement correct avec un éclairage faible.</li> </ul>
Part de Marché	<b>43 %</b>	<b>47 %</b>	<b>10%</b>

Tableau III.1: Comparatif des différentes technologies cellules. [30]

### 3 Systèmes Photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée.

#### 3.1 Système autonome :

On installe ces systèmes photovoltaïques afin de garantir un fonctionnement autonome sans avoir besoin d'autres sources d'énergie. Ces systèmes sont généralement employés dans les zones isolées et éloignées du réseau.[31]

Les deux catégories de systèmes solaires autonomes comprennent :

##### ❖ Système autonome avec stockage :

Système de stockage autonome Il s'agit du système le plus commun. Le dispositif de stockage a pour fonction de stocker de l'énergie et de la rendre à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (durant la nuit). Il y a différents éléments de stockage, parmi lesquels les batteries électrochimiques sont les plus courantes. [31]

##### ❖ Système autonome sans stockage :

Dans cette situation, le dispositif alimenté ne sera en marche qu'en présence d'un éclairage solaire adéquat pour le démarrage. Il est pertinent pour toutes les applications qui ne nécessitent pas de fonctionner dans l'obscurité et pour lesquelles la demande d'énergie est liée à la présence de rayonnement solaire. Un exemple de cette catégorie de système autonome est le pompage photovoltaïque, où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement privilégié par rapport au stockage électrochimique. [31]

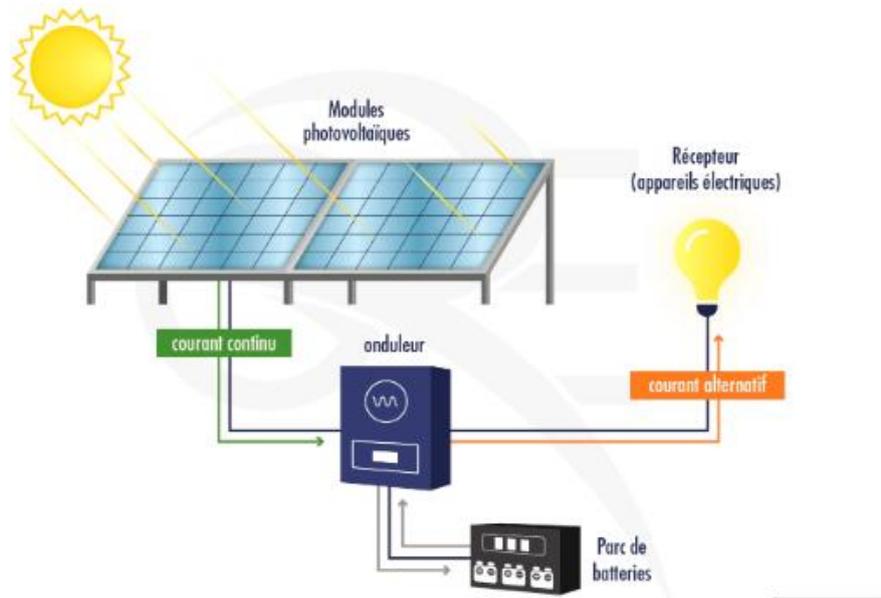


Fig. III.8 : Système PV autonome

### 3.2 Système PV raccordé au réseau :

Les dispositifs reliés au réseau ont pour effet de diminuer la consommation d'électricité du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie surconsommée. Il est possible que le service public vous attribue l'énergie renvoyée au réseau. Comme l'énergie est généralement stockée dans le réseau même, il n'est pas nécessaire d'utiliser des accumulateurs, à moins que vous ne souhaitiez une forme autonome d'énergie lors des pannes d'électricité. On utilise ces systèmes dans les bâtiments, les maisons ou les chalets qui sont déjà connectés au réseau électrique [32].

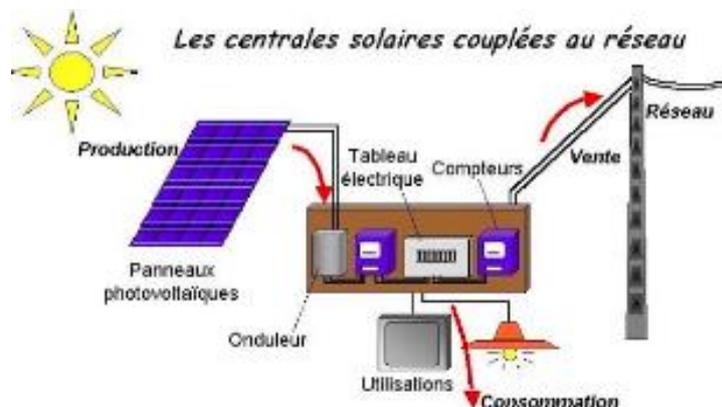


Fig. III.9: Système PV raccordé au réseau.

### 3.3 Système PV hybride

Les systèmes photovoltaïques hybrides combinent un système photovoltaïque avec un autre : des éoliennes, un groupe électrogène... et parfois même le réseau public. Les batteries stockent généralement l'énergie pour éviter la perte d'énergie provenant de sources aléatoires comme l'énergie solaire ou éolienne. Il est difficile pour ces systèmes d'équilibrer les différentes sources d'énergie afin de les optimiser, car nous sommes tous conscients que la source de chaleur (diesel, gaz, etc.) et le réseau public sont toujours les moyens de dernière instance. [32]

## 4 Générateur photovoltaïque :

Les générateurs photovoltaïques représentent une partie de la production d'énergie Cette section est principalement composée d'un ou de plusieurs panneaux solaires. On construit ces modules en utilisant des cellules photovoltaïques en série/parallèle afin de transformer l'énergie solaire en électricité [33]

### 4.1 Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure III.10. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA Fig. III.16 et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. [34]

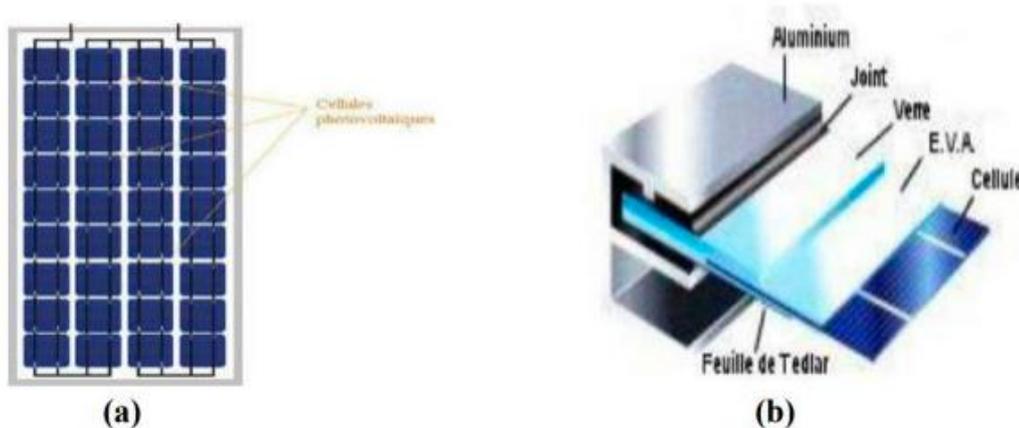


Fig. III.10: Module photovoltaïque

## 4.2 Montage en série :

Lorsque des cellules ou des modules identiques sont ajoutés en série, le courant de la branche demeure constant, mais la tension augmente en fonction du nombre de cellules (modules) en relation. Les illustrations III.11 illustrent l'importance de l'intégration des cellules ou des modules. Les panneaux solaires identiques en série [35]

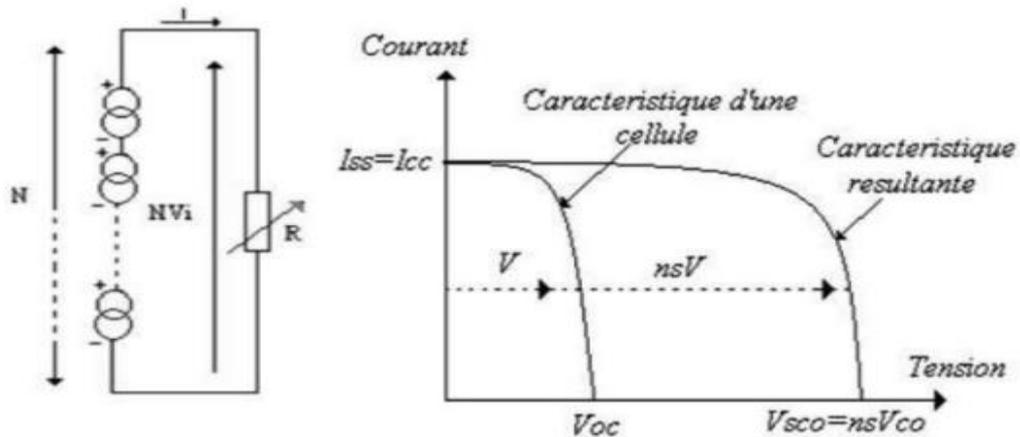


Fig. III.11 : Caractéristiques de groupement série des cellules [34]

## 4.3 Montage en parallèle :

En combinant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente en fonction du nombre de modules en parallèle dans la branche. Les illustrations III.12 illustrent l'importance de l'association. L'utilisation simultanée de cellules ou de modules photovoltaïques identiques [35].

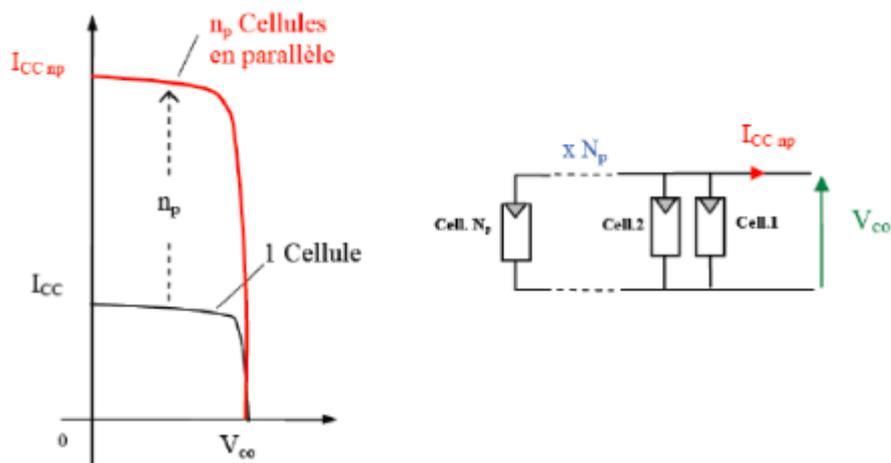


Fig. III.12 : Caractéristiques de groupement parallèle des cellules

## 5 Commande MPPT :

Un MPPT, ou Tracker de Point de Puissance Maximale, est un concept qui permet de surveiller, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En général, les systèmes MPPT sont liés aux générateurs. Les panneaux solaires ou encore les générateurs éoliens [36].

### 5.1 Principes de Conversion dans les Systèmes PV

L'élément central d'un système photovoltaïque est le générateur photovoltaïque, mais pour une application concrète, d'autres éléments sont indispensables, comme le stockage de l'énergie, la régulation de la circulation du flux d'énergie ou l'alimentation du réseau alternatif. Ces éléments supplémentaires représentent une part importante du coût, entraînent une diminution du rendement et ont une influence significative sur le comportement et les performances de l'ensemble du système.

### 5.2 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Les caractéristiques  $I(V)$  d'un GPV ne sont pas linéaires et les points de puissance maximaux (PPM). Ces propriétés varient en fonction de l'intensité lumineuse et de la température de la cellule. En outre, en fonction des propriétés de la charge sur laquelle le GPV débite, il est possible de déterminer un très élevé.

Le générateur présente une grande disparité entre la puissance potentielle et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Pour obtenir le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, la méthode traditionnelle consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge, tel que décrit dans la figure III.13. Cet étage agit en tant qu'interface. Entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P<sub>MAX</sub> disponible [37].

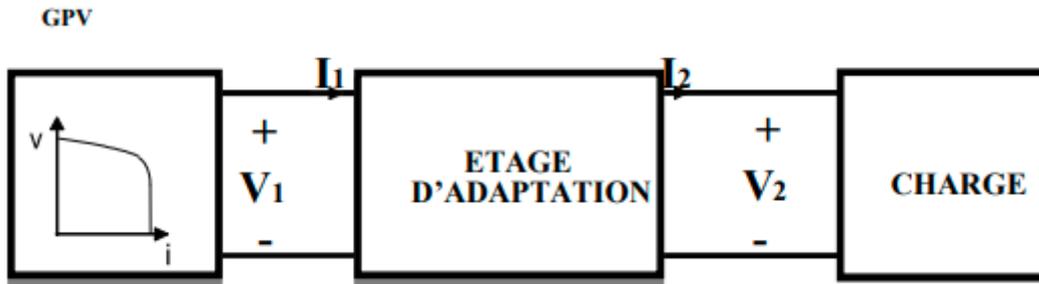


Fig. III.13 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [48]

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

### 5.3 Convertisseur DC/DC

La figure. III. 14 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

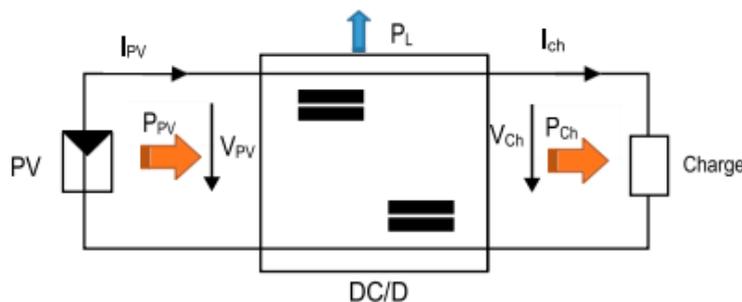


Fig. III.14 : convertisseurs DC-DC [38]

Les convertisseurs DC-DC offrent une grande souplesse et un rendement élevé pour contrôler la puissance électrique dans les circuits en courant continu. Dans les hacheurs, les circuits sont constitués de condensateurs, d'inductances et de fusibles. Si tel est le cas. En règle générale, tous ces dispositifs ne nécessitent aucune puissance active, ce qui explique les bons rendements. Le dispositif semi-conducteur utilisé dans le commutateur est généralement un transistor MOSFET ou un IGBT qui fonctionne en mode (bloqué/saturé).

En Cas de blocage du dispositif semi-conducteur, son courant est nul, ce qui entraîne une dissipation de puissance nulle. En cas de saturation du dispositif, la baisse de tension à ses bornes sera quasiment nulle, ce qui signifie que la puissance perdue sera très faible. [39]

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Tableau III.2 : Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC. [39]

Notre étude explore le fonctionnement d'un convertisseur DC/DC de type Boost, qui est couramment employé dans les systèmes photovoltaïques afin de produire les tensions et les courants désirés. Le convertisseur de ce genre ne se compose que d'éléments réactifs (Selfs, Capacités), Dans l'idéal, ils ne nécessitent aucune énergie. C'est pourquoi ils se distinguent par leur rendement élevé [39].

#### 5.4 Étage d'Adaptation de Type BOOST :

Prenons l'illustration de la figure III.15 qui illustre un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce genre de convertisseur peut servir de source de charge adaptateur lorsque la charge nécessite une tension supérieure à celle du générateur photovoltaïque. [38]

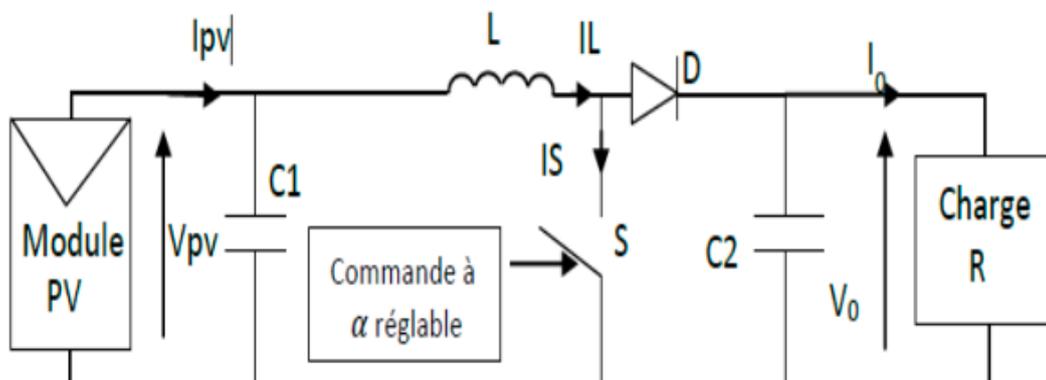


Fig. III.15 : Exemple de convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur

Le transistor (S) est initialement fermé ( $\alpha T$ ), le courant dans l'inductance augmente progressivement, et progressivement, elle stocke de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Le transistor (S) s'ouvre ensuite et l'inductance (L) s'oppose à la baisse du courant. La diode (D) produit une tension supplémentaire qui s'ajoute à la tension de source et qui est appliquée à la charge (R) [40].

### 5.5 Principe De La Commande MPPT

En termes de définition, une commande MPPT, combinée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de manière à optimiser constamment sa puissance. De cette manière, peu importe les conditions météorologiques (température et éclairage), la gestion du Le convertisseur positionne le système au maximum de sa performance (VPPM et IPPM). L'optimisation de la chaîne de conversion photovoltaïque sera réalisée grâce à l'utilisation d'un convertisseur statique (CS) réglé par une MPPT [40]. On peut le visualiser à l'aide du schéma de la Fig. III. 16.

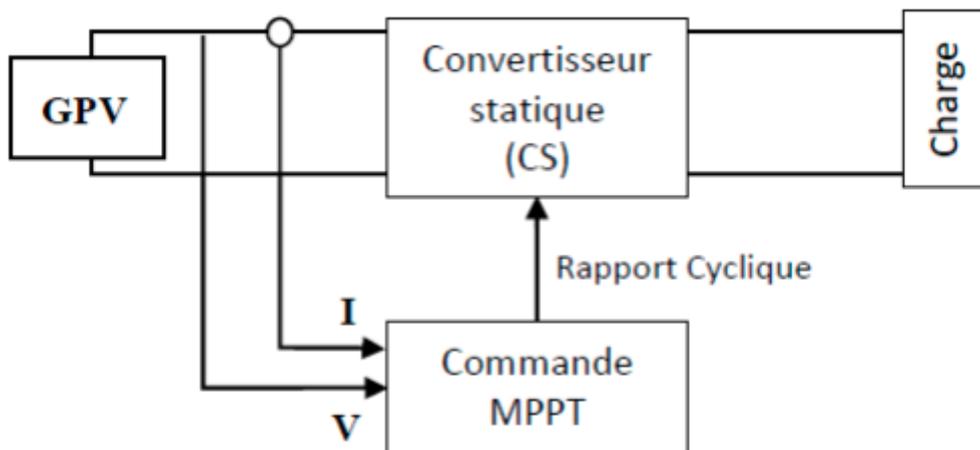


Fig. III. 16 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT permet de modifier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) en utilisant un signal électrique adéquat afin de maximiser la puissance offerte par le GPV. La recherche du MPP peut être plus ou moins complexe grâce à l'algorithme MPPT. En règle générale, il repose sur la variabilité. En fonction de l'évolution des paramètres d'entrée du CS ( $I$  et  $V$ , et donc de la puissance du GPV), le rapport cyclique du CS se déplace jusqu'à atteindre le MPP. [38]

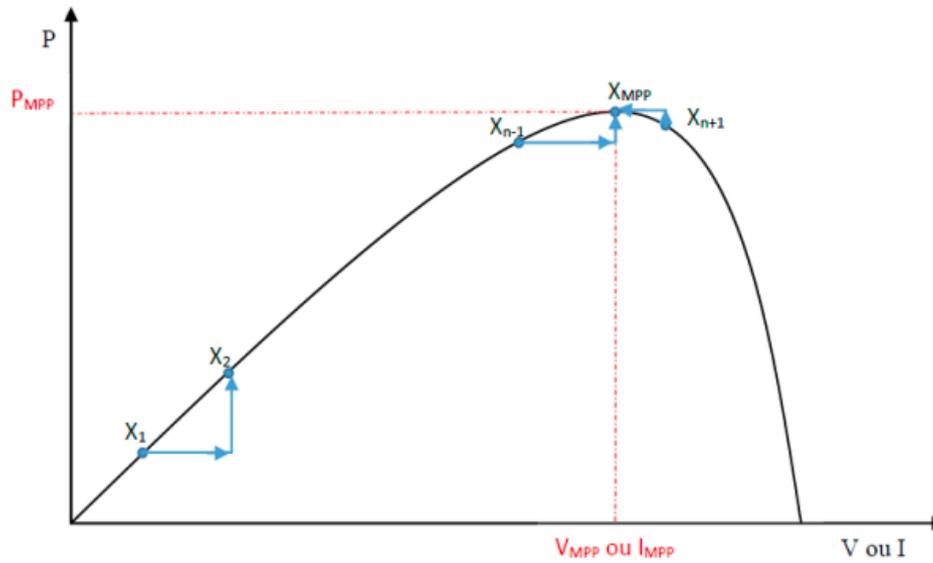
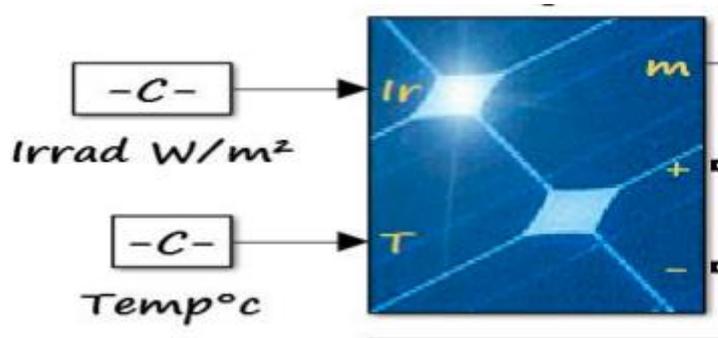


Fig. III. 17 : Principe de la commande MPPT

## 5.6 Simulation du système photovoltaïque

### a) caractéristiques d'un GPV

Pour simuler le comportement du GPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en sous Simulink du block PV Array



Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module:

Maximum Power (W)

Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V)

Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V)

Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Display I-V and P-V characteristics of ...

one module @ 25 deg.C & specified irradiances

T\_cell (deg. C)

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current I0 (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Fig. III.18: Paramètre du PV

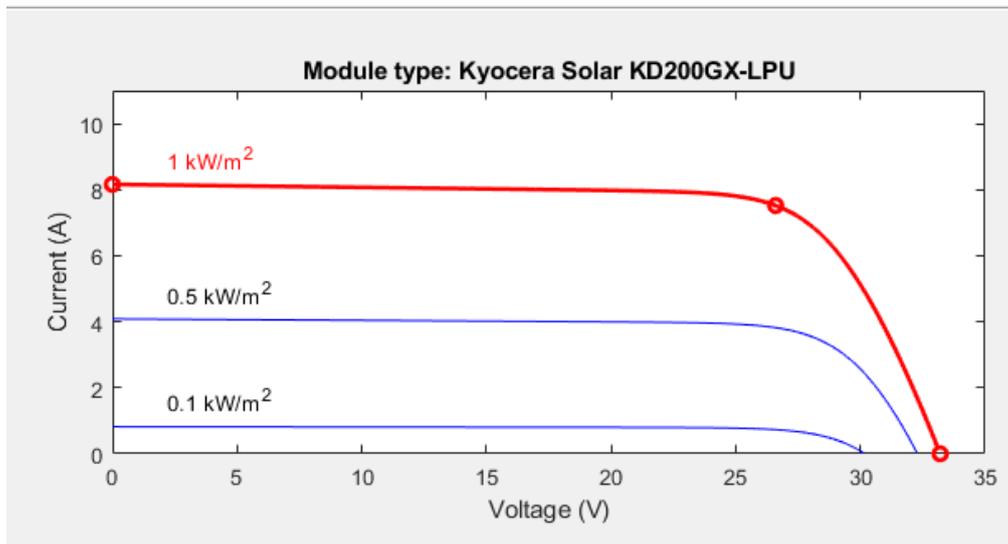


Fig.III.19 Caractéristique I-V de GPV avec irradiances (w/m2) [1000 500 100].

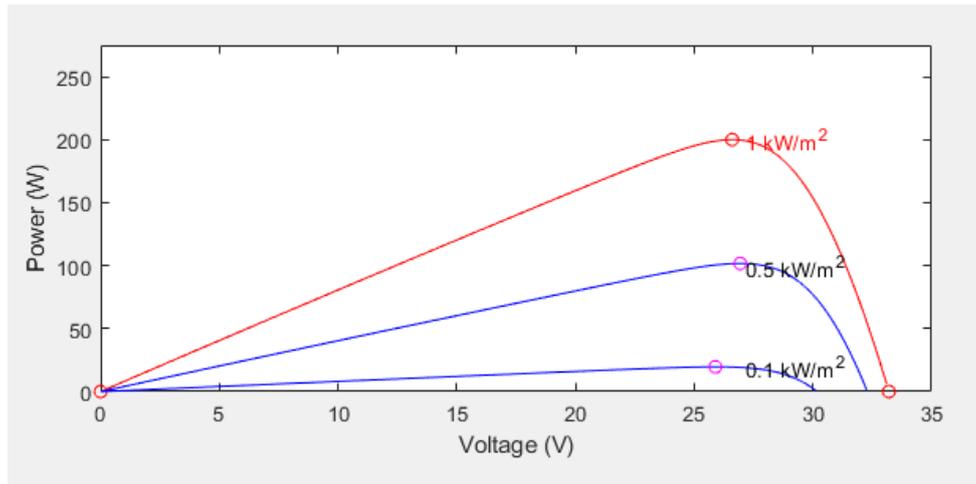


Fig.III.20 Caractéristique P-V de GPV avec irradiations (w/m2) [1000 500 100].

La Figure III.19 représente les caractéristiques de la courant de sortie en fonction de la tension pour une irradiation variable [1000 500 100] W/m<sup>2</sup> et une température constante égale à 25°C.

La Figure III.20 représente les caractéristiques de la puissance de sortie en fonction de la tension pour une irradiation variable [1000 500 100] W/m<sup>2</sup> et une température constante égale à 25°C.

La tension et la puissance fournies par le générateur photoélectrique sont instables, il est donc nécessaire d'utiliser MPPT pour mesurer les valeurs maximales de puissance

#### b) Simulation avec hacheur :

En utilisant le modèle mathématique présenté dans le chapitre II, nous avons réalisé une modélisation du convertisseur DC-DC dans l'environnement Matlab/Simulink.

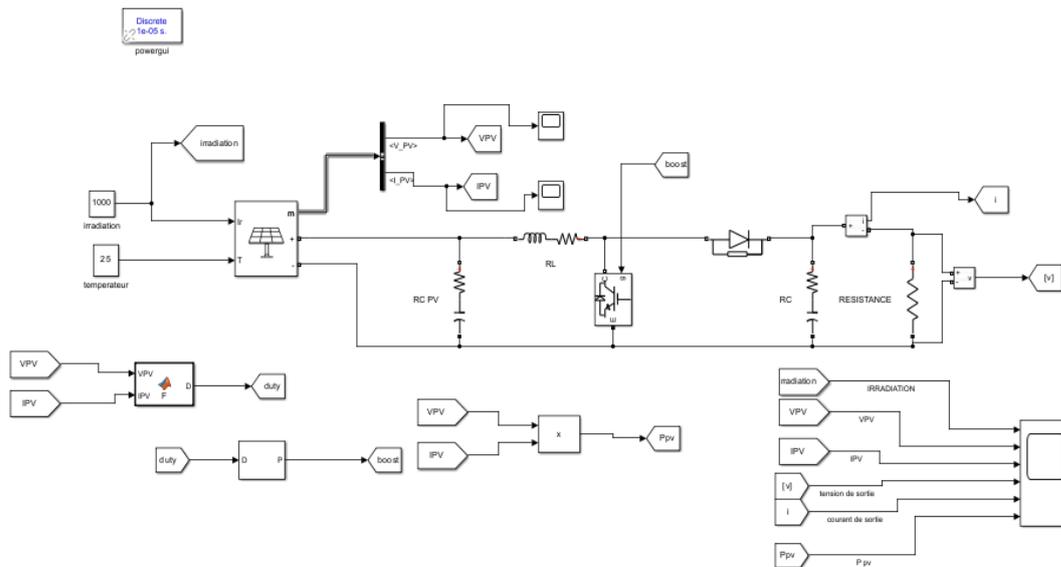


Fig. III.21 Schéma bloc sous Simulink du convertisseur Boost

Les résultats obtenus sont donnés par les figures, III.22, III.23, III.24 ou la tension en volt et le courant en A

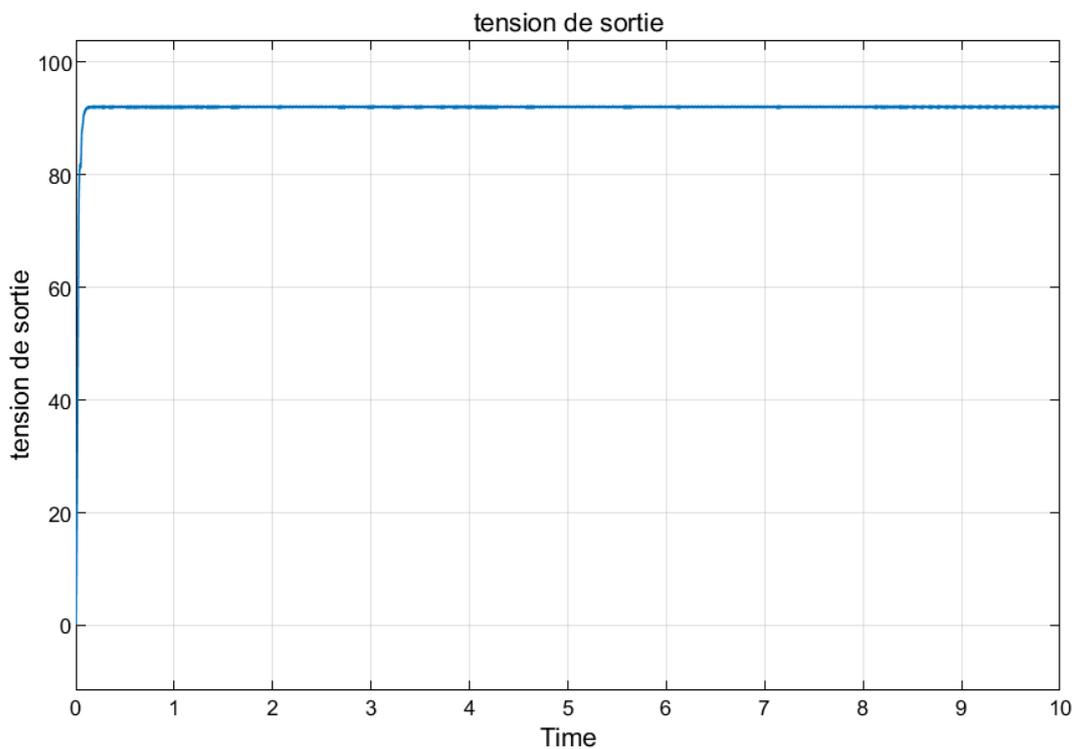
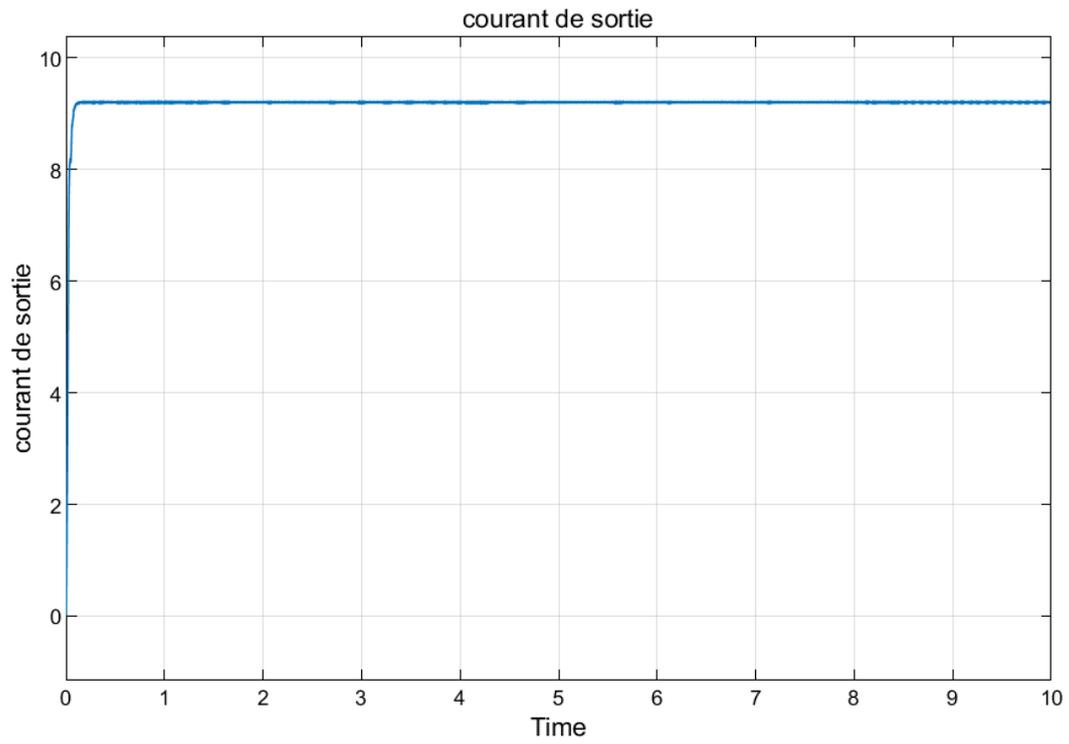
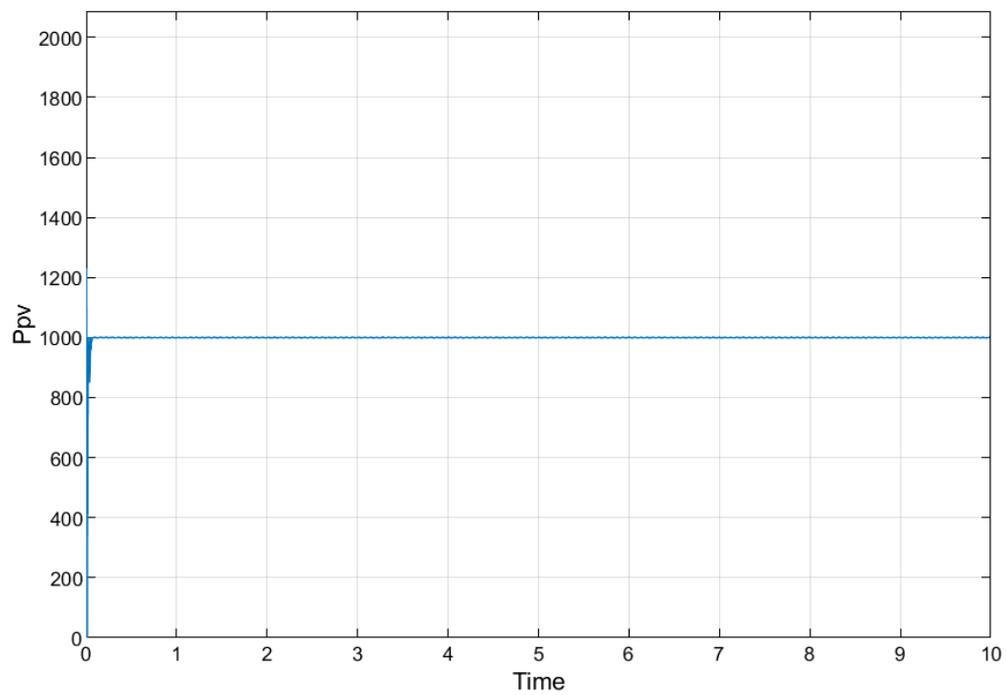


Fig.III.22 Caractéristique V(t) de GPV avec MPPT

Fig.III.23 Caractéristique  $I(t)$  de GPV MPPTFig.III.24 Caractéristique  $P(t)$  de GPV avec MPPT.

En utilisant le logiciel MATLAB Simulink, cette simulation a utilisé un modèle de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour un système photovoltaïque. Un bloc PV Array est inclus dans le modèle, représentant les caractéristiques électriques d'un panneau solaire classique.

Cette simulation avait pour but principal d'améliorer l'extraction de la puissance en temps réel en ajustant de manière dynamique la charge du système afin de maximiser la puissance extraite du panneau solaire photovoltaïque. Ainsi, une commande MPPT a été créée et mise en place dans le système.

Fig.III.24 : La puissance finale Selon les résultats, la commande MPPT a réussi à ajuster de manière efficace le point de fonctionnement du panneau afin d'obtenir la puissance maximale en fonction des conditions d'éclairage et de température.

Fig.III.23 : Le courant de sortie, a été tracé. Il montre une variation en fonction de l'algorithme MPPT, avec une stabilisation lorsque le point de puissance maximale est atteint.

Fig.III.22 : La tension de sortie, a également été suivie sur le Scope. Comme attendu, cette tension fluctue initialement, puis se stabilise à une valeur correspondant au point de puissance maximale.

L'efficacité de l'algorithme MPPT intégré est prouvée par ces résultats pour maximiser la production d'énergie solaire dans des conditions différentes. Le fait que la puissance, le courant et la tension se stabilisent rapidement témoigne de la conformité du système aux exigences d'un dispositif de suivi du point de puissance maximale dans un environnement en constante évolution.

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné comment les systèmes photovoltaïques peuvent servir de source d'alimentation pour les électrolyseurs, mettant en évidence leur capacité à fournir une énergie propre et durable. Les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, leur efficacité et les difficultés liées à leur intégration dans les réseaux électriques ont été étudiés, ce qui est essentiel pour garantir une alimentation stable des électrolyseurs. Une méthode cruciale pour optimiser cette intégration est le concept de suivi maximal du point de puissance (MPPT), qui permet de maximiser la production d'énergie solaire disponible. En conclusion, la

simulation du modèle MPPT a démontré son rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité des électrolyseurs, mettant en évidence la possibilité d'une synergie entre le photovoltaïque et la production d'hydrogène propre.

## Chapitre IV : Intégration PV-électrolyseur

## 1 Introduction :

À l'heure où la transition énergétique est devenue une priorité mondiale, l'hydrogène vert émerge comme une solution prometteuse pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et favoriser une économie durable. L'électrolyse de l'eau, alimentée par des énergies renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque (PV), est une méthode clé pour produire cet hydrogène vert.

Dans le chapitre précédent, nous avons mené une étude sur les systèmes photovoltaïques, nous avons opté pour un modèle simplifié de panneaux solaires, intégrant une diode et un algorithme de Point de Puissance Maximum (P&O) classique pour optimiser la conversion de l'énergie solaire en électricité. Ce chapitre se concentre sur l'intégration de ce modèle PV simplifié avec un électrolyseur et un réservoir d'hydrogène. L'objectif est d'examiner comment les fluctuations de l'irradiation solaire influencent le débit de production d'hydrogène.

## 2 Présentation du Système Global

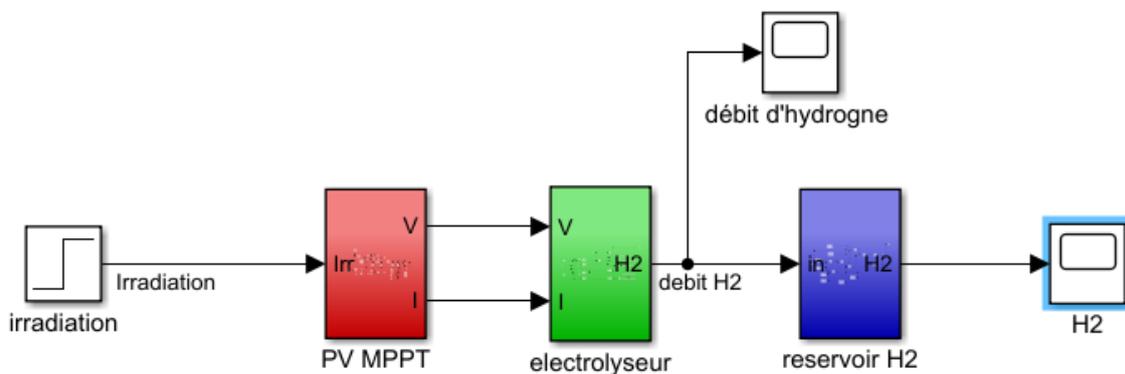


Fig.IV.1 Schéma global de l'intégration du système PV MPPT avec l'électrolyseur et le réservoir de stockage d'hydrogène

### 3 Dimensionnement du Système :

Il est important de prendre en compte les dimensions des éléments essentiels du système d'électrolyse et de stockage d'hydrogène afin de maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en hydrogène. Il convient de souligner que le calcul et l'amélioration du système PV MPPT, qui est chargé de convertir l'énergie solaire en électricité, ont déjà été approfondis dans le chapitre précédent.

#### 3.1 Electrolyseur

Plusieurs cellules d'électrolyseurs sont connectées en série et en parallèle dans l'électrolyseur de l'eau. L'électrolyseur en question repose sur les propriétés des cellules individuelles. Les valeurs correspondantes pour l'unité d'électrolyse ensemble sont calculées sur une base par cellule, tandis que le calcul de la tension de fonctionnement requise et des débits d'hydrogène et d'oxygène sont effectués sur une base par cellule.

Les principales entrées et sorties d'un électrolyseur sont illustrées ci-dessous :



Fig.IV.2 : Entrées et sorties principale d'un électrolyseur

Le circuit équivalent d'un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM) est créé dans MATLAB/Simulink pour exécuter la simulation. La Fig. 4 montre le circuit équivalent de l'électrolyseur PEM simple [8, 9]. Afin d'obtenir les caractéristiques I-V et de production d'hydrogène, certaines équations ont été développées pour les conditions de régime permanent et mises en œuvre dans MATLAB/Simulink. L'équation (3) modélise le processus d'électrolyse et est écrite comme suit : [41]

$$V = \frac{1}{3.064} * I + 1.476 = 0.326 * I + 1.476 = IR + V_{rev} \quad (\text{IV } 1)$$

### 3.1.1 Chute de tension d'activation :

Le transfert des protons et la vitesse des réactions chimiques entraînent une baisse de la tension d'activation, ce qui représente les comportements cinétiques électrochimiques. On peut réécrire la relation entre la chute de tension d'activation  $V_{act}$  et le courant  $I$  pour un électrolyseur en utilisant l'équation suivante [42]:

$$V_{act} = \left( \frac{RT}{\alpha n F} \right) \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{IV.2})$$

Où  $\alpha$ ,  $I_0$ , sont respectivement le coefficient de transfert et le courant d'échange.

### 3.1.2 Tension réversible :

La chute de tension, également connue sous le nom de tension ouverte, est due à une réaction chimique. Le potentiel de la cellule est représenté par elle lorsque le courant est nul ( $I=0$ ). On peut définir cette tension réversible  $V_{rev}$  en utilisant l'équation de Nernst de la manière suivante

$$V_{rev} = V_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{\alpha_{H_2O}} \right) \quad (\text{IV.3})$$

Tels que :  $R = 8,3144$  (J / mol K),  $F = 96\,487$  (C /mol),  $V_0 = 1,23$  (V),  $\alpha_{H_2O} = 1$  (pour l'eau liquide),  $P_{H_2}$  et  $P_{O_2}$  (atm) sont : la constante universelle des gaz, Faraday tension réversible constante et standard, activité de l'eau les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène respectivement.[42]

### 3.1.3 Potentiel idéal $V_i$ (électrochimique) :

Est défini comme le potentiel de l'électrode dans des conditions standard est calculé par l'équation

$$V_i = \frac{\Delta G}{2F} \quad (\text{IV.4})$$

### 3.1.4 Variation de l'énergie libre de Gibbs (J/mol) :

$\Delta G$  est la variation d'énergie libre de Gibbs (J/mol) de l'hydrogène gazeux et  $F$  est la constante de Faraday (96,487 C/mol). Si l'eau est en phase liquide, alors  $\Delta G$  pour une température  $T$  (°C) donnée peut être calculé par l'équation (IV.5) [42]:

$$\Delta G : 285840 - 163.2(273+T) \quad (\text{IV.5})$$

### 3.1.5 Débit d'hydrogène est donné en (ml/min) par :

Où  $V_m$  est le volume molaire

$$V_m = \frac{R(273+T)}{P} \quad (\text{IV.7})$$

Où  $R$  et  $P$  sont respectivement la constante des gaz parfaits (0,082 L atm K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>) et la pression.

### 3.1.6 Chute de tension de diffusion

Les valeurs de courant sont influencées par la concentration et la diffusion des fluides (gaz et eau) près des électrodes. Effectivement, le processus de diffusion entraîne des changements dans les pressions partielles et la vitesse des réactions chimiques. Ces modifications provoquent une diminution de la diffusion de tension  $V_{diff}$ . [42]

$$V_{diff} = \frac{RT}{\beta n F} \ln\left(1 + \frac{I}{I_{lim}}\right) \quad (\text{IV.8})$$

Où  $\beta$  et  $I_{lim}$  sont respectivement le coefficient et le courant limite de diffusion.

### 3.1.7 Puissance électrique :

La puissance électrique d'entrée P de la cellule d'électrolyse PEM, qui est la fonction du  $V_H$ , peut être déterminée par :

$$P = VI = I^2 R_I + I e_{rev} \quad (\text{IV.9})$$

$$= R_I \left( V_{H2} \frac{2F}{V_m 10^3 (60)} V_{H2} \right) V_{rev} + \left( V_m \frac{2F}{V_{H2} 10^3 (60)} V_{H2} \right) R_I^2 \quad (\text{IV.10})$$

### 3.2 Modélisation du réservoir d'hydrogène

Il est possible de conserver l'hydrogène gazeux comprimé ou l'hydrogène liquide dans des réservoirs en utilisant diverses méthodes telles que le stockage physique de l'hydrogène. Pour conserver l'hydrogène gazeux généré par l'électrolyseur, on développe un module dynamique pour le réservoir dans MATLAB/Simulink, qui peut être représenté de la manière suivante :

$$P_b - P_{pi} = Z \frac{N_{H2} R T_b}{M_{H2} V_b} \quad (\text{IV.11})$$

Dans l'équation III.37,  $P_b$  représente la pression du réservoir mesurée en (Pascal),  $P_{pi}$  représente la pression initiale du réservoir de stockage en (Pascal),  $R$  représente la constante universelle des gaz ( $J/kmol \cdot K$ ),  $T_b$  représente la température de fonctionnement (K),  $V_b$  représente le volume du réservoir ( $m^3$ ), et  $Z$  représente le facteur de compressibilité en fonction de la pression.

$$Z = \frac{P V_m}{R T} \quad (\text{IV.12})$$

Où,  $P$  et  $V_m$  sont la pression et le volume molaire, respectivement [42]

## 4 Résultats de simulation :

### Simulation 1 : Impact d'une Irradiation Fixe de 800 W/m<sup>2</sup>

Dans cette simulation, nous avons établi une valeur constante de 800 W/m<sup>2</sup> pour l'irradiation solaire, une valeur classique pour des conditions d'ensoleillement idéales. En outre, la température a été conservée à 25°C, ce qui correspond à une température ambiante normale. Grâce à ces conditions, il est possible d'évaluer de manière stable les performances du système de production d'hydrogène, sans être affecté par les variations climatiques. La simulation vise à observer et à étudier le débit d'hydrogène produit par l'électrolyseur dans des conditions d'irradiation et de température constantes, dans le but de mieux appréhender les capacités maximales du système dans un environnement contrôlé.

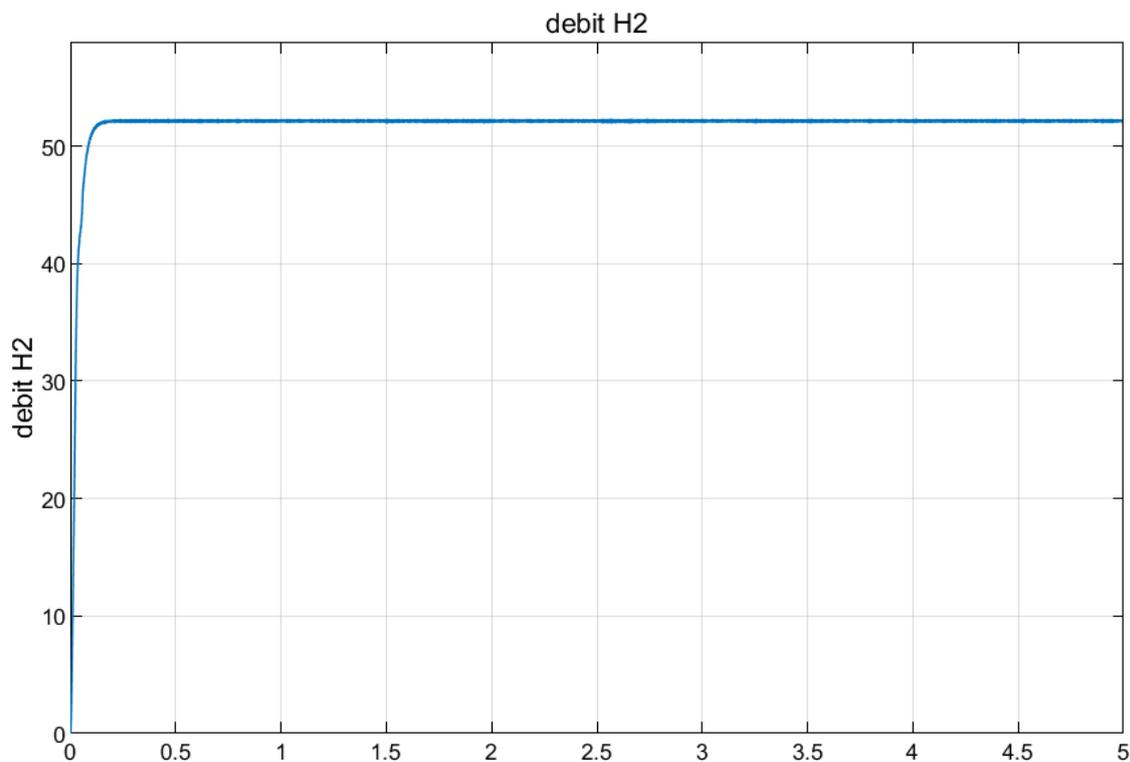


Fig.IV.3 Débit d'Hydrogène Produit sous des Conditions d'Irradiation fixe en ml/min

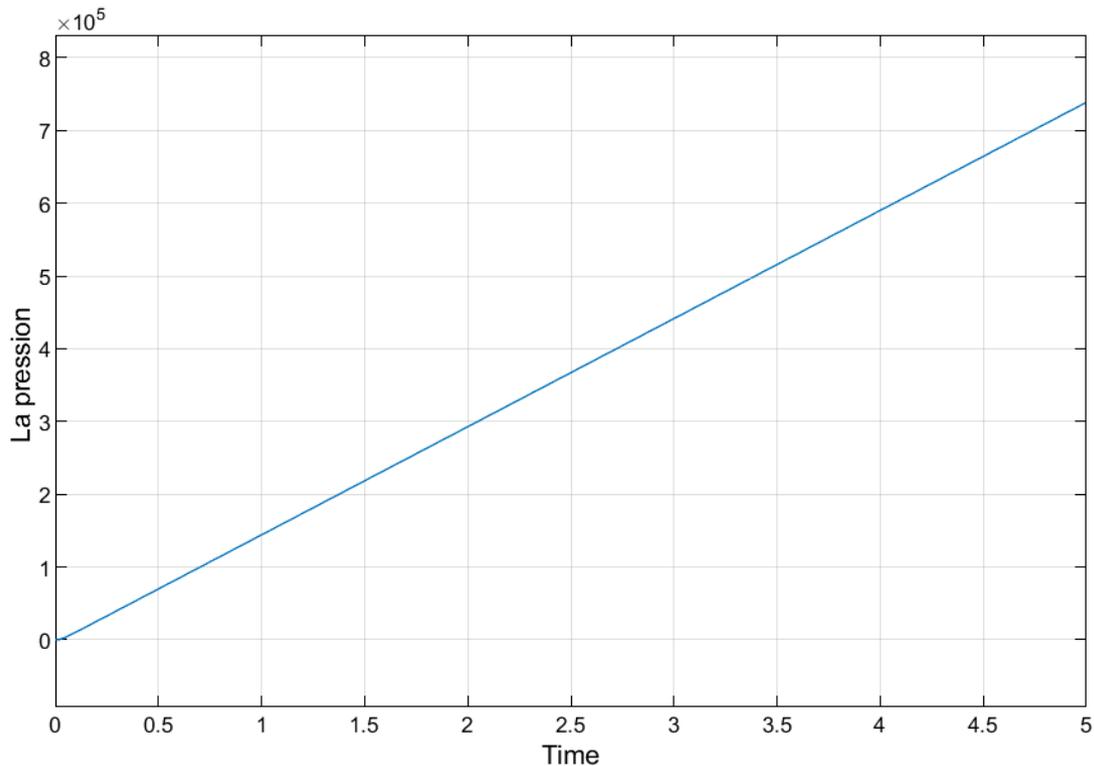


Fig.IV.4 La pression à l'intérieur du réservoir modèle d'hydrogène en pascalle

Le débit d'hydrogène généré par un système d'électrolyse a été étudié dans la première simulation en fonction du temps, avec une irradiation solaire constante de 800 W/m<sup>2</sup>. Le débit d'hydrogène est relativement constant avec de légères variations. Dès que l'irradiation est appliquée, indique que le système d'électrolyse commence à générer de l'hydrogène à un taux élevé. La stabilité de ce débit au fil du temps démontre que l'électrolyseur fonctionne de manière efficace sous cette irradiation, transformant de manière constante l'énergie solaire en hydrogène.

Dans le deuxième graphique, nous observons l'évolution de la pression à l'intérieur du réservoir d'hydrogène au fil du temps, en fonction du débit d'hydrogène injecté. La pression à l'intérieur du réservoir augmente progressivement à mesure que l'hydrogène est injecté à un débit constant d'environ 53-55 ml/min, ce qui suggère que le réservoir se remplit de manière régulière. La corrélation directe entre le débit et la pression démontre une accumulation continue du volume de gaz dans le réservoir, ce qui correspond à la production continue d'hydrogène. La gestion de cette pression est essentielle afin d'éviter d'atteindre des niveaux dangereux, ce qui pourrait entraîner l'emploi de dispositifs de sécurité comme des soupapes de décharge.

### Simulation 2 : Impact d'une Irradiation variable :

Nous avons examiné dans cette simulation l'effet des fluctuations de l'irradiation solaire sur le taux de production d'hydrogène. D'abord, nous avons mis en place une irradiation solaire de 400 W/m<sup>2</sup>, puis nous l'avons augmentée à 900 W/m<sup>2</sup> et enfin nous l'avons réduite à 300 W/m<sup>2</sup>. En même temps, la température a été maintenue à 25°C, ce qui correspond à des conditions de température ambiante habituelles. Grâce à cette méthode, il est possible d'évaluer l'impact des variations de l'irradiation solaire sur les performances du système de production d'hydrogène tout en maintenant une température constante.

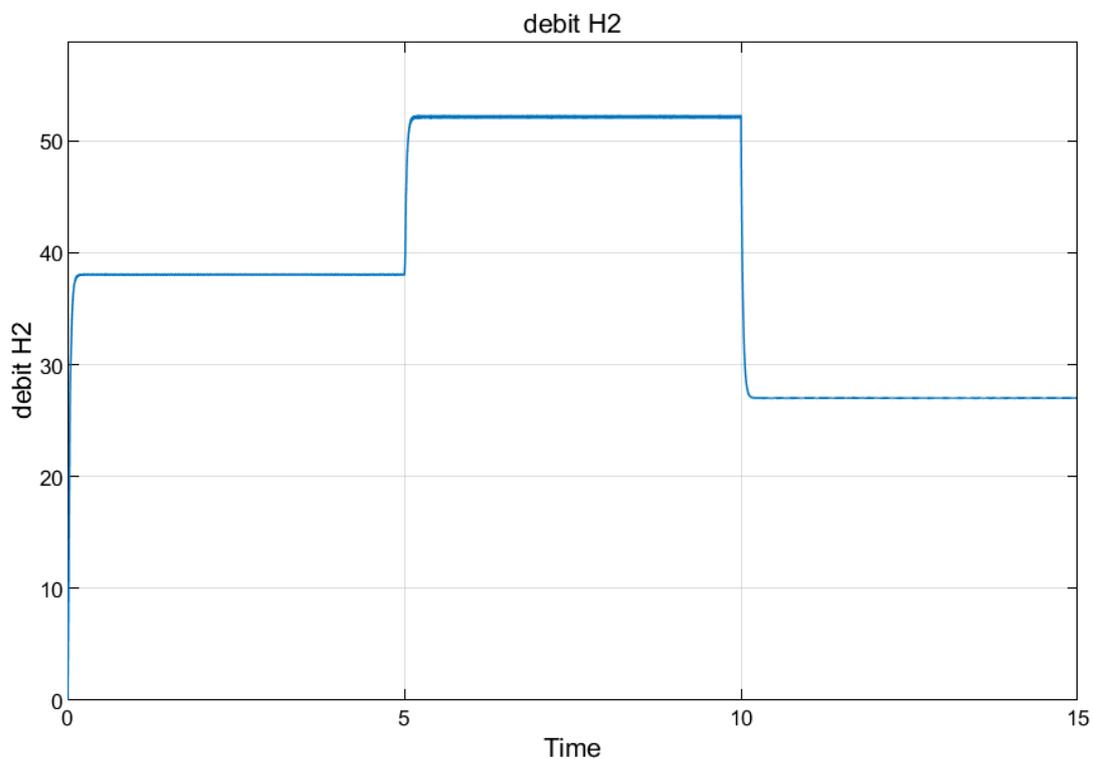


Fig.IV.5 Débit d'Hydrogène en Fonction de l'Irradiation Solaire (400 à 900 à 300 W/m<sup>2</sup>)

En utilisant des niveaux d'irradiation de 400, 900 et 300 W/m<sup>2</sup>, cette simulation examine l'impact des variations d'irradiation solaire sur le débit de production d'hydrogène, tout en maintenant une température constante de 25°C. Le débit de production augmente considérablement lorsque l'intensité solaire passe de 400 à 900 W/m<sup>2</sup>, mettant en évidence l'importance de l'intensité solaire pour améliorer la production d'hydrogène. D'un autre côté, une réduction de l'irradiation à 300 W/m<sup>2</sup> entraîne une diminution significative du débit, ce qui

confirme que des niveaux d'irradiation plus faibles restreignent l'efficacité du procédé. Selon cette variation, il est évident que le système de production d'hydrogène est sensible aux variations d'irradiation solaire, ce qui souligne l'importance d'une source d'énergie solaire stable pour optimiser la production.

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude détaillée des performances d'un système de production d'hydrogène a été exposée en fonction de différentes conditions d'irradiation solaire, tout en maintenant une température constante de 25°C. Les résultats indiquent que la production d'hydrogène est fortement influencée par l'irradiation solaire : un débit nettement plus élevé a été constaté avec une augmentation de 400 à 900 W/m<sup>2</sup>, tandis qu'une diminution à 300 W/m<sup>2</sup> a entraîné une diminution significative du débit. L'importance d'une source d'irradiation solaire stable est confirmée par ces observations afin de maximiser la production d'hydrogène.

De plus, l'analyse de la pression dans le réservoir a révélé une corrélation directe entre le débit d'hydrogène injecté et l'augmentation de la pression, mettant en évidence l'importance de gérer la pression afin d'assurer la sécurité et l'efficacité du système.

On s'est également penché sur la dimension des électrolyseurs et des réservoirs, afin d'assurer une optimisation du système pour gérer les fluctuations de débit et de pression tout en assurant une production d'hydrogène stable et continue. L'utilisation de cette simulation présente des opportunités cruciales pour l'évolution et l'amélioration des systèmes de production d'hydrogène, en soulignant l'importance de conditions d'irradiation appropriées et de dispositifs de stockage adaptés afin d'améliorer les performances globales.

## Conclusion générale

Par le passé, l'hydrogène a été largement négligé dans le domaine industriel en raison de limitations technologiques. Cependant, aujourd'hui, il suscite un intérêt considérable de la part des constructeurs automobiles, des centrales thermiques, du secteur aéronautique, ainsi que des gouvernements. Ces derniers, confrontés à des enjeux environnementaux urgents dus à l'exploitation prolongée des ressources fossiles et nucléaires, cherchent des solutions alternatives pour atténuer les impacts écologiques. L'hydrogène, combiné avec l'énergie solaire, émerge comme une solution particulièrement prometteuse. En effet, cette association est considérée comme un pilier essentiel pour réussir la transition énergétique et respecter les objectifs de développement durable. La production d'hydrogène à partir de l'eau ne génère aucun gaz à effet de serre, et son utilisation dans les piles à hydrogène ne produit que de l'eau. C'est pourquoi l'hydrogène vert est vu comme un carburant d'avenir, capable de répondre aux défis environnementaux contemporains.

À travers ce mémoire, nous avons approfondi l'exploration et l'optimisation de la production d'hydrogène vert en combinant l'énergie solaire photovoltaïque avec les électrolyseurs. Notre étude a révélé que l'hydrogène, en tant que vecteur énergétique, offre des avantages considérables pour divers besoins énergétiques, notamment dans les secteurs des transports, des applications stationnaires et portables. Sa capacité à fournir une énergie propre et respectueuse de l'environnement, surtout lorsqu'il est produit à partir de sources d'énergie renouvelables comme le solaire, en fait une solution prometteuse face aux défis environnementaux actuels.

Le premier chapitre a mis en lumière les diverses applications et avantages de l'hydrogène, tout en discutant des différentes technologies disponibles pour sa production et les défis qui freinent son adoption à grande échelle. Le deuxième chapitre s'est concentré sur les électrolyseurs, en particulier les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM), en analysant leur fonctionnement, leurs performances et leur rôle crucial dans la production d'hydrogène propre. La simulation réalisée a fourni des données essentielles pour optimiser l'efficacité des électrolyseurs PEM et leur intégration dans des systèmes énergétiques futurs.

Le troisième chapitre a examiné les systèmes photovoltaïques comme source d'alimentation pour les électrolyseurs, en soulignant leur capacité à fournir une énergie propre et durable. L'importance du suivi maximal du point de puissance (MPPT) a été mise en évidence pour maximiser l'efficacité des panneaux solaires et, par conséquent, la production d'hydrogène. Enfin, le quatrième chapitre a présenté une simulation détaillée du couplage entre les systèmes photovoltaïques et les électrolyseurs, en analysant comment les variations d'irradiation solaire affectent la production d'hydrogène. Les résultats ont confirmé que l'irradiation solaire stable est cruciale pour une production optimale et que la gestion de la pression et des dimensions des équipements est essentielle pour maintenir une production stable et continue.

En conclusion, ce mémoire a démontré que l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque avec des électrolyseurs est une approche efficace pour produire de l'hydrogène vert, offrant une solution durable et propre face aux défis énergétiques et environnementaux. L'analyse approfondie des performances sous différentes conditions d'irradiation et la simulation des systèmes intégrés soulignent l'importance d'optimiser ces technologies pour maximiser leur rendement et leur durabilité, ouvrant la voie à une transition énergétique plus verte et plus efficace.

## Bibliographie

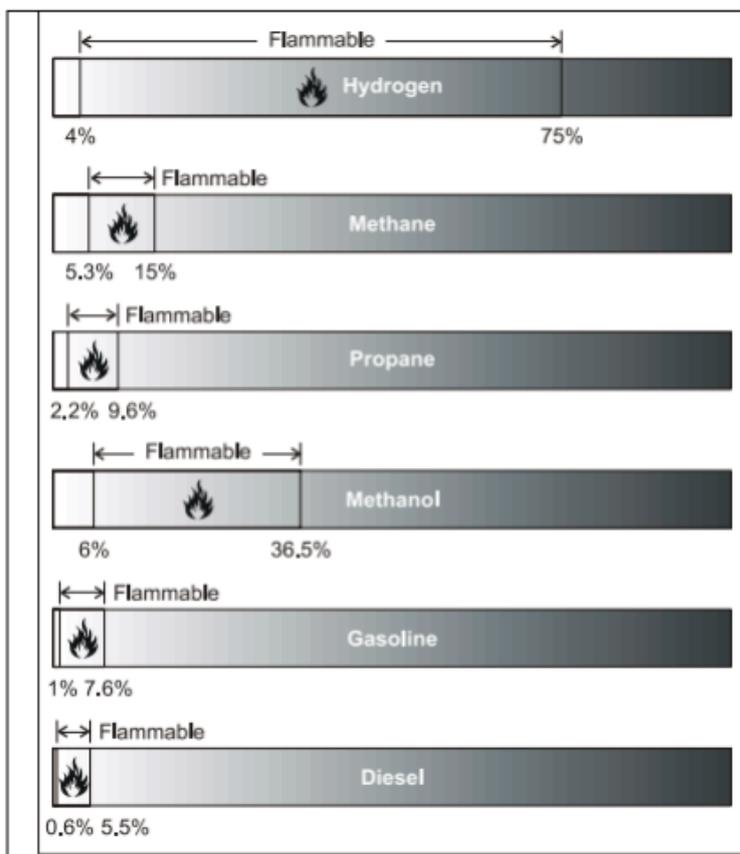
- [1] 2021 International Monetary Fund.
- [2] Greenly earth-8/1/2021, "Quel est l'impact écologique d'une batterie ?".
- [3] R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.
- [4] Bouziane, K. (2011). Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par Electrolyse de l'eau. Mémoire de Magister en Génie des procédés. Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [5] : Sabrina MILOUDI. Etude d'un système photovoltaïque autonome à base d'hydrogène vert. Thèse de master académique, UKMO, 2016.
- [6] EG&G Technical Services, Inc, "Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)", U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, Morgantown, West Virginia.
- [7] Report prepared by the IEA for the G20,Japan,"the future of hydrogen: seizing today's opportunities", 2019.
- [8] <https://www.cummins.com/news/2022/04/28/cummins-fuel-cells-powerscanias-fuel-cell-electric-trucks>
- [9] "hydrogen use in internal combustion engines", college of the Desert, Decembre 2001.
- [10] Carbon and hydrogen isotopic compositions of stratospheric methane: 1. High-precision observations from the NASA ER-2 aircraft
- [11] <https://learnandconnect.pollutec.com/guide-hydrogene-vert/hydrogene-vert-secteur-energie-utilisation>
- [12] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>
- [13] Moumén, B. Mouhamed, L., Doudi,T..(2018) Etude de la Nature d'Eau d'El Oued sur l'Electrolyse. (Mémoire master, université de l'oued)

- [14] Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and sustainable energy reviews*, 67, 597-611.
- [15] Abad, A. V., & Dodds, P. E. (2020). Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, 138, 111300.
- [13] Martinez-Burgos, W. J., de Souza Candeo, E., Medeiros, A. B. P., de Carvalho, J. C., de Andrade Tanobe, V. O., Soccol, C. R., & Sydney, E. B. (2021). Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124970.
- [14] Zhang, B., Zhang, S. X., Yao, R., Wu, Y. H., & Qiu, J. S. (2021). Progress and prospects of hydrogen production: Opportunities and challenges. *Journal of Electronic Science and Technology*, 19(2), 100080.
- [15] Labbé, J. (2006). L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris)
- [16] Xu, X., & Bi, L. (2020). Proton-conducting electrolyte materials. In *Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells* (pp. 81-111). Elsevier.
- [17] Rallières, O. (2011). Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de ToulouseINPT).
- [18] Caroline Rozain (2013). Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Thèse. Université Paris Sud – Paris XI, 2013.
- [19] Carmo et al. (2013) A comprehensive review on PEM water electrolysis, Volume 38, Issue 12, 22 April 2013, Pages 4901-4934
- [20] HYDROGEN PRODUCTION BY ALKALINE WATER ELECTROLYSIS Diogo M. F. Santos\* and César A. C. Sequeira.
- [21] Ould Mohmed Yahya, A. Ould Mohamed, A et Youm, I. (2008). Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. *Des Energies Renouvelables*, 3, 473-483.

- [22] 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.
- [23] 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
- [24] : Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric shiller, Bocar sada « le pompage photovoltaïque ». Manuel de cours, université d'Ottawa ; 1998
- [25] : belabed rafik « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque » un extrait d'un ouvrage 2017.
- [26] : Sunedison. L'effet photovoltaïque. Manuel de formation pour l'installation et la maintenance des petits systèmes photovoltaïques.2019.
- [27] : Ressources pour les STIED, Septembre- Octobre 2011
- [28] : M. Kenane, S. Sadoudi « Modélisation de modules photovoltaïques en milieu réel D'implantation », Mémoire de Master II, département de génie mécanique, faculté du génie De la construction, UMMTO 2013.
- [29] : M.L. LOUAZENE, D. KORICHI et B. AZOUI : Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque application sur le site de ouargla.
- [30] : <https://phys.org/news/2006-03-probing-earth-core.html>
- [31] SAYAH, Ikram. "Etude d'une installation de pompage solaire photovoltaïque destinée à l'irrigation."
- [32] A. MOHAMMEDI., « Etude d'un système de pompage photovoltaïque » Master en électrotechnique option : Electromécanique. Université de Bejaia, année 2010.
- [33] : Othmane Benseddik, Fathi Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », mémoire de master, université KasdiMarbah- Ouargala, 2012
- [34] : Sylvain et Brigand, « Installation solaire photovoltaïque », Février2011
- [35] Cours sonelgaz« l'énergie solaire photovoltaïque », documentation SKTM, Ghardaïa

- [36] [https://www.researchgate.net/figure/Caracteristique-resultante-dun-groupement-de-n-p-cellules-en-parallele\\_fig8\\_327839184](https://www.researchgate.net/figure/Caracteristique-resultante-dun-groupement-de-n-p-cellules-en-parallele_fig8_327839184)
- [37] F. Hananou et A. Rouabah, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2
- [38] M. Frederick design and implementation of a digitally controlled stand-alone photovoltaic power supply”, Department of electrical. Power engineering, Norwegian university of science and technology o.s bragstads plass 2e, 7491 Trondheim, Norway
- [39] A. Tchapo singo “système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.
- [40] Wang, C. 2006. “Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems.” Ph.D. thesis, the Montana State University
- [41] Atlamand, O., and Kolhe, M. 2011. “Equivalent Electrical Model for a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyser.” *Energy Conversion and Management* 52 (8): 2952-7
- [42] Beainy, A., Karami, N., and Moubayed, N. 2014. “Simulink Model for a PEM Electrolyzer Based on an Equivalent Electrical Circuit.” *Renewable Energy* 978: 145-9.

## Annexes :



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

Paramètre	Valeur
Nom du module	Kyocera Solar KD200GX-LPU
Puissance maximale (W)	200.032 W
Nombre de cellules par module (Ncell)	54
Tension en circuit ouvert Voc (V)	33.2 V
Courant de court-circuit Isc (A)	8.16 A
Tension au point de puissance max Vmp (V)	26.6 V
Courant au point de puissance max Imp (A)	7.52 A
Coefficient de température de Voc (%/°C)	-0.33
Coefficient de température de Isc (%/°C)	0.02

Annexe 2 : Paramètres du panneau photovoltaïque Kyocera Solar KD200GX-LPU

## **NOMENCLATURE**

Zr: zirconium

H: Hydrogène

H<sub>2</sub>: Dihydrogène

CO: Monoxyde de carbone

CO<sub>2</sub>: dioxyde de carbone

NO<sub>x</sub> : Oxyde d'azote

O<sub>2</sub>: Dioxygène

CH<sub>4</sub>: Méthane

C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>: propane

C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>: Heptane

PAC: Pile a combustible

FC: Fuel Cell

PB-a: Batterie acide-plomb

NiMH: Batterie Nickel-metal hybride

Li-ion: Batterie lithium-ion

USABC: Consortium des batteries avancées des États-Unis

LLC SOEC: Solid Oxyde Electrolyse Cell

AFC: Alkaline Fuel Cell

MCFC: Motlen Carbonate Fuel Cell

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell

EHT: Electrolyse Haute Temperature

SOFC: Solid Oxyde Fuel Cell

PEM: Proton Exchange Membrane

PEMFC: polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

AEM: Anion Exchange Membrane

CFE: Capillary Fed Electrolysis 104

HTC: High Temperature Cell

SOEC: Solid Oxide Electrolyse Membrane PFSA: Perfluoro-Sulfonées acides

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

GPV: Groupe de panneaux photovoltaïques

MPPT: Maximum Power Point Trackin

$\eta_f$  Rendement faradique, %

F : Constante de Faraday (96 487 C/mol)

$V_0$  : Tension réversible standard (1,23 V)

$V_iV$  : Potentiel idéal (V)

$\Delta G$  \Delta G : Variation d'énergie libre de Gibbs (J/mol)

$\beta$  : Coefficient de diffusion (sans dimension)

P : Pression (atm)

T : Température (K)

$P_b$  : Pression du réservoir (Pa)

$P_{bi}$ : Pression initiale du réservoir (Pa)

$T_bT$  : Température de fonctionnement du réservoir (K)

$V_bV$  : Volume du réservoir (m<sup>3</sup>)

$\alpha$  : Coefficient de transfert (sans dimension)

## Résumé :

Ce mémoire explore l'intégration de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène vert. Il examine la combinaison de l'électrolyse de l'eau et des systèmes photovoltaïques pour optimiser la production d'hydrogène. L'étude inclut une analyse approfondie des technologies d'électrolyse et de photovoltaïque, ainsi qu'une simulation du couplage entre ces systèmes. Les résultats démontrent comment cette approche combinée peut offrir une solution durable et efficace pour produire de l'hydrogène vert, contribuant ainsi à une transition énergétique plus respectueuse de l'environnement.

## Abstract

This thesis explores the integration of solar energy for green hydrogen production. It examines the combination of water electrolysis and photovoltaic systems to optimize hydrogen production. The study includes a detailed analysis of electrolysis and photovoltaic technologies, as well as a simulation of the coupling between these systems. The results demonstrate how this combined approach can offer a sustainable and efficient solution for producing green hydrogen, contributing to a more environmentally friendly energy transition.

## المخلص

يستعرض هذا البحث دمج الطاقة الشمسية لإنتاج الهيدروجين الأخضر. يتناول دمج التحليل الكهربائي للماء وأنظمة الطاقة الشمسية لتطوير إنتاج الهيدروجين. تشمل الدراسة تحليلاً مفصلاً لتقنيات التحليل الكهربائي والطاقة الشمسية، بالإضافة إلى محاكاة لدمج هذه الأنظمة. تظهر النتائج كيف يمكن أن توفر هذه المقاربة المدمجة حلاً مستداماً وفعالاً لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مما يساهم في انتقال الطاقة بطريقة أكثر احتراماً للبيئة.