

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département Génie Mécanique



Projet De Fin D'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Présenté Par :

BOUKHATEM Abderrezzaq

Thème :

Etude et analyse des différentes configurations des modules photovoltaïques pour la réduction de perte de puissance dans diverses conditions de l'ombrage partiel

Soutanes le 26/ 06 /2024,devant le jury composé de:

ZERGLAINE Abdelaziz	MCB	Encadreur
FEKAOUINI Mohammed Faouzi	MCA	Co-Encadreur
KHATI Azzedine	MCA	Président
KAMLA Youcef	MCA	Examineur
BELKACEM Nafissa	MCA	Examineur

Année d' universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je remercie premièrement Allah, le Tout-Puissant, pour la volonté, la santé et la patience durant toutes ces années, pour accomplir ce travail que nous venons aujourd'hui présenter.

Je tenais à exprimer ma gratitude à ce directeur de thèse, le Dr ZERGLAINE Abdelaziz et le Dr FEKAOUNI Mohammed Faouzi pour leurs aides précieuses, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie également tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mon Père , en signe d'amour, de reconnaissance et de gratitude pour tous les soutiens et les sacrifices dont il a fait preuve à mon égard.

À ma Mère , ma raison d'être, ma raison de vivre, la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de douceur et d'amour.

À Mes frères qui m'ont beaucoup soutenu durant toutes mes études, aucun mot ne pourra décrire vos dévouements et vos sacrifices.

À tous mes amis qui nous ont fait partager les bons moments que nous avons passés ensemble. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses.

À tous les gens qui ont cru en moi et qui me donnent l'envie d'aller en avant, je vous remercie tous, votre soutien et vos encouragements me donnent la force de continuer.

Résumé

Les transports ont une importance considérable dans l'économie, mais il est essentiel de réduire leur impact négatif sur l'environnement. Les moyens de transport équipés de piles à combustible, d'électrolyseurs et de panneaux solaires sont parmi les solutions émergentes. Leur adoption croissante permet d'améliorer les performances et de remplacer les véhicules. Ces transports ne rejettent que de la vapeur d'eau et de la chaleur, sans émettre de CO₂, ce qui constitue une avancée significative pour notre planète.

L'objectif de ce travail est de simuler un électrolyseur fonctionnant avec de l'énergie électrique générée par l'énergie solaire, même dans des conditions d'ombrage partiel, et de simuler pile à combustible pour la production d'électricité.

Mots de clés : Energie, Pile à combustible, Hydrogène, Electrolyseur, Panneaux photovoltaïques , Ombrage partiel , Environnement, MATLAB, Simulation .

Abstract

Transport plays a significant role in the economy, but it is essential to reduce its negative impact on the environment. Transport means equipped with fuel cells, electrolyzers, and solar panels are among the emerging solutions. Their growing adoption allows for improved performance and the replacement of diesel vehicles. These transports emit only water vapor and heat, without releasing CO₂, which is a significant advancement for our planet.

The objective of this work is to simulate an electrolyzer operating with electrical energy generated by solar power, even under partial shading conditions, and to simulate a fuel cell for electricity production.

Keywords: Energy, Fuel cell, Hydrogen, Electrolyzer, Photovoltaic panels, Partial shading, Environment. MATLAB, Simulation.

ملخص

تعتبر وسائل النقل ذات أهمية كبيرة في الاقتصاد، لكن من الضروري تقليل تأثيرها السلبي على البيئة. إن وسائل النقل المجهزة بخلايا الوقود، والمحلات الكهربائية، والألواح الشمسية هي من بين الحلول الناشئة. إن الاعتماد المتزايد عليها يتيح تحسين الأداء واستبدال المركبات التي تعمل بالديزل. هذه الوسائل لا تطلق سوى بخار الماء والحرارة، دون انبعاث ثاني أكسيد الكربون، مما يشكل تقدمًا كبيرًا لكوننا.

هدف هذا العمل هو محاكاة محلل كهربائي يعمل بالطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة الشمسية، حتى في ظروف الظل الجزئي، ومحاكاة خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء.

الكلمات المفتاحية: طاقة، خلايا الوقود، هيدروجين، محلل كهربائي، ألواح ضوئية، ظل جزئي، بيئة، مطالب، محاكاة.

Table des matières

Remerciements	1
Dédicaces	2
Abstract / Résumé / ملخص	3
Table des matières	4
Nomenclatures.....	9
Liste des figures	12
Liste des tableaux	14
Introduction générale.....	17
1. Production d'énergie	
1.1 Introduction	19
1.2 Energie fossile	19
1.2.1 Pétrole.....	19
1.2.2 Charbon	19
1.2.3 Gaz naturel.....	20
1.3 Energie nucléaire.....	21
1.4 Energie renouvelable.....	21
1.4.1 Energie solaire	22
1.4.1.1 Solaire thermique	22
1.4.1.2 Solaire thermodynamique	22
1.4.1.3 Solaire photovoltaïque	23
1.4.2 Energie éolienne	23
1.4.3 Energie hydraulique.....	24
1.4.4 Energie biomasse	25
1.4.5 Energie géothermie.....	25
1.5 Hydrogène	26
2. Hydrogène	
2.1 Introduction	27
2.2 Historique	27
2.3 Production d'hydrogène	28

2.3.1 Hydrogène gris	29
2.3.2 Hydrogène bleu	30
2.3.3 Hydrogène blanc	30
2.3.4 Hydrogène vert	30
2.4 Stockage de l'hydrogène	31
2.4.1 Stockage sous forme liquide	32
2.4.2 Stockage sous forme solide	32
2.4.3 Stockage sous forme gazeux.....	32
2.5 Utilisation de réservoir	32
2.6 Bouteille de stockage d'hydrogène	33
2.7 Transport de l'hydrogène	33
2.8 Utilisation de l'hydrogène	34
3. Pile à combustible (PAC)	
3.1 Introduction	36
3.2 Historique	36
3.3 Types de la PAC	37
3.4 Pile à combustible PEMFC	38
3.4.1 Principe de fonctionnent	38
3.4.2 Composants de la pile à combustible	39
3.4.2.1 Electrolyte (Membrane)	39
3.4.2.2 Électrodes	39
3.4.2.3 Couche active (Catalyseur)	39
3.4.2.4 Couche de diffusion	40
3.4.2.5 Plaques bipolaires	40
3.5 Applications de la pile à combustible au transport.....	42
3.6 Avantages et inconvénients de la pile à combustible	42
3.6.1 Avantages.....	42
3.6.2 Inconvénients	43
3.7 Modélisation d'une pile PEM	43

3.8 Modèle dynamique de la pile à combustible PEM	46
3.8.1 Introduction de modèle	46
3.8.2 Caractéristiques d'une pile à combustible	47
3.9 Résultats obtenus et discussions	47
3.10 Conclusion.....	49

4. Électrolyseurs

4.1 Introduction	50
4.2 Principe d'électrolyse de l'eau pour production d'hydrogène	50
4.3. Types électrolyseurs	50
4.3.1 Électrolyseurs Alcalins	50
4.3.2 Électrolyseurs de l'eau à haute température (HTE).....	51
4.3.3 Électrolyseurs PEM	52
4.4 Comparaison entre électrolyseurs Alcalins, PEM et HTE	53
4.5. Modèles utilisant l'électrolyseurs PEM.....	54
4.5.1 Modèle thermique	54
4.5.2 Modèle thermodynamique	55
4.5.3 Modèle électrochimique	55
4.6 Modélisation d'électrolyseur.....	56
4.7 Données pour une journée typique	57
4.8 Modèle d'électrolyseurs PEM	58
4.9 Modèle de système de couplage GPV et électrolyseur.....	62
4.10 Résultats et analyse de simulation	64
4.11 Conclusion.....	64

5. Panneau photovoltaïque

5.1 Introduction	65
5.2 Energie solaire	65
5.2.1 Soleil	65
5.2.2 Rayonnement solaire	65
5.3 Gisement solaire	66
5.3.1 Irradiation solaire Mondiale	66

5.3.2 Irradiation solaire en Algérie	67
5.3.3 Irradiation solaire à Chlef	68
5.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	68
5.5 Types des cellules photovoltaïques	69
5.5.1 Cellule en silicium monocristallin	69
5.5.2 Cellule en silicium polycristallin	69
5.5.3 Cellule en silicium amorph	70
5.6 Association des modules photovoltaïque	70
5.6.1 Association en série	70
5.6.2 Association en parallèle	71
5.6.3 Association mixte (série/parallèle)	71
5.7 Compositions d'un panneau photovoltaïque	72
5.8 Système photovoltaïque.....	73
5.9 Ombrage partiel	73
5.10 Effet de l'ombrage	73
5.11 Système de protection.....	74
5.11.1 Diode By-pass.....	74
5.11.2 Diode anti-retour.....	75
5.12 Différents types de configurations des panneaux photovoltaïques	75
5.13 Générateur photovoltaïque	76
5.14 Influence de l'éclairement	77
5.15 Simulation du modèle proposé	78
5.15.1 Configuration Série (S).....	78
5.15.2 Configuration Parallèle (P)	79
5.15.3 Configuration Série Parallèle (SP).....	80
5.15.4 Configuration Bridge Linked (BL)	81
5.15.5 Configuration Honey Comb (HC)	82
5.15.6 Configuration Total-Cross-Tied (TCT)	83
5.16 Conclusion	87
Conclusion générale	88
Références Bibliographiques	90

Nomenclatures

Modélisation de pile à combustible :

a: nombre de cellules de la pile à combustible	[-]
B : constante d'Activation de tension	[A ⁻¹]
C : constante d'Activation de tension	[V]
E : potentiel thermodynamique	[V]
E ₀ : Tension à vide	[Volt]
F : constante de Faraday	[C/kmol]
j: Représente l'élément (H ₂ O, H ₂ , O ₂)	[-]
H : hauteur du mat	[M]
I : courant électrique	[A]
K : facteur de forme	[-]
K _{H₂} : constante de valve d'hydrogène	[Kmol/s.atm]
K _{H₂O} : constante de valve d'eau	[Kmol/s.atm]
K _{O₂} : constante de valve d'oxygène	[Kmol/s.atm]
K _r : constante de modélisation	[Kmol/s .A]
\dot{m}_{H_2} : Débit de l'hydrogène	[Kmol/s]
\dot{m}_{H_2O} : Débit de l'eau	[kmol/s]
M _i : Masse atomique de l'élément i	[gr/mol]
\dot{m}_{O_2} : Débit de l'oxygène	[kmol/s]
N ₀ : nombre de cellules en série	[-]
P : pression	[Atm]
P _{H₂} : Pression de l'hydrogène	[atm]
P _{H₂O} : Pression de l'eau	[atm]
P _{O₂} : Pression de l'oxygène	[atm]
R : constante des gaz parfaits	[Kmol/k]
R _a : Résistance d'activation	[V/A]
R _{int} : Résistance interne	[Ω]
T : température	[K]
U : taux d'utilisation	[-]

Nomenclatures

U: tension d'une cellule de l'électrolyseur	[V]
V_a : Volume de l'anode	[m ³]
V_c : volume de la cathode	[m ³]
V_{cell} : Tension d'une cellule de pile à combustible	[V]
η_{act} : Rendement d'activation de la pile à combustible	[-]
η_{ohmic} : Les pertes ohmiques de la pile a combustble	[-]
τ_{H_2} : constante de temps pour l'hydrogène	[s]
τ_{H_2O} : constante de temps pour l'eau	[s]
τ_{O_2} : constante de temps pour l'oxygène	[s]
Modélisation d'électrolyseur	
Q _{th} : Puissance thermique dégagée par la réaction	[W]
Q _{loss} : Flux échangé avec l'extérieur	[W]
Q _{eau} : Flux échangé avec l'eau d'alimentation	[W]
T : Température de l'électrolyse	[J.K-1]
T _a : Température ambiante	[°C]
T _{eau} : Température de l'eau.	[°C]
N _s ou $N_{cellule}$: Nombre des cellules	[-]
U _{cell} : Tension d'une cellule	[V]
U _{th} : Tension thermo neutre d'une cellule	[V]
I : Intensité	[A]
R _t : Résistance thermique	[-]
h _e : Coefficient d'échange	[-]
T _{ini} : Température initiale	[K]
C _t : Capacité thermique de l'appareil	[-]
Δt : Intervalle de temps	[s]
R: Constante molaire des gaz (8,3144)	[J.mol-1.K-1]
T : Température de la cellule	[K]
F : Constante de Faraday (96 487)	[°C.mol-1]
U ₀ : Tension de décomposition réversible dans les conditions normales (25°C, Pression atmosphérique)	[V]
P _{H2} , P _{O2} et P _{H2O} : Pressions de fonctionnement de l'électrolyseur	[Pa]
ν_e : Coefficient stœchiométrique	
ΔH : Enthalpie de réaction	

Nomenclatures

η_a ou U_{anode} : Surtension anodique	[V]
η_c ou $U_{cathode}$: Surtension cathodique	[V]
R_{SPE} : Résistance globale	[cm 2Ω]
U_{th} : Tension théorique	[-]
U_{ohm} : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur R_{el}	[-]
V : volume d'hydrogène produit	[L]
t : Temps correspondant à la production de volume V = Variable (10 heures)	[-]
T : La température absolue	[°C]
P : Pression atmosphérique = 0.1013	[bar]
Z : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule	[-]
n : La quantité de matière	[mol]
Q: Débit de production d'hydrogène	[l/s]
I_f : Le courant de fonctionnement	[-]
V_f : La tension du point de fonctionnement.	[-]
S : Surface de cellule	[mm ²]

Liste des figures

Figure 1.1: Pétrole	19
Figure 1.2 : Charbon.....	20
Figure 1.3: Centrale nucléaire.	21
Figure 1.4 : Energie solaire thermique	22
Figure 1.5 : Centrale solaire thermodynamique	23
Figure 1.6 : Solaire photovoltaïque	23
Figure 1.7 : Eolienne.	24
Figure 1.8 : Centrale hydraulique.....	25
Figure 1.9 : Central biomasse.....	25
Figure 1.10 : Central géothermie.....	26
Figure 2.1 : Production de l'hydrogène.	28
Figure 2.2 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur.	31
Figure 2.3 : Production et l'utilisation de l'hydrogène.	35
Figure 3.1 : Expérience de Sir William Robert Grove.	36
Figure 3.2 : Principe d'une pile à combustible de type PEMFC.	39
Figure 3.3 : Catalyseur du coté anode.....	40
Figure 3.4 : Couche de diffusion de gaz.	40
Figure 3.5 : plaque bipolair.	41
Figure 3.6 : Le autobus Toyota Sora.....	42
Figure 3.7 : Le voiture BMW-ix5-hydrogen.....	42
Figure 3.8 : Modélisation dynamique de la pile à combustible PEM sur Matlab Simulink	46
Figure 3.9 : Courbe de polarisation de la PEMEC.....	47
Figure 3.10 : la courbe de puissance de la PEMFC.	48
Figure 4.1 : principe de fonctionnement d'électrolyseur Alcalins.	51
Figure 4.2 : Principe de HTE selon le type d'électrolyte	52
Figure 4.3 : principe de fonctionnement d'électrolyseur PEM.	53
Figure 4.4 : Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur.	56
Figure 4.5 : Variation d'éclairement en fonction de temps	58
Figure 4.6 : Variation d'éclairement en fonction de temps	58
Figure 4.7 : Modélisation d'un électrolyseur.	60

Figure 4.8 : Le courbe (I-V) d'électrolyseur expérimentale pour $T_{el} = 80^{\circ}\text{C}$.	60
Figure 4.9 : Variation de courant d'électrolyseur en fonction de temps (avec $t=3600\text{s}$).	61
Figure 4.10 : Variation de tension d'électrolyseur en fonction de temps (avec $t=3600\text{s}$).	62
Figure 4.11 : Système de couplage GPV et électrolyseur sur Matlab Simulink	62
Figure 4.12 : Evolution de volume en fonction de temps (avec $t=3600\text{s}$).	63
Figure 4.13 : Evolution de débit en fonction de temps (avec $t=3600\text{s}$).	64
Figure 5.1 : Le rayonnement solaire.	66
Figure 5.2 : L'irradiation solaire mondiale	67
Figure 5.3 : Irradiation solaire en Algérie	67
Figure 5.4 : Histogramme de l'énergie reçue en moyenne par mois.	68
Figure 5.5 : Numéro de l'heure d'une journée de rayonnement pour le mois défavorable.	68
Figure 5.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.	69
Figure 5.7 : monocristallin	69
Figure 5.8 : polycristallin	70
Figure 5.9 : amorph	70
Figure 5.10 : Association en série des cellules PV	71
Figure 5.11 : Association en parallèle des cellules PV	71
Figure 5.12 : Association mixte des cellules PV	71
Figure 5.13 : Compositions d'un panneau photovoltaïque	72
Figure 5.14 : Les constituants d'un système PV	73
Figure 5.15 : La courbe caractéristique dans le cas d'un ombrage partiel.	74
Figure 5.16 : Utilisation de la diode by-pass.	74
Figure 5.17 : Association sécurisée des modules PV en série parallèle.	75
Figure 5.18 : Topologie des différentes configurations des modules photovoltaïques.	76
Figure 5.19 : Générateur PV Suntech utilisé de faculté d'électronique.	77
Figure 5.20: Caractéristique de $P = f(V)$ en fonction de l'éclairement	77
Figure 5.21 : Caractéristique de $I = f(V)$ en fonction de l'éclairement.	77
Figure 5.22: Configurations du GPV (Cas1), (Cas2) et (Cas 3)	78
Figure 5.23 : Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en série avec ombrage partiel.	79
Figure 5.24 : Caractéristique I-V de 32 panneaux PV en série avec ombrage partiel	79

Liste des figures

Figure 5.25: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en parallèle avec ombrage partiel ..	80
Figure 5.26 : Caractéristique I-V de 32 panneaux PV en parallèle avec ombrage partiel ..	80
Figure 5.27: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en SP avec ombrage partiel.....	81
Figure 5.28: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en SP avec ombrage partiel.....	81
Figure 5.29 : Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour BL avec ombrage partiel	82
Figure 5.30 : Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour BL avec ombrage partiel	82
Figure 5.31: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour HC avec ombrage partiel	83
Figure 5.32: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour HC avec ombrage partiel	83
Figure 5.33: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour TCT avec ombrage partiel	84
Figure 5.34: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour TCT avec ombrage partiel	84
Figure 5.35: Puissance maximale de différentes configurations dans divers cas d'ombrage	86
Figure 5.36 : Facteur de forme (FF)de différentes configurations dans divers cas d'ombrage	87

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : bouteille de stockage d'hydrogène.	33
Tableau 2.2 : prix d'hydrogène.	34
Tableau 3.1: Caractéristiques des principaux types de pile à combustible.	37
Tableau 3.2: Les valeurs des paramètres utilisés dans la simulation.	47
Tableau 4.1 : Réactions mises en jeu pour un HTE.	51
Tableau 4.2 : Comparaison des technologies alcalins, PEM et à haute température.	53
Tableau 4.3 : Les éclaircissements et les températures de la journée du 2/06/2024 à Chlef.....	57
Tableau 4.4 : Données expérimentaux d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V)...	59
Tableau 5.1: Les spécifications techniques fournies par le fabricant.....	76
Tableau 5.2 : Valeur des puissances maximal pour les différents niveaux.....	85

**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

L'énergie est un facteur important qui contribue au développement d'une nation en particulier dans le secteur industriel. Toutefois, en raison de l'augmentation de la demande mondiale d'énergie, les réserves de combustibles comme le gaz naturel et le pétrole diminuent à un rythme alarmant. Les combustibles fossiles sont connus pour émettre des émissions de gaz à effet de serre et donc une pollution accrue. Il est donc primordial de chercher une alternative énergétique durable. Parmi les sources d'énergie, L'hydrogène est un des vecteurs potentiels d'énergie d'avenir pour le stockage de l'électricité comme évoqué dans la loi sur la transition énergétique. Elle peut également être produite en utilisant des énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

L'énergie solaire, joue un rôle crucial dans la production d'hydrogène. En générant de l'électricité grâce à des modules photovoltaïques, l'énergie solaire alimente des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène. Cependant, il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement diminuée par rapport aux conditions optimales de production en raison de divers facteurs météorologiques, tels que l'ombrage.

C'est dans ce contexte que La solution qui est aujourd'hui en lice pour accomplir cette mutation est de remplacer la traction thermique par l'électrique à pile à hydrogène. Cette technologie a ses particularités qu'il y a lieu de prendre en considération.

De nombreux projets de traction électrique à hydrogène ont vu le jour en Europe et dans le monde depuis déjà plusieurs années. L'objectif est de remplacer la thermique avec des énergies propre à partir des panneaux photovoltaïques d'où choix de notre projet de fin étude « Etude et analyse des différentes configurations des modules photovoltaïques pour la réduction de pertes de puissance dans diverses conditions de l'ombrage partiel ».

Pour de notre étude nous avons adopté le plan suivant :

Dans le premier chapitre donnera un aperçu général des énergies renouvelables et non renouvelables pour production l'énergie.

Dans le second chapitre, on présente, l'hydrogène comme un vecteur du futur dans les systèmes énergétiques, son historique, sa production, le principe du stockage et son utilisation.

Dans le troisième chapitre, nous explorons l'historique des PAC, leurs types et nous nous concentrons sur la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) en détaillant ses composants, ses applications dans le transport, ses avantages, ses inconvénients et la modélisation avec les résultats obtenus.

Le quatrième chapitre se concentre sur les électrolyseurs, des dispositifs essentiels dans la production d'hydrogène à partir de l'eau. Nous explorerons les principes fondamentaux de l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène, les différents types d'électrolyseurs, nous comparerons leurs performances et présenterons divers modèles utilisés pour les électrolyseurs PEM. Ont modelés et simulé ce modèle.

Dans le dernier chapitre, nous explorerons l'énergie solaire et le gisement solaire. Ensuite, nous examinerons les principes et les types de cellules photovoltaïques, ainsi que les techniques d'association des modules. De plus, nous aborderons les compositions des panneaux solaires ainsi que l'effet de l'ombrage et les systèmes de protection contre celui-ci. Enfin, nous

réaliserons la simulation d'un système photovoltaïque dans différentes conditions d'ombrage partiel à l'aide du logiciel Matlab avec l'utilisation de panneau solaire de notre université.

On clôture avec une conclusion générale.

CHAPITRE 01

Production d'énergie

1. Production d'énergie

1.1 Introduction

Les énergies jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement de notre société moderne, alimentant nos foyers, nos industries et nos moyens de transport. Elles se divisent principalement en deux catégories : les énergies renouvelables et non renouvelables. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et l'hydrogène, sont issues de sources naturelles inépuisables ou se régénérant rapidement. Elles présentent l'avantage de minimiser l'impact environnemental et de contribuer à la lutte contre le changement climatique. En revanche, les énergies non renouvelables, comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'uranium, proviennent de ressources limitées qui se forment sur des millions d'années. Leur utilisation massive entraîne des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants, posant ainsi des défis environnementaux majeurs.

1.2 Energie fossile

Les énergies fossiles sont principalement constituées de pétrole, de gaz naturel, de charbon et nucléaire. Elles sont les sources d'énergie les plus couramment utilisées dans le monde, représentant plus de 80 % de l'énergie consommée. Contrairement à d'autres formes d'énergie, ils sont non renouvelables

1.2.1 Pétrole

Les hydrocarbures resteront indispensables à court et moyen termes pour les transports et la pétrochimie, représentant environ deux tiers de la demande énergétique mondiale d'ici 2030. Cependant, il est important de prendre en compte le caractère fini des ressources en hydrocarbures et la problématique du changement climatique lors du développement de solutions énergétiques et de mobilité. Les hydrocarbures joueront toujours un rôle important dans l'avenir, mais l'innovation technologique sera essentielle pour repousser les limites de leur utilisation et développer des alternatives. [1]



Figure 1.1: Pétrole

1.2.2 Charbon

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Cette matière combustible provient de résidus fossilisés de forêts qui se sont lentement transformés en charbon. Dès sa découverte, l'homme l'a utilisé pour chauffer les maisons,

alimenter les machines dans les usines et propulser les trains. Aujourd'hui, le charbon est encore employé pour produire de l'électricité, mais sa combustion émet beaucoup de CO².

Il existe différents types de charbon (anthracite, houille, lignite, tourbe) qui possèdent des niveaux de pouvoir énergétique variés. Autrefois, le charbon était la principale source d'énergie fossile, mais il a été progressivement remplacé par le pétrole. Malgré cela, le charbon conserve une présence significative dans l'industrie énergétique actuelle, représentant 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire.

Le charbon est une source d'énergie fossile non renouvelable qui génère d'importantes émissions de CO², contribuant ainsi de manière significative à la pollution et à l'accélération du réchauffement climatique. [2]



Figure 1.2 : Charbon.

1.2.3 Gaz naturel

Le gaz naturel joue un rôle clé dans l'approvisionnement énergétique et continuera d'être important dans le futur. Il offre des avantages environnementaux par rapport aux autres énergies fossiles et dispose de réserves importantes. Depuis les années 70, sa part dans le bilan énergétique mondial augmente régulièrement. Le gaz naturel est de plus en plus échangé à l'international, ce qui rend la sécurisation des approvisionnements cruciale pour les pays importateurs. Bien qu'il ne puisse remplacer le pétrole dans les transports, il restera essentiel dans le mix énergétique futur.

Le gaz naturel est une ressource limitée, principalement localisée dans certaines régions. L'amélioration des conditions d'approvisionnement, de transport et de stockage est stratégique pour son avenir. Actuellement, le gaz représente plus de 20 % de la consommation énergétique mondiale, contre 40 % pour le pétrole. La demande mondiale de gaz naturel a augmenté de 2,5 % par an en moyenne au cours des dix dernières années, une croissance plus rapide que celle de l'énergie en général. Cette hausse est liée au développement du gaz dans le secteur de l'électricité.

Dans la production d'électricité, le charbon, qui représente 40 % de la part, concurrence directement le gaz naturel. Globalement, seulement 4 % du gaz est utilisé comme matière première, contre 25 % pour un usage industriel. Au cours des dix dernières années, le secteur de l'électricité est devenu le principal moteur de l'augmentation de l'utilisation du gaz naturel,

une tendance qui devrait se poursuivre. D'ici 2020, environ 35 % de la consommation annuelle de gaz commercialisé devrait être absorbée par le secteur de l'électricité, en particulier dans les pays émergents.

Le gaz naturel présente un bilan environnemental favorable pour la production d'électricité, avec des émissions de CO₂ réduites de moitié par rapport aux centrales à charbon les plus efficaces. Les centrales à gaz à cycle combiné, qui améliorent l'efficacité énergétique, contribuent significativement à l'augmentation de l'utilisation du gaz dans ce secteur.

1.3 Energie nucléaire

Les énergies fossiles s'épuisent plus vite qu'elles ne se renouvellent naturellement, et les gisements connus finiront par disparaître. L'énergie nucléaire par fission est un cas particulier : les gisements exploitables seront épuisés dans environ 50 à 100 ans, selon l'évolution de la consommation des pays orientaux, notamment avec les futures centrales en Chine et en Inde, ce qui la classe parmi les énergies non renouvelables.

Les réacteurs actuels sont principalement des réacteurs à eau légère de deuxième génération, qui peuvent facilement être approvisionnés en combustible, tout comme les réacteurs de troisième génération. Les réserves connues d'uranium permettent environ 70 ans de consommation actuelle, avec des réserves supplémentaires probables permettant environ 100 ans de plus. Les réacteurs de quatrième génération, prévus pour 2040, pourraient prolonger la durée de vie des ressources de plusieurs milliers d'années.

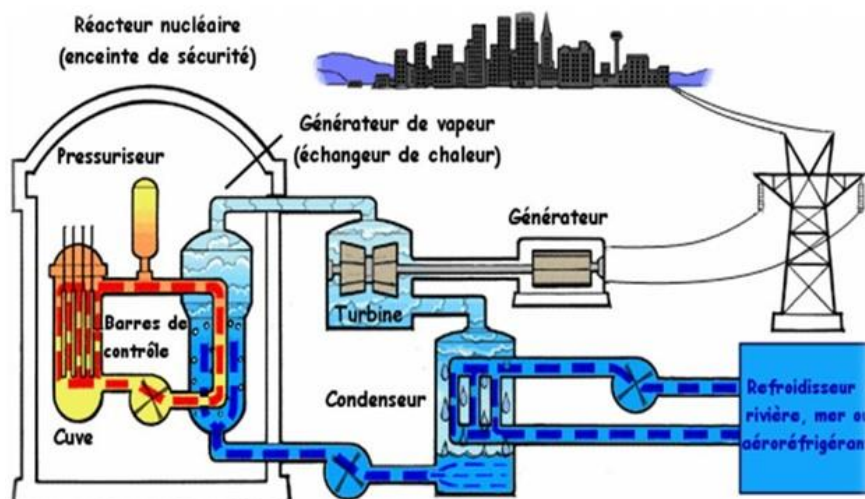


Figure 1.3: Centrale nucléaire.

1.4 Energie renouvelable

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie naturellement régénérables. Il existe cinq principales catégories d'énergies renouvelables. En termes d'exploitation actuelle, elles se classent comme suit :

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique (hydroélectricité)

- La biomasse (avec le bois de chauffage, ainsi que biogaz...)
- La géothermie.

1.4.1 Energie solaire

Plusieurs méthodes permettent de produire et d'utiliser l'énergie solaire, notamment le solaire thermique, le solaire thermodynamique et le solaire photovoltaïque.

1.4.1.1 Solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique en faisant circuler un fluide à travers des panneaux exposés au soleil (Figure 1.4). La conversion d'énergie thermique peut être directe lorsqu'elle est utilisée spécifiquement pour le chauffage de l'eau sanitaire. Cependant, si l'objectif est de produire de l'électricité, il sera nécessaire d'utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique en électricité générée (comme les moteurs à air chaud, par exemple). L'énergie thermique utilise la chaleur provenant du rayonnement solaire pour chauffer les bâtiments ou l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétiques d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [3].

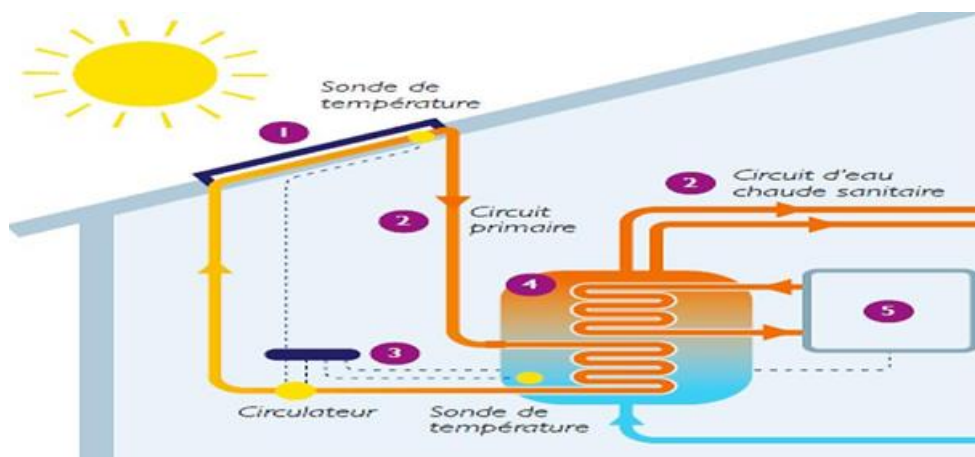


Figure 1.4 : Energie solaire thermique

1.4.1.2 Solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est une méthode de production d'électricité qui permet également de stocker de l'énergie thermique pendant plusieurs heures après le coucher du soleil dans des centrales solaires à concentration. Le processus consiste à concentrer la lumière solaire à l'aide de miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés), produisant ainsi de la vapeur par échange thermique. Cette vapeur actionne ensuite une turbine qui produit de l'électricité. Le fluide utilisé peut maintenir sa température pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, ce qui permet de produire de l'électricité en début de soirée, lorsque la consommation est la plus élevée.[4]



Figure 1.5 : Centrale solaire thermodynamique

1.4.1.3 Solaire photovoltaïque

La production d'énergie photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique qui permet de générer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour capter cette énergie et plusieurs d'entre elles peuvent être combinées pour former un module ou un panneau photovoltaïque. Pour constituer une installation photovoltaïque, plusieurs panneaux sont généralement reliés entre eux pour former un générateur photovoltaïque



Figure 1.6 : Solaire photovoltaïque

1.4.2 Energie éolienne

Les éoliennes exploitent l'énergie cinétique du vent pour faire tourner leur rotor. Cette énergie est convertie en énergie mécanique, puis transformée en énergie électrique grâce à une génératrice électromagnétique située sur le même axe que le rotor. L'électricité produite

peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée directement par des charges isolées.

- Les éoliennes utilisent le mouvement de l'air pour générer de l'énergie, en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique.
- L'énergie éolienne est une source d'énergie durable et non polluante.
- Le vent fait tourner les pales de l'hélice, qui à leur tour actionnent l'arbre d'une génératrice produisant de l'électricité.

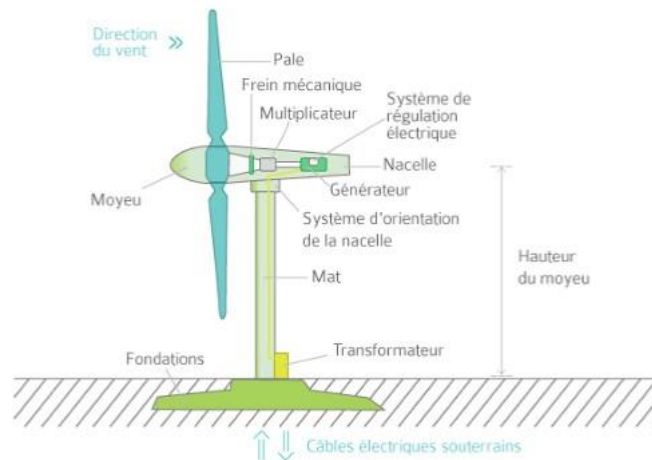


Figure 1.7 : Eolienne.

1.4.3 Énergie hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (figure 1.8). La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [5]

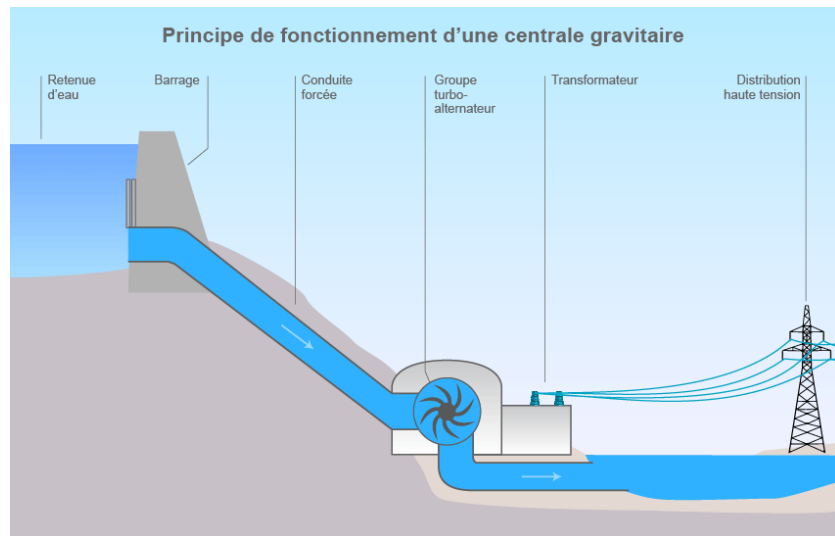


Figure 1.8 : Centrale hydraulique.

1.4.4 Energie biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [6]. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse ce qui est bien montré par la (figure 1.9). Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.

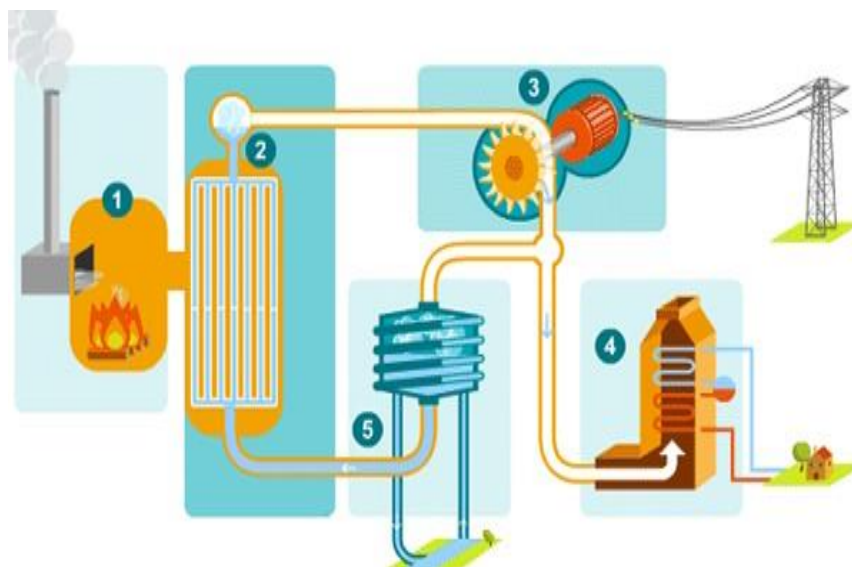


Figure 1.9 : Central biomasse

1.4.5 Energie géothermie

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète est une formidable source d'énergie. Plus on creuse profondément, plus les températures augmentent. La géothermie exploite cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité. Selon la température des différentes couches du sol, la géothermie est classée en « haute énergie »

(plus de 150 °C), « moyenne énergie » (entre 90 et 150 °C), « basse énergie » (entre 30 et 90 °C) et « très basse énergie » (moins de 30 °C). À mesure que l'on s'enfonce dans la Terre, la température augmente, offrant diverses possibilités d'utilisation.

L'énergie géothermique est exploitée en utilisant la chaleur sous la surface de la Terre. Des puits transportent la vapeur et l'eau chaude des profondeurs vers la surface. L'eau chaude ainsi extraite fait tourner les turbines pour produire de l'électricité ou chauffer des bâtiments.

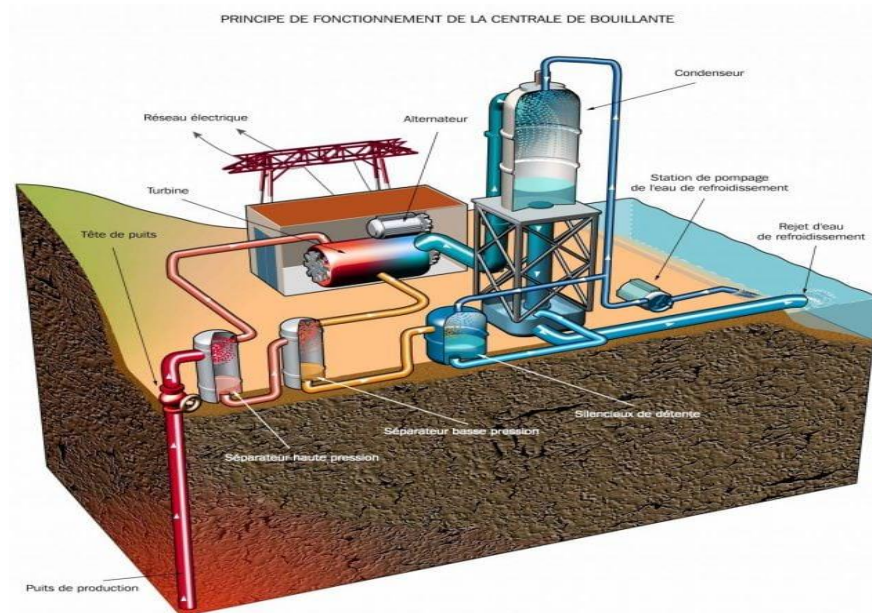


Figure 1.10 : Central géothermie

1.5 Hydrogène

L'hydrogène est une source d'énergie propre et polyvalente, principalement obtenue par électrolyse de l'eau. Son potentiel énergétique est reconnu depuis des décennies, notamment comme carburant pour les fusées et pour la production d'ammoniac. Diverses technologies permettent de l'exploiter : les piles à combustible transforment l'hydrogène en électricité et chaleur, tandis que les moteurs à combustion interne adaptés l'utilisent comme carburant.

L'hydrogène est essentiel pour le stockage de l'énergie renouvelable, comme celle provenant de l'éolien ou du solaire, permettant une utilisation plus flexible et continue. Un kilogramme d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ trois kilogrammes de pétrole, et sa combustion dans l'oxygène produit de l'eau pure, soulignant son caractère très énergétique. De plus, l'hydrogène possède une dualité profonde avec l'électricité, avec une capacité de transformation réciproque directe via l'électrolyse ou les piles à combustible.

CHAPITRE 02

HYDROGENE

2. Hydrogène

2.1 Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. La molécule de dihydrogène (H_2) est constituée de deux atomes d'hydrogène. On parle communément d'hydrogène pour désigner en effet le dihydrogène.[1]

L'hydrogène est très abondant à la surface de la terre que récemment à été se couvert , il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, des molécules comme l'eau et les hydrocarbures.

Extraire l'hydrogène de ces sources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie, comme pour l'électricité, on considère ainsi que l'hydrogène est un vecteur énergétique.il est également utilisé comme combustible propre et comme matière première pour la production de nombreux produits chimiques industriels , à condition de savoir le produire en quantité suffisante et à un coût compétitif et idéalement à partir d'énergie.[1]

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

2.2 Historique

L'histoire de l'hydrogène remonte à plusieurs siècles, mais son exploration et son utilisation à grande échelle dans divers domaines a lieu au cours des deux derniers siècles.

L'hydrogène a été découvert par Henry Cavendish en 1766. Il a observé que lorsqu'il faisait réagir des métaux avec des acides, un gaz inflammable et léger se dégageait, qu'il a appelé "air inflammable". C'était en fait de l'hydrogène.[2]

Au cours du 18ème siècle, des scientifiques tels que Antoine Lavoisier a commencé à comprendre la nature de l'hydrogène et ses propriétés chimiques. Lavoisier a nommé le gaz "hydrogène", ce qui signifie "producteur d'eau" en grec, en raison de sa combustion pour former de l'eau.[2]

Au 19ème siècle, l'hydrogène a été utilisé dans diverses applications industrielles. Dont les ballons à hydrogène pour le transport aérien. Cependant, l'utilisation de l'hydrogène dans ces ballons était risquée en raison de sa nature hautement inflammable.[2]

Au début du 20ème siècle, des méthodes de production plus efficaces d'hydrogène ont été développées, par reformage du méthane, électrolyse de l'eau et procédés chimiques. L'utilisation de l'hydrogène c'est développé en particulier dans l'industrie chimique.[2]

Dans les années 1950 et 1960, l'hydrogène liquide a été largement utilisé comme carburant pour les fusées spatiales en raison de sa forte impulsion spécifique. Cela a conduit au développement de lanceurs spatiaux propulsés par des moteurs à hydrogène liquide, comme le Saturn V utilisé dans le programme Apollo.[2]

À partir des années 1960, la recherche sur les piles à combustible à hydrogène a commencé à gagner en importance. Ces piles convertissent directement l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, avec de l'eau comme sous-produit. Les piles à combustible offrent une alternative propre aux moteurs à combustion interne dans la mobilité.[2]

Actuellement la transition vers une économie à faible émission de carbone nous pousse à l'intérêt de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique de réduire les émissions de carbone. Afin de nombreuses initiatives ont été lancées pour explorer son rôle de l'hydrogène dans la mobilité et le stockage d'énergie.

2.3 Production d'hydrogène

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

La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation [3].

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération :

- Matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois.
- Énergie pour sa production : Cette énergie peut être conventionnelle, comme la production d'hydrogène gris à partir d'hydrocarbures, ou renouvelable (énergie solaire, éolienne, géothermie, etc.) pour produire de l'hydrogène vert.
- Procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie thermique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à l'énergie thermique tel le procédé thermo-chimique. Pour la plupart des procédés, il existe plusieurs types et le nombre est relativement important.

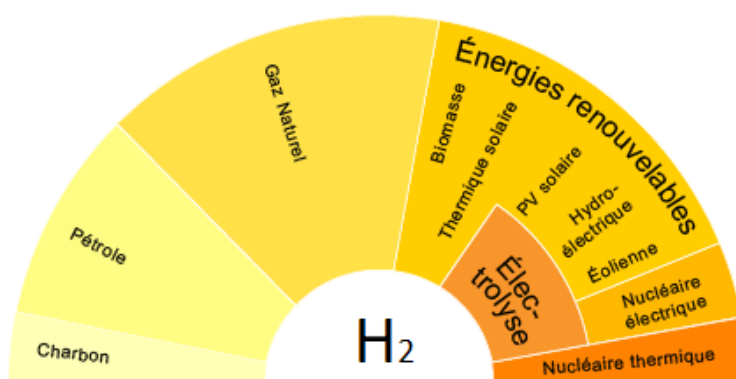


Figure 2.1 : Production de l'hydrogène. [4]

2.3.1 Hydrogène gris

L'hydrogène gris est produit à l'aide de combustibles fossiles (tels que le charbon ou le gaz naturel) et de vapeur. Par conséquent, cette forme de production d'hydrogène est également appelée reformage du méthane à la vapeur. L'avantage de cette méthode de production est que les coûts sont relativement faibles et qu'une production à grande échelle est possible. Les deux processus de production différents :

1. Production à partir du gaz naturel

Il trois procédés chimiques différents pour produit l'hydrogène à partir du gaz naturel :

➤ Vaporeformage

Le vaporeformage ou reformage à la vapeur, consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par réaction avec de la vapeur d'eau et en présence d'un catalyseur à base de nickel, à haute température (840 à 950 °C) et à pression modérée (20 à 30 bars).[5]

➤ Oxydation partielle (POX)

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. A haute température (classiquement de 900 à 1500 °C) et à pression élevée (classiquement 20 à 60 bars), en présence d'oxygène en tant qu'oxydant et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur. [5]

➤ Le reformage Autotherme (ATR)

Le reformage Autotherme (ou ATR) est un procédé à base de gaz naturel au sein d'un même réacteur : une oxydation partielle à l'oxygène pur, suivie d'un vaporeformage. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle à de la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite dirigés vers le réacteur (catalyseur à base de nickel, pression de 20 à 60 bars et température de 900 à 1100°C) pour la production de gaz de synthèse.[5]

2. Gazéification de charbon

La «gazéification» désigne une transformation thermochimique consistant à décomposer par la chaleur un solide combustible carboné (charbon, biomasse) en présence d'un réactif gazeux (gaz carbonique, vapeur d'eau puis oxygène/air) dans le but d'obtenir un mélange gazeux combustible. La réaction de gazéification se passe dans des conditions de température très élevées (plus de 1 000 °C). Le gaz de synthèse obtenu à la fin, appelé « syngas » (pour « synthetic gas »), est un mélange de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H₂). [6]

2.3.2 Hydrogène bleu

La technique utilisée pour produire de l'hydrogène bleu est la même que pour l'hydrogène « gris », c'est-à-dire l'essentiel de l'hydrogène produit dans le monde en 2022 : il s'agit du reformage de gaz fossiles (gaz naturel ou méthane purifié). En règle générale, la technique la plus utilisée est le vaporeformage, dans lequel on fait réagir du méthane avec de la vapeur d'eau à très haute température en présence d'un catalyseur afin de produire du dihydrogène. La seule différence, c'est que l'on ajoute à ces techniques de production d'hydrogène des techniques de captage du CO₂ produit pendant la réaction.[7]

Les deux principales méthodes de captage adaptées au vaporeformage sont :

- Le captage par absorption chimique, qui consiste à faire passer le CO₂ émis lors du vaporeformage du méthane par des solutions chimiques d'amines, puis à le relâcher à haute température.[7]
- Le captage par cryogénie, qui consiste à sublimer (faire passer de l'état gazeux à l'état solide) le CO₂ dégagé par la production de méthane à très faible température (autour de -80 degrés)

Dans les deux cas, il faut un apport externe d'énergie (électricité ou chaleur).[7]

2.3.3 Hydrogène blanc

L'hydrogène blanc est aussi appelé hydrogène naturel ou hydrogène natif. Cela fait référence au fait que l'hydrogène blanc est présent naturellement sur Terre, au même titre que les énergies fossiles que l'on peut extraire des sous-sols. Et peut résulter de différents mécanismes :

Une réaction d'oxydoréduction qui altère des métaux qui contiennent du fer au niveau hydrothermal et entraîne la production d'hydrogène.[8]

Une eau à forte teneur en éléments tels que du plutonium ou de l'uranium subit une radiolyse. Un rayonnement ionisant peut alors causer la rupture des molécules d'eau (H₂O), scission qui peut provoquer à son tour la libération d'hydrogène naturel.[8]

2.3.4 Hydrogène vert

L'hydrogène vert est produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant uniquement d'énergie renouvelable, telle que l'énergie solaire, éolienne ou hydroélectrique. Dans cet électrolyseur, un courant électrique est fait passer dans de l'eau afin de séparer les molécules d'hydrogène et les molécules d'oxygène de l'eau. [9]

L'électrolyse de l'eau est un processus par lequel l'eau est décomposée en dioxygène et dihydrogène grâce à un courant électrique. Ce processus se déroule dans un électrolyseur où l'eau est traitée sous forme d'une solution aqueuse, souvent dopée pour augmenter sa conductivité.

L'électrolyseur contient deux électrodes, l'anode et la cathode, séparées par un électrolyte, généralement une solution aqueuse.

La réaction l'électrolyse de l'eau écrit comme suit :



Les électrolyseurs sont des machines de tailles et de formes différentes qui permettent d'aboutir à un procédé chimique d'électrolyse. Les deux types d'électrolyseurs les plus connus pour l'hydrogène sont l'électrolyseur alcalin et l'électrolyseur PEM. L'électrolyseur alcalin utilise un électrolyte liquide alcalin, tandis que l'électrolyseur PEM utilise une membrane permettant un design compact. [10]

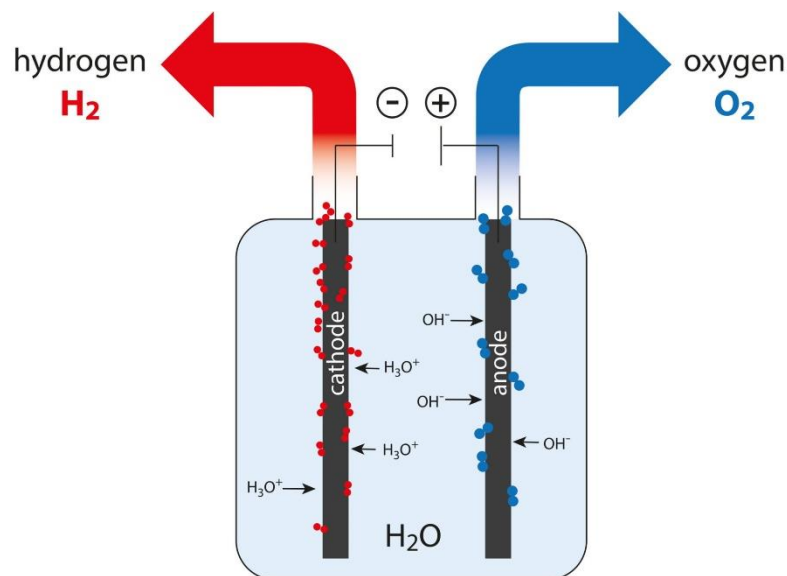


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur. [11]

Cette méthode de production ne dégage pas de CO₂, ce qui fait de l'hydrogène vert le seul hydrogène véritablement durable

2.4 Stockage de l'hydrogène

L'hydrogène a une particularité qui n'est pas négligeable : ce gaz ultra léger (environ 11 fois plus que l'air que nous respirons) occupe un volume d'espace beaucoup plus important que les autres gaz lorsqu'il est soumis à la simple pression atmosphérique. En effet, pour stocker 1 kg d'hydrogène, il faut un volume d'environ 11 m³. Sachant que cette quantité peut permettre à un véhicule alimenté à l'hydrogène de parcourir 100 km, on comprend qu'il est compliqué de le stocker en l'état. Il faut donc mettre en œuvre des moyens techniques importants pour augmenter sa densité et réduire la taille des stockages. Aujourd'hui, on peut compresser l'hydrogène à 700 bars de pression, ou à 350 bars pour la mobilité [12].

Il existe plusieurs technologies de stockage de l'hydrogène :

2.4.1 Stockage sous forme liquide

Il est également possible de stocker de l'hydrogène sous forme liquide, en le refroidissant à très basse température 20,15 K (-253°C). La liquéfaction de l'hydrogène permet d'augmenter encore plus sa masse volumique, et de réduire ainsi la taille des stockages. Toutefois, cette méthode plus coûteuse et complexe n'est aujourd'hui utilisée que pour des usages spécifiques comme le stockage d'hydrogène liquide dans les réservoirs de fusées [12].

2.4.2 Stockage sous forme solide

L'hydrogène est ici absorbé dans un matériau, un hydrure, de façon réversible ce qui signifie que l'hydrogène pourra être restitué ou « désorbé » lorsqu'il devra être utilisé. L'inconvénient de cette technologie hydrogène réside dans la capacité d'absorption massique limitée de ces matériaux. Le poids final du système de stockage est donc important. C'est pour cette raison que ces réservoirs sont principalement utilisés pour des applications stationnaires ou des petites applications mobiles et nomades [13].

2.4.3 Stockage sous forme gazeux

Pour réduire le volume de stockage d'un gaz, on doit augmenter sa pression. Le procédé de fabrication s'appuie sur la technologie hydrogène de l'enroulement filamentaire. On vient renforcer un liner plastique qui va contenir l'hydrogène sous forme gazeuse par des fibres de matériaux composites (fibre de carbone principalement). Ces fibres vont quant à elles permettre au liner de supporter des efforts plus importants, et notamment une pression plus élevée.

Trois types de réservoirs à hydrogène existent en fonction de la pression qu'ils supportent. Il existe des réservoirs à 350 bars, à 450 bars et à 700 bars, en fonction de leurs utilisations. Idéalement, l'hydrogène devrait être compressé à 700 bars. Au-delà, l'hydrogène ne se compresserait plus de manière proportionnelle. Mais plus il est compressé, plus il est gourmand en énergie [13].

2.5 Utilisation de réservoir

Les réservoirs d'hydrogène jouent un rôle central dans la mobilité terrestre en tant que source d'alimentation pour les véhicules à pile à combustible (VPH). Ces réservoirs stockent l'hydrogène nécessaire à la propulsion des VPH, offrant ainsi une alternative aux carburants traditionnels. Grâce à leur capacité à stocker l'hydrogène sous forme liquide ou gazeuse à haute pression, les réservoirs fournissent une autonomie comparable à celle des véhicules à essence ou électriques. De plus, les temps de recharge des VPH à hydrogène sont généralement plus courts que ceux des véhicules électriques à batterie, ce qui contribue à rendre ces véhicules plus attrayants pour les utilisateurs. En intégrant des réservoirs d'hydrogène sûrs et efficaces, la mobilité terrestre peut progresser vers des solutions de transport plus propres et durables, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et les dépendances aux combustibles fossiles.

2.6 Bouteille de stockage d'hydrogène

Tableau 2.1 : bouteille de stockage d'hydrogène. [14]

N°	Type	Pression (Bar)	Capacité (Litre)	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Poids (kg)
1	CHG3-106-3.0-35-T/A	350	3.0	112	465	1.1
2	CHG3-106-3.5-35-T/A	350	3.5	112	527	1.1
3	CHG3-161-5.0-35-T/A	350	5.0	167	362	1.6
4	CHG3-161-9.0-35-T/A	350	9.0	167	575	2.8
5	CHG3-176-12-35-T/A	350	12	188	595	3.4
6	CHG3-210-20-35-T/A	350	20	238	580	5.4
7	CHG3-347-42-35-T/A	350	42	380	820	8.0
8	CHG3-347-60-35-S/A	350	60	368	920	33
9	CHG3-347-70-35-S/A	350	70	368	1035	38
10	CHG3-347-80-35-S/A	350	80	368	1150	43
11	CHG3-347-100-35-S/A	350	100	368	1480	53
12	CHG3-347-120-35-S/A	350	120	368	1610	63
13	CHG3-347-140-35-S/A	350	140	368	1860	73
14	CHG3-347-140-45-S/B	450	140	375	1840	88
15	CHG3-384-180-45-S/B	450	180	410	1870	100
16	CHG3-347-60-70-S/B	700	60	386	920	53
17	CHG3-347-140-70-S/B	700	140	375	1840	100
18	CHG3-347-180-70-S/B	700	180	410	1870	100

Le choix des bouteilles de stockage à 350 bars (poids à vide 180 kg et stocke 8,4 kg d'hydrogène) est justifié par la disponibilité de l'espace dans le bus.

2.7 Transport de l'hydrogène

Les propriétés d'usage et de stockage de l'hydrogène offrent diverses possibilités dans le cadre de la transition énergétique. Injecté dans le réseau de distribution de gaz naturel, il pourrait ainsi, si sa production est décarbonée, augmenter la part de gaz renouvelables de la consommation de gaz globale. Il peut également alimenter les piles à combustible des voitures à hydrogène. Les piles à hydrogène ne rejetant que de la vapeur d'eau, ce gaz renouvelable est un allié de taille dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre (GES). [15]

Aujourd'hui, l'hydrogène est en général produit près de son lieu d'utilisation, mais cet état de fait est amené à évoluer avec l'augmentation des volumes produits. À ce titre, le transport de l'hydrogène entre un centre de production et un lieu d'utilisation constitue un enjeu de premier plan pour l'essor de la filière hydrogène. Il existe actuellement trois types de transport d'hydrogène :

- Le transport par canalisations dédiées,
- Le transport routier ou ferroviaire dans des bouteilles en acier (rack) ou par tube trailer,
- Le transport maritime.

- **Prix d'hydrogène**

Tableau 2.2 : prix d'hydrogène. [16]

Coût de production	€/ kg	€/ MWh
H2 vert	3 – 7	90 – 210
H2 bleu	2	60
H2 gris	1,5	45

2.8 Utilisation de l'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène est variée et en évolution constante, et elle est de plus en plus explorée en raison de ses avantages potentiels en tant que source d'énergie propre et renouvelable. Voici quelques-unes des principales utilisations de l'hydrogène :

- **Mobilité terrestre, aérien et naval**

L'hydrogène peut être utilisé pour tous les modes de transport. Dans les secteurs du camionnage, du transport ferroviaire, du transport maritime et de l'aviation ont des cycles d'utilisation à forte intensité énergétique et de longues distances, ce qui rend l'hydrogène idéal pour ces secteurs. Pour tous ces modes de transport, l'hydrogène peut être utilisé directement dans une pile à combustible ou peut être brûlé seul ou avec des mélanges de combustibles.[17]

Véhicules à pile à combustible (PAC) ou Les véhicules à hydrogène, équipés de piles à combustible, utilisent de l'hydrogène comme carburant pour générer de l'électricité à bord. Ces véhicules produisent de l'électricité en combinant l'hydrogène avec de l'oxygène de l'air, ne produisant que de l'eau comme sous-produit. Cela réduit les émissions de gaz à effet de serre et améliore la qualité de l'air. Cette électricité alimente les moteurs électriques du véhicule, produisant de l'énergie sans émissions nocives, à l'exception de l'eau.[18]

- **Production d'électricité**

L'hydrogène peut être utilisé comme combustible pour produire de l'électricité, dans divers domaines:

- Turbines.
- Centrales fixes à piles à combustible.

L'hydrogène peut être produit à partir d'énergie renouvelable et d'être utilisé comme mécanisme de stockage accroissant la résilience du réseau.[17]

- **Chaleur pour l'industrie et les bâtiments**

En tant que combustible, l'hydrogène est une molécule dont la combustion est plus propre et peut être utilisée à la place des combustibles fossiles lorsque de la chaleur de haute température est nécessaire pour les processus industriels et dans l'environnement bâti. Le mélange d'hydrogène et de gaz naturel peut être utilisé dans bon nombre d'applications à la place du gaz naturel pur, notamment pour produire de la chaleur. L'utilisation directe de

l'hydrogène propre ou de mélange avec du gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles contribuera à réduire les émissions de carbone.[17]

- **Matières premières pour l'industrie**

À l'heure actuelle, l'hydrogène est principalement utilisé, comme matière première dans des secteurs industriels à fortes émissions, notamment le raffinage du pétrole, la production d'ammoniac, la production de méthanol et la production d'acier. La majeure partie de cette matière première à base d'hydrogène est actuellement produite par reformage du méthane à la vapeur sans captage ni stockage du carbone. L'hydrogène propre offre une grande possibilité pour ces industries de réduire l'intensité en carbone de leurs produits et leurs émissions totales.[17]

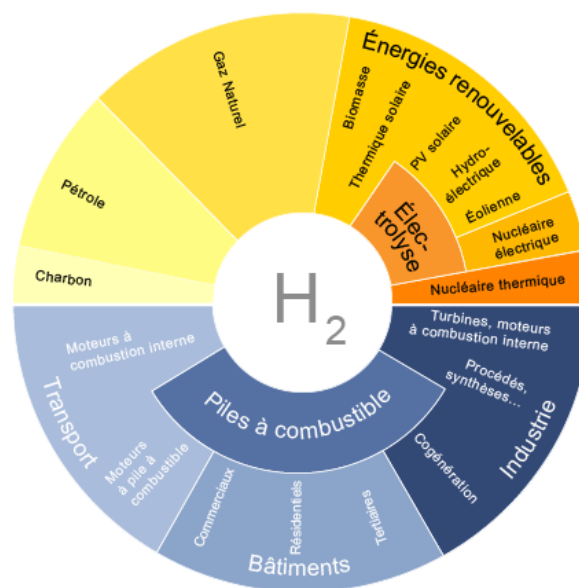


Figure 2.3 : Production et l'utilisation de l'hydrogène. [4]

CHAPITRE 03
PILE A COMBUSTIBLE

3. Pile à combustible (PAC)

3.1 Introduction

Les piles à combustible sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique de la réaction d'un carburant (hydrogène) et d'un oxydant (l'oxygène) en électricité. Les PAC se différencient par la nature de leur électrolyte, soit acide conduisant les ions positifs (protons H^+) de l'anode à la cathode, soit basique en sens contraire.

Les PAC sont considérées comme des convertisseurs d'énergie, sans émissions des produits polluants mais rejettent de l'eau et produit de la chaleur. Selon la température de fonctionnement, on peut distinguer plusieurs types des PAC, chacun d'eux avec ses propres caractéristiques.

3.2 Historique

La découverte de la pile à combustible est attribuée au Suisse Christian Schönbein (1799 /1868) en 1838. Après avoir effectué une électrolyse dans un tube en U avec deux électrodes en platine, il a arrêté le transit du courant et remarqué qu'un courant électrique propager dans le sens inverse. [1]

En 1839, lors d'une conférence scientifique à Birmingham, Schönbein rencontre l'avocat et chimiste anglais Sir William Robert Grove qui travaillait à l'époque sur les batteries électriques. Par la suite, les deux hommes entretiennent une correspondance et mettent en commun leurs découvertes. Ceci débouche sur la célèbre expérience de Grove avec PAC : il s'agissait d'une cellule hydrogène-oxygène avec des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte. Nous sommes en 1845, Grove génère un courant sur le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, c'est la première pile à combustible. [2]

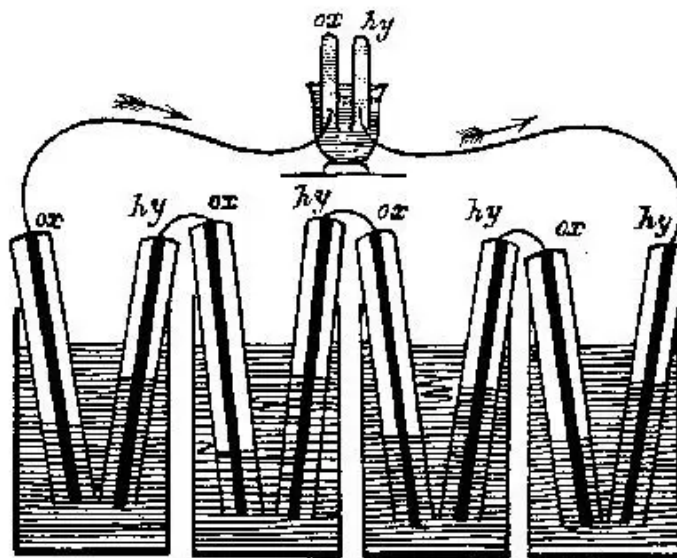


Figure 3.1 : Expérience de Sir William Robert Grove. [2]

Bien que la pile à combustible ait été découverte en 1839, il est resté jusqu'en 1930 pour entrer dans le développement et l'utilisation.

3.3 Types de la pile à combustible

Il existe plusieurs types de pile à combustible et elles sont classées généralement selon l'application, la puissance, le type du carburant, le type de charge transféré par l'électrolyte, la température de fonctionnement et l'électrolyte utilisé. Les six types les plus utilisés [3] :

- **Les PEMFC** (Proton exchange membrane fuel cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température (20-100°C). Celle-ci transmet sélectivement vers la cathode les ions H^+ formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode.
- **Les DMFC** (Direct methanol fuel cell). Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol (CH_3OH). Injectée directement sur l'anode avec de l'eau son oxydation catalytique produit des ions H^+ et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les H^+ vers la cathode.
- **Les PAFC** (Phosphoric acid fuel cell) utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C.
- **Les AFC** à potasse liquide (Alkaline fuel cell) utilisent l'ion OH libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode.
- **Les MCFC** (Molten carbonate fuel cell) utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions CO_3^{2-} .
- **Les SOFC** (Solid oxide fuel cell) exploitent un électrolyte solide (zircone dopée aux terres rares) pour produire des ions O_2^- .

Tableau 3.1: Caractéristiques des principaux types de pile à combustible. [3]

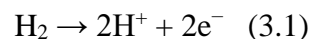
PAC	Electrolyte	Température (°C)	Rendement %	Combustible	Carburant	Domaine d'utilisation et la gamme de puissance
AFC (Alkaline fuel cell)	Alcaline (KOH, NaOH)	60-120	25-50	H_2 pur	Air ou O_2 pur	Transport spatial et véhicule 1-100 kW
PEMFC (Proton exchange)	Membrane A échange De protons	60-120	50-60	H_2 pur	Air ou O_2 pur	Portable, Transport, stationnaire

membrane fuel cell)	(Na on)					10 kW-250kW
DMFC (Direct methanol fuel cell)	Membrane à échange de protons (H ₂ SO ₄)	60-120	20-30	CH ₃ OH Méthanol	Air ou O ₂ pur	Portable, transport 5kW
PAFC (Phosphoric acid fuel cell)	Acide Phosphorique (H ₃ PO ₄)	150 - 220	55	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	Air	Stationnaire 250W-11MW
MCFC (Molten carbonate fuel cell)	Mélange de LiCO ₃ et de K ₂ CO ₃	600 - 800	60-65	H ₂ , CH ₄	Air	Stationnaire 1kW-25MW
SOFC (Solid oxide fuel cell)	Oxyde de zirconium stabilisé ZrO ₂ et Y ₂ O ₂	750 - 1050	55-65	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH, CO	Air	Stationnaire 500 W -10 MW

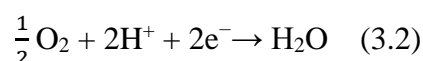
3.4 Pile à combustible PEM

3.4.1 Principe de fonctionnement

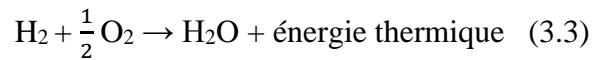
La pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) permet de convertir l'énergie chimique d'oxydation du dihydrogène en énergie électrique et thermique selon la réaction globale de synthèse de l'eau. La pile est constituée de deux électrodes, l'une alimentée en dihydrogène et l'autre en dioxygène (ou en air) qui sont séparées par une membrane échangeuse de protons (l'électrolyte). Du côté anodique, l'hydrogène est oxydé à la surface d'un catalyseur en protons avec libération d'électrons selon la demi-équation suivante [4]:



Et du côté cathodique l'oxygène est catalytiquement réduit en eau grâce à la présence d'une part des protons qui ont traversé la membrane électrolyte depuis l'anode et d'autre part des électrons qui sont transférés par le circuit extérieur. Cette demi-réaction de réduction s'écrit :



La réaction globale de ces deux demi-réactions électrochimiques permettant la production de courant s'écrit alors :



Le schéma simplifié du fonctionnement d'une pile de type PEM est présenté en Figure 3.2 :

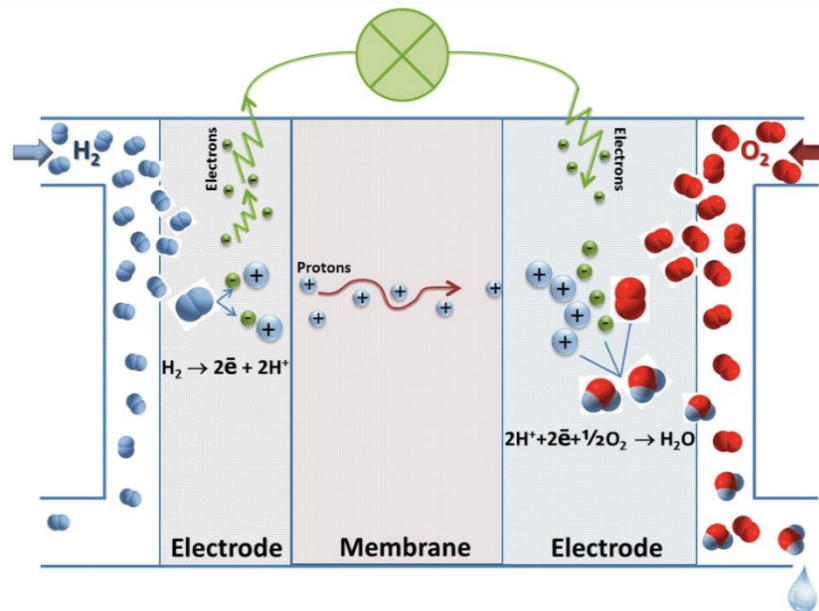


Figure 3.2 : Principe d'une pile à combustible de type PEMFC. [5]

3.4.2 Composants de la pile à combustible

3.4.2.1 Electrolyte (Membrane)

L'électrolyte utilisé dans la PEMFC est une fine membrane polymère, en général, c'est le NafionTMA une base PTFE (poly-tétra-fluoro-éthylène hydrophobe) avec des groupes sulfoniques (SO_3^-) hydrophiles. Dans un milieu humide, les ions H^+ fixés aux groupes SO_3^- sont mobiles et se transportent dans la membrane. Parmi les caractéristiques principales pour cette membrane est sa conductivité ionique, qui est en termes de l'épaisseur de la membrane et le taux d'humidité (un faible taux d'humidité augmente la résistance de la membrane et un taux d'humidité trop élevé diminue cette résistance). Une autre caractéristique est la tenue en température, les membranes fonctionnent à des températures inférieures à 100°C pour éviter la dégradation du matériau. [1]

3.4.2.2 Électrodes

Les électrodes généralement sont constituées de fines particules de carbone avec une grande surface active. Les réactions électrochimiques se produisent à cette surface, elle doit permettre une circulation des électrons libérés lors de la décomposition de l'hydrogène. Les électrodes sont caractérisées par : une bonne conductivité électrique, une bonne diffusion des gaz et une surface importante de contact avec électrolyte.[1]

3.4.2.3 Couche active (Catalyseur)

On utilise le catalyseur afin faciliter, accélérer et d'augmenter l'efficacité de la réaction électrochimiques mais n'est pas consommé dans le procédé. Le catalyseur est déposé avec un liant sur la surface de chaque électrode où il est en contact de l'électrolyte, ce liant peut être hydrophobe pour faciliter l'évacuation de l'eau ou hydrophile afin d'augmenter le contact avec l'électrolyte. Pour l'anode sont utilisé un mélange platine/ruthénium et le platine seul pour la cathode.[1]

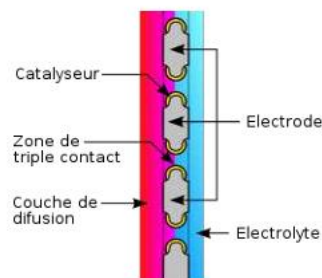


Figure 3.3 : Catalyseur du côté anode. [1]

3.4.2.4 Couche de diffusion

Elle est construite sur du carbone soit sous forme de fibre tissée soit de non tissé pressé avec une épaisseur comprise entre 0.2 et 0.4 mm et une grande porosité.[1]

Ses fonctions sont:

- Assurer la transition des gaz vers le catalyseur et l'électrolyte.
- Fournir un soutien mécanique au groupement membrane-électrode/catalyseur.
- Garantir la circulation du courant produit vers les électrodes.
- Permettre l'évacuation de l'eau formée.
- Éliminer la chaleur résultant par les réactions.

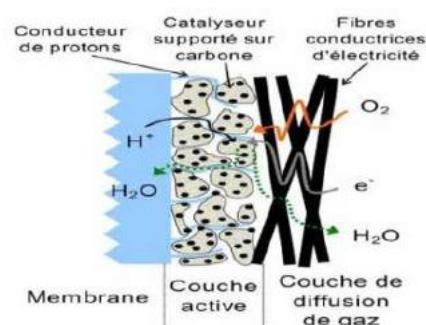


Figure 3.4 : Couche de diffusion de gaz. [1]

3.4.2.5 Plaques bipolaires

Ces plaques sont accolées aux supports d'anode et de cathode. Leurs rôles:

- Canaliser les gaz venant de l'extérieur,
- Collecter les électrons (le courant),
- Gérer les flux d'eau.

Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant (supérieur à 10 siemens/cm), une imperméabilité au gaz supérieure à celle de la membrane échangeuse de protons et une bonne inertie chimique vis-à-vis des fluides présents dans le cœur de pile (eau, acide, oxygène...).

Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite et les canaux de distribution des gaz sont obtenus par usinage. Ces plaques, sont disponibles commercialement mais à des prix très élevés, essentiellement dus à la phase d'usinage, ne permettent pas d'envisager une utilisation industrielle. Pour réduire ce coût, deux autres types de plaques bipolaires ont été mis au point.

Les plaques bipolaires à base de composites organiques. Ces plaques reposent sur l'utilisation de charges (carbone, graphite...) dispersées dans un matériau thermoplastique ou thermodurcissable. Ces charges vont donner aux plaques bipolaires la conductivité électrique nécessaire à la collecte du courant et le liant polymère leur bonne tenue mécanique nécessaire à l'assemblage des différents éléments. L'intérêt majeur réside d'une part dans le faible coût des matières de base et d'autre part dans le fait que les canaux de distribution peuvent être obtenus directement par moulage du polymère chargé sur une empreinte sans phase ultérieure d'usinage.

Les plaques bipolaires à base de métaux et alliages, et particulièrement les aciers inoxydables. Celles-ci présentent un ensemble de propriétés (tenue mécanique, étanchéité, conductivité électrique, aptitude à la mise en forme et l'assemblage par des procédés de production de masse) qui en font des candidates de choix pour la conception et la réalisation de plaques bipolaires compactes, légères et bon marché. Leur densité supérieure à celle du graphite impose de les utiliser sous forme de feuilles minces, facilement mises en forme par emboutissage. Dans ces conditions, l'évacuation des calories et le contrôle de la température du module en fonctionnement peuvent être assurés avec précision par circulation d'un fluide de refroidissement interne.[6]

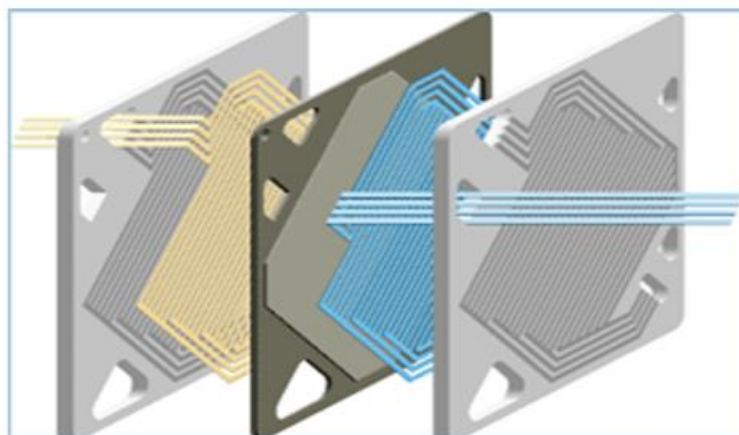


Figure 3.5 : plaque bipolair. [6]

3.5 Applications de la pile à combustible au transport

De même la PAC est utilisée dans la mobilité pour résoudre les problèmes de l'augmentation du prix des carburants, diminuer la pollution atmosphérique. Utilisée dans le transport. Effectivement pile à combustible présentent une alternative au niveau des combustibles carbone et contribuent à une grande baisse de la pollution et des particules comparativement aux moteurs thermiques. Elles sont même non polluantes pour l'hydrogène vert et blanc.

- Dans un train du nom de Coradia iLint qui a été créé par le groupe Alstom et est entré en service en Allemagne en 2018. Il a été conçu à Salzgitter en Allemagne et à Tarbes en France.

- Dans véhicules les prototypes les plus connus sont de la marque Mercedes, Audi, Peugeot, Ford, GM, Nissan, BMW et d'autres marques. De plus, les voitures hybrides électriques à hydrogène commercialisées depuis 2016 sont Toyota, Hyundai et Honda. Des bus à hydrogène ont également été fabriqués par la société belge Van Hool, Toyota Sora il peut accueillir jusqu'à 80 passagers, une autonomie d'environ 350 kilomètres.

- Dans le domaine aéronautique, le premier exemple d'application est le Dimona qui a été transformé par Boeing. Il s'agit d'un modèle réduit alimenté par une pile à hydrogène de type PEMFC de la firme britannique Intelligent Energy. L'avion a volé environ 20 minutes en palier à 100 km/h et a grimpé jusqu'à une altitude de 1000 mètres.

- Dans le domaine naval, nous avons deux types d'applications, les bateaux et les sous-marins. Nous avons par exemple les sous-marins allemands Type 212, et Type 214 développés par Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW), utilisant comme la pile à combustible de type PEMFC.



Figure 3.6 : Le autobus Toyota Sora.[7] Figure 3.7 : Le voiture BMW-ix5-hydrogen.[8]

3.6 Avantages et inconvénients de la pile à combustible

3.6.1 Avantages

- Elles ne dégagent aucunes émissions.
- Elles produisent un très bon rendement énergétique.
- Elles ne délivrent pas le son.
- Elles supportent des températures allant jusqu'à 1000 degrés Celsius (dans le cas des piles SOFC) , et fonctionner facilement à basse température.
- Elles ne nécessitent pas beaucoup d'entretien.

3.6.2 Inconvénients

- Coût onéreux de la pile à combustible à cause de l'usage de matériaux chers et les volumes de production encore limités.
- Prix de l'hydrogène assez élevé.
- La problématique de la durée de vie elle est limité. [5]

3.7 Modélisation d'une pile PEM

3.7.1 Débits d'hydrogène et d'oxygéné

L'équation suivante donne les débits d'entrée de l'hydrogène (H2) et de l'oxygène (O2) :

$$\dot{m}_{j,in} = \frac{N_0 \cdot I}{2 \cdot F \cdot U} \quad (3.4)$$

N_0 : est le nombre de cellules en série.

I :le courant électrique [A].

F :la constante de Faraday [964872 C].

U :le taux d'utilisation.

3.7.2 Resistance interne

L'équation de la résistance interne est la suivante :

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 \times 10^{-5} \cdot T + 8 \times 10^{-5} \cdot I \quad (3.5)$$

3.7.3 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques résultent de la résistance des plaques bipolaires ainsi que des électrodes, qui s'opposent à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. [9]

$$\eta_{ohmic} = I \cdot R_{int} \quad (3.6)$$

3.7.4 Pertes d'activations

Lorsque les réactions chimiques débutent au sein des électrodes, Une fraction de l'énergie disponible est alors utilisée pour la rupture et la reformation des liaisons chimiques au niveau des électrodes.[10]

$$\eta_{act} = B \times \log (C \times I) \quad (3.7)$$

B : constante d'activation de tension (A^{-1}).

C : facteur d'échelle (m/s).

I : Courant électrique (A).

3.7.5 Résistance d'activation

L'équation de la résistance d'activation est la suivante :

$$R_a = -\frac{\eta_{act}}{I} \quad (3.8)$$

3.7.6 Constante de modélisation K_r

C'est une constante utilisée pour simplifier l'écriture des équations.

$$K_r = \frac{N_0}{4.F} \quad (3.9)$$

3.7.7 Pression de l'hydrogène

La quantité d'hydrogène consommée dans la pile à combustible dépend des débits d'entrée et de sortie. Si ces derniers sont connus, la pression à l'anode peut être déterminée par la loi des gaz parfaits: $PV = nRT$ (3.10)

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2in} - \dot{m}_{H_2out} - 2 \cdot K_r \cdot I \quad (3.11)$$

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (\dot{m}_{H_2in} - \dot{m}_{H_2out} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_{H_2out} = K_{H_2} \cdot P_{H_2} \quad (3.13)$$

On remplace (3.11) dans (3.10) on obtient :

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \frac{RT}{V_{an}} (\dot{m}_{H_2in} - 2 \cdot K_r \cdot I) - \frac{RT}{V_{an}} K_{H_2} \cdot P_{H_2} \quad (3.14)$$

$$P_{H_2} = \frac{1}{K_{H_2}} (\dot{m}_{H_2in} - 2 \cdot K_r \cdot I) - \frac{dP_{H_2}}{dt} \cdot \frac{V_{an}}{RTK_{H_2}} \quad (3.15)$$

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RTK_{H_2}} \quad (3.16)$$

Après simplifications :

$$\tau_{H_2} \cdot \frac{dP_{H_2}}{dt} + P_{H_2} = \frac{1}{K_{H_2}} (\dot{m}_{H_2in} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad (3.17)$$

En appliquant la transformation de LAPLACE :

$$P_{H_2} = \frac{1}{\tau_{H_2} \cdot s + 1} (\dot{m}_{H_2in} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad (3.18)$$

3.7.8 Pression de l'oxygène

On applique la même méthode que pour le calcul de la pression d'hydrogène pour déterminer la pression de l'oxygène.

$$\frac{dP_{O_2}}{dt} = \frac{RT}{V_c} (\dot{m}_{O_2in} - \dot{m}_{O_2out} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad (3.19)$$

On a:

$$P_{O_2} = \frac{\frac{1}{K_{O_2}}}{\tau_{O_2} \cdot s + 1} (\dot{m}_{O_2 in} - 2 \cdot K_r \cdot I) \quad (3.20)$$

3.7.9 Pression de l'eau

On applique la même méthode que pour le calcul de la pression d'hydrogène et l'oxygène pour calculer la pression de l'eau.

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2O}}{dt} = \dot{m}_{H_2O in} - \dot{m}_{H_2O out} + 2 \cdot K_r \cdot I \quad (3.21)$$

On a :

$$P_{H_2O} = \frac{\frac{1}{K_{H_2O}}}{\tau_{H_2O} \cdot s + 1} (2 \cdot K_r \cdot I) \quad (3.22)$$

3.7.10 Potentiel thermodynamique

Le potentiel thermodynamique est calculé en négligeant la pression l'eau.

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \times \log \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.23)$$

E_0 : est la tension standard, calculée à partir de l'enthalpie libre standard définie pour 25°C et à 1 bar, et P_{O_2} et P_{H_2} sont respectivement les pressions relatives (bars) des gaz oxygène et hydrogène.

F : est la constante de Faraday (96485 C/mol).

R : constante des gaz parfaits. (8,314J/K/mol).

P : Pression en atmosphérique.

T : température de fonctionnement du composant (K)

3.7.11 Tension d'une cellule de la PAC

La tension de sortie de la cellule est calculée en prenant en compte plusieurs facteurs, notamment l'effet thermodynamique, le transport de masse, la cinétique et la résistance ohmique.

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (3.24)$$

3.7.12 Tension totale de la cellule PAC

La tension totale de la cellule est donnée par :

$$V_{Stack} = N_0 \times V_{cell} \quad (3.25)$$

3.7.13 Puissance d'une pile à combustible

La puissance d'une pile à combustible de type PEM est donnée par la relation :

$$P = V_{Stack} \cdot I \quad (3.26)$$

3.8 Modèle dynamique de la pile à combustible PEM

En utilisation de logiciel Matlab Simulink nous avons appliqué les équations de modélisation mathématique évoquées auparavant afin de générer le schéma de modélisation dynamique de la batterie.

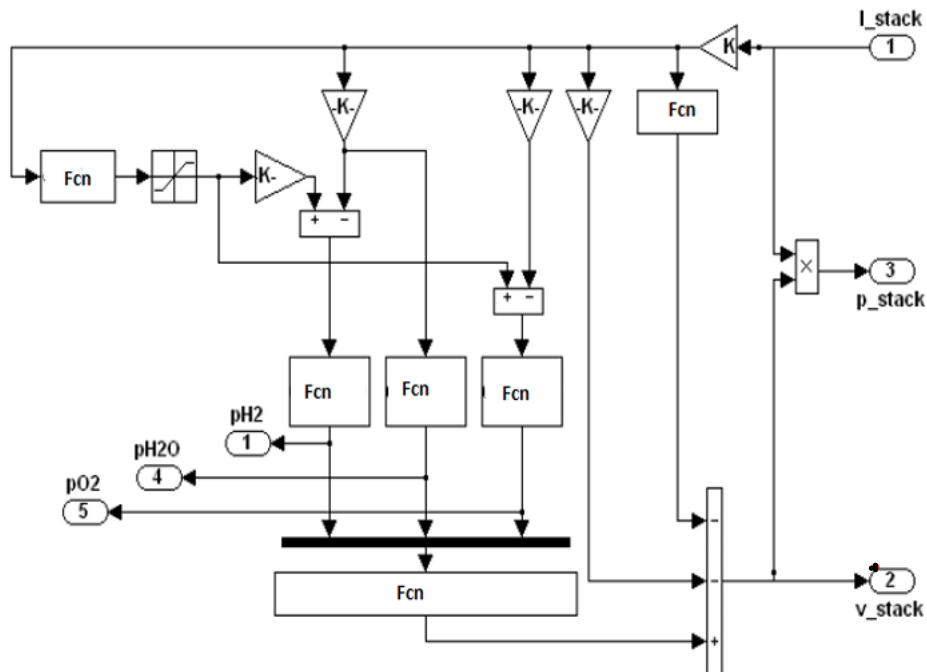


Figure 3.8 : Modélisation dynamique de la pile à combustible PEM sur Matlab Simulink.[11]

3.8.1 Introduction de modèle

Voici les étapes pour accomplir ce processus :

- Définir les différentes constantes, telles que la constante de Faraday (F), la constante des gaz parfaits, le nombre de cellules, la surface de cellule, le coefficient de transfert (α), le coefficient de modélisation (K_r), la constante de transport de masse (k), etc.
- Fixer les valeurs des variables telles que la température (T_c), la valeur de l'équation de Gibbs, la résistance interne (R_{int}), et le courant (I).
- Calculer les débits d'entrée en utilisant les équations appropriées pour $\dot{m}(H_2, O_2, H_2O)$ à l'aide du bloc fonction.
- Calculer les pressions partielles de chaque matière.
- Calculer la tension de Nernst pour les différents types de pertes afin de trouver la tension d'une seule cellule.

- Pour obtenir la tension d'empilement, multiplier la valeur trouvée par le nombre de cellules.

3.8.2 Caractéristiques d'une pile à combustible

Les caractéristiques d'une pile à combustible prises en compte dans notre simulation sont présentées dans le tableau 3.2 :

Tableau 3.2: Les valeurs des paramètres utilisés dans la simulation. [12]

Paramètre	Valeur
Constante de Faraday	$F = 964872 \text{ C.}$
Constante des Gaz parfaits	$R=8.314 \text{ (J/mol k).}$
Température	$T_c=80 \text{ }^\circ\text{C.}$
Pression de l'hydrogène	$P_{H_2} = 3 \text{ (atm).}$
Pression de l'Air	$P_{H_2O} = 3 \text{ (atm).}$
Surface de Cellule	$S_{\text{cell}}=100.\text{mm}^2$
Nombre de cellules	$N_0=90.$
Resistance interne	$R_{\text{int}} = 0.19 \text{ (Ohm-cm}^2\text{)}$
Coefficient de transfert	$\alpha = 0.5;$
Facteur d'Amplification	$\alpha_1 = 0.085$
Facteur d'échange densité de courant	$i_0 = 10^{-6,912} \text{ (A/cm}^2\text{)}$
Densité de courant limite	$i_l = 1.4 \text{ (A/cm}^2\text{)}$
Fonction de Gibbs état liquide	$G_{f_liq} = -228170 \text{ (J/mol).}$
Constante transport de masse	$K = 1.1.$

3.9 Résultats obtenus et discussions

3.9.1 Courbe de polarisation

La tension réelle de la pile à combustible diminue par rapport à la tension de Nernst, en raison de pertes de tension dues à des phénomènes de polarisation ou de surtension, qui sont de deux types : polarisation d'activation, polarisation ohmique

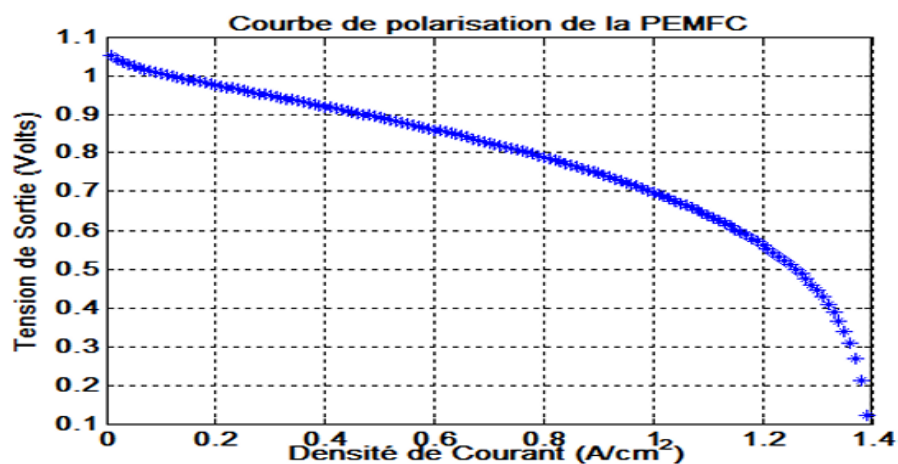


Figure 3.9 : Courbe de polarisation de la PEMEC.

On a trois régions opérationnelles sur la courbe de polarisation :

1. Partie 1 (0 et 0.4 (A/cm²): la tension diminue à cause des pertes au démarrage des réactions chimiques aux électrodes (pertes d'activation). Une énergie est nécessaire pour casser les liaisons chimiques.

2. Partie 2 (0.4 et 1 (A/cm²): la tension diminue d'une manière linéaire reflétant un fonctionnement résistif causé par le transfert des électrons dans les électrodes et les plaques bipolaires (conductivité élevée) et le transfert des protons dans l'électrolyte (pertes ohmiques).

3. Partie 3 (1 et 1.4 (A/cm²): La tension chute d'une manière rapide avant de s'annuler pour une densité de courant importante. Cela est dû à un manque de diffusion des gaz, ou peut être un manque dans l'alimentation ou autre facteur d'alimentation (pertes de transports de masse).

3.9.2 Courbe de puissance

Le graphique montre que la puissance est fonction de la densité de courant. La forme de la courbe est parabolique : la puissance augmente de manière linéaire jusqu'à atteindre un point maximum, puis elle diminue linéairement. La puissance d'une pile à combustible PEM est d'environ 6000 W pour un fonctionnement optimal, mais elle diminue si la densité de courant augmente, car la tension chute (la puissance étant le produit de la tension et du courant).

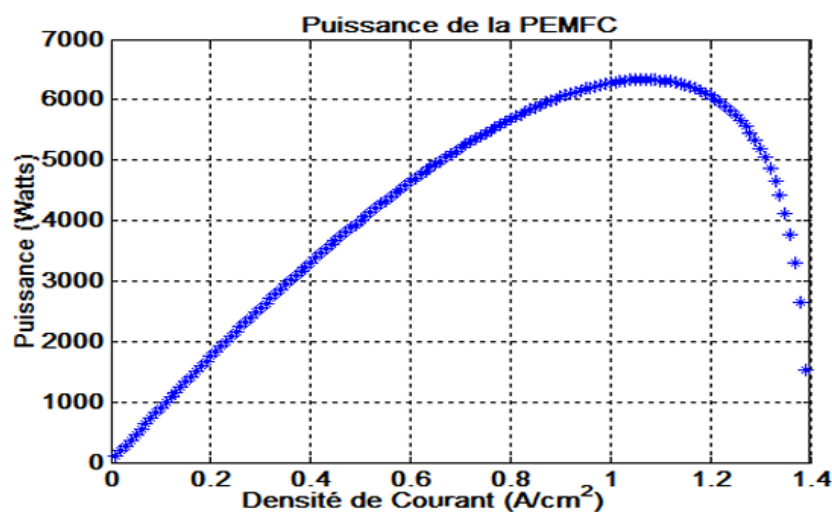


Figure 3.10 : la courbe de puissance de la PEMFC.

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les piles à combustible et leurs types. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux piles à membranes polymères échangeuses de protons (PEM) en raison de leurs avantages. Ensuite, nous avons décrit le principe de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM ainsi que la structure complète de leur cellule. Enfin, nous avons développé un modèle dynamique d'une pile à combustible de type PEM, en examinant les diverses équations mathématiques permettant de mieux comprendre les phénomènes se déroulant dans cette structure. Par la suite, nous avons présenté un exemple de simulation des propriétés de la pile à combustible.

CHAPITRE 04

ÉLECTROLYSEURS

4. Électrolyseurs

4.1 Introduction

L'hydrogène est un vecteur énergétique, nécessitant d'être produit avant d'être stocké et utilisé. Il est principalement obtenu par le reformage ou la gazéification d'hydrocarbures, ainsi que par l'électrolyse de l'eau. Le choix du procédé de fabrication dépend de divers paramètres tels que le type d'énergie primaire disponible, pureté, débits. L'électrolyse représente seulement 4 % de la capacité totale de production d'hydrogène. Cependant, pour obtenir de l'hydrogène hautement pur, l'électrolyse de l'eau est privilégiée. Elle est utilisée si l'électricité provient de sources d'énergie renouvelables, telles que l'éolien ou le photovoltaïque

4.2 Principe d'électrolyse de l'eau pour production d'hydrogène

L'électrolyse se déroule au sein d'un système électrochimique appelé cellule d'électrolyse, où un courant électrique est acheminé à travers un milieu ionique, déclenchant ainsi une réaction chimique aux électrodes. Les électrodes métalliques sont couramment utilisées dans les électrolyseurs en raison de leur capacité à conduire l'électricité. Les composants ioniques peuvent être liquides ou solides, et dans les deux cas, les ions libres peuvent constituer un flux ou un courant. La cellule se compose de deux électrodes, une anode et une cathode, disposées de part et d'autre d'un conducteur ionique, qui est l'électrolyte. Ces électrodes sont connectées à un générateur de courant, qui idéalement devrait être alimenté par une source d'énergie renouvelable ou non renouvelable.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est privilégiée lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire. L'intérêt de cette méthode réside dans les avantages considérables qu'elle offre à l'environnement, à condition que l'électricité utilisée soit d'origine renouvelable. En utilisant de l'électricité provenant de sources telles que le photovoltaïque, l'éolien, la biomasse ou l'hydraulique, l'hydrogène produit est exempt d'émissions, constituant ainsi une source d'énergie propre et sans émission.

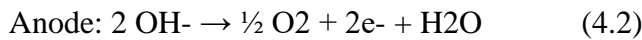
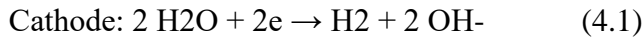
Le principe de la réaction d'électrolyse de l'eau est simple : les atomes des molécules d'eau sont dissociés pour former deux gaz simples, à savoir l'hydrogène (H_2) et l'oxygène (O_2).[1]

4.3. Types d'électrolyseurs

Il existe trois types d'électrolyseur d'eau classés selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement :

4.3.1 Électrolyseurs Alcalins

L'électrolyseur alcalin en utilisant un électrolyte alcalin sous forme liquide, où l'eau contenue dans cet électrolyte se sépare en ions hydrogène et hydroxyde au niveau du pôle cathodique. Ces ions sont ensuite acheminés à travers une membrane, où ils subissent une oxydation tant dans l'eau que dans l'eau anodisée. La réaction chimique se déroule simultanément au niveau de la cathode et de l'anode :



Pour amorcer cette réaction, environ 285 kJ/mol d'énergie renouvelable sont nécessaires (environ 50 KJ/mol de chaleur et 235 kJ/mol d'électricité renouvelable par mole d'eau). La température optimale de l'électrolyse se situe entre 40 et 90 °C. Les électrolyseurs utilisant une solution alcaline liquide d'hydroxyde de sodium ou de potassium comme électrolyte ont une longue histoire d'utilisation et ont prouvé leur efficacité dans la production d'hydrogène.[2]

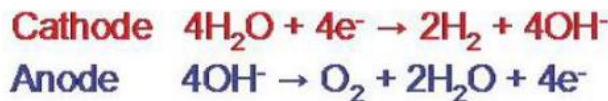
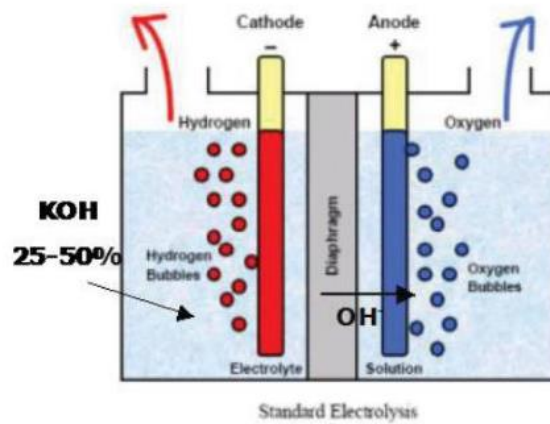


Figure 4.1 : principe de fonctionnement d'électrolyseur Alcalins.

4.3.2 Électrolyseurs de l'eau à haute température (HTE)

Electrolyse de l'eau à haute température L'électrolyse de l'eau à haute température ou EHT (entre 700 et 1000°C) est une technique similaire à l'électrolyse alcaline, mais qu'elle utilise de la vapeur d'eau au lieu de l'eau liquide. La vapeur d'eau est dissociée à la cathode ou à l'anode selon la nature de l'électrolyte (figure 4.2).

Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites dans le tableau 1 :

Tableau 4.1 : Réactions mises en jeu pour un HTE.

Réaction	Electrolyte	
	à conduction d'ions oxydes	à conduction protonique
Cathode	$\text{H}_2\text{O} (\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}^{2-}$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g})$
Anode	$\text{O}^{2-} \rightarrow 1/2\text{O}_2 (\text{g}) + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O} (\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 (\text{g}) + 4\text{e}^-$
Globale	$\text{H}_2\text{O} (\text{g}) \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + 1/2\text{O}_2$	

Dans le premier cas une réduction de la vapeur d'eau, format ion de H2 et d'O2-, est générée par la différence de potentiel entre les électrodes, le surplus de la vapeur d'eau et l'hydrogène seront évacués. Sous l'effet du champ électrique les anions O2- qui passent de la cathode à

l'anode seront oxydés en O_2 et évacués. Afin de faciliter l'évacuation de l'oxygène, un gaz de balayage (air, azote ou vapeur d'eau), est parfois utilisé.

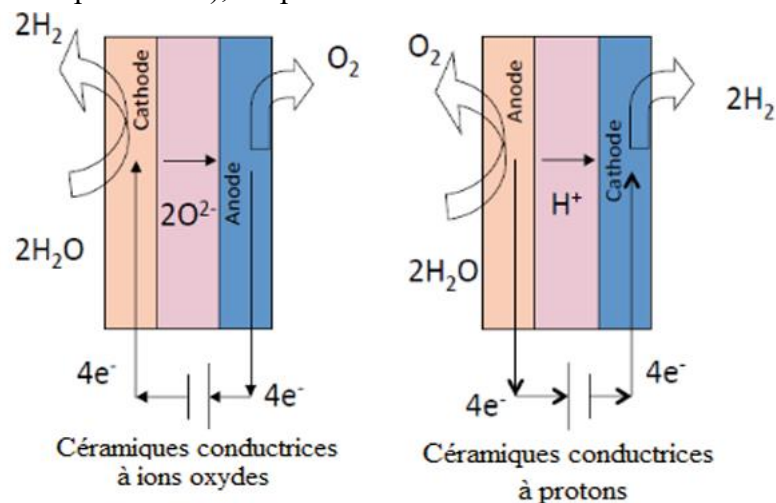
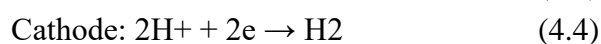
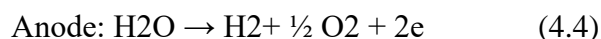


Figure 4.2 : Principe de HTE selon le type d'électrolyte

L'EHT présente un avantage énergétique puisque d'un point de vue thermodynamique, l'énergie nécessaire à la décomposition de l'eau est apportée à la fois par l'électricité et la chaleur, moins chère que l'électricité seule, et d'un point de vue cinétique, les pertes ohmiques, qui sont principalement liées à des phénomènes de surtension, diminuent quand la température augmente. La quantité d'énergie totale nécessaire pour la décomposition de la molécule d'eau en phase liquide est environ 16 MJ/Kg H_2O , cette énergie diminue jusqu'à 13.5 MJ/Kg H_2O en phase vapeur. L'énergie électrique nécessaire pour la dissociation de l'eau diminue avec l'augmentation de la température, le rapport $\Delta G/\Delta H$ est de 93% à 100°C et 70% à 1000°C, ce qui est expliqué par la diminution du besoin en énergie électrique avec l'augmentation de la température. Par conséquent, à des températures plus élevées, une grande partie de l'énergie peut être fournie sous forme de chaleur.[3]

4.3.3 Électrolyseurs PEM

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



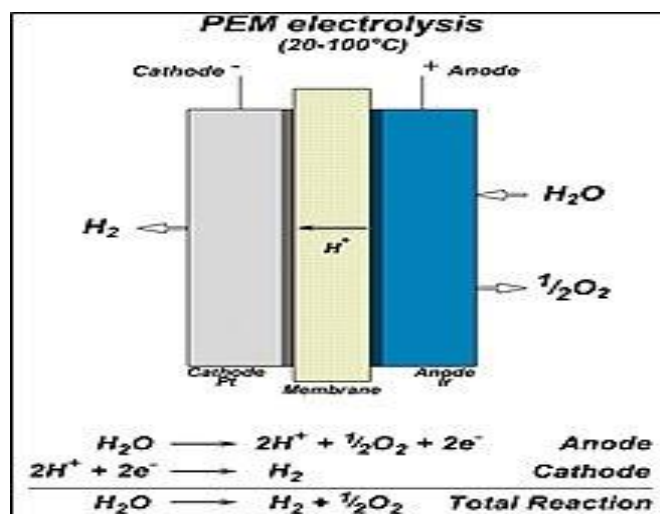


Figure 4.3 : principe de fonctionnement d'électrolyseur PEM.

4.4 Comparaison entre Electrolyseurs Alcalins, PEM et HTE

Les électrolyseurs alcalins, PEM et à haute température (HTE) sont trois technologies différentes utilisées pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients en termes de structure, d'échelle de production, de prix, de fiabilité et de sécurité.

Tableau 4.2 : Comparaison des technologies alcalins, PEM et à haute température. [4][5]

Critère	Électrolyseurs alcalins	Électrolyseurs PEM	Électrolyseurs (HTE)
Structure	<ul style="list-style-type: none"> - Densité de courant faible (< 0,4 A/cm²) - Structure peu compacte - Production de masse plus compliquée à mettre en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> - Densité de courant élevée (1 à 2 A/cm²) - Structure compacte - Production de masse facilitée 	<ul style="list-style-type: none"> - Électrolyte en céramique conducteur à haute température (600-1100°C) - Encore au stade de la recherche
Prix	<ul style="list-style-type: none"> - Coût total de production d'H₂ avec alimentation électrique, contrôle et séchage : environ 930 \$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût total de production d'H₂ avec alimentation électrique, contrôle et séchage : environ 1570 \$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de données disponibles
Fiabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation commerciale à grande échelle éprouvée 	<ul style="list-style-type: none"> - Haute fiabilité dans le temps prouvée (utilisation spatiale et sous-marine) 	<ul style="list-style-type: none"> - Défis en termes de durée de vie liée à la fragilité des céramiques,

	-Robustesse prouvée		notamment en cas d'utilisations intermittentes sans système de maintien en température
Sécurité	-Contamination potentielle des tuyauteries par le KOH - Installations de purge d'azote et antidéflagrantes peuvent être exigées	- Contamination potentielle des tuyauteries par l'hydrogène - Systèmes de contrôle spécifiques et d'énergie de secours exigés pour éviter un mélange catastrophique d'H2 et d'O2	- Risques liés à la fragilité des céramiques à haute température

4.5. Modèles utilisant l'électrolyseurs PEM

4.5.1 Modèle thermique

La plupart des modèles proposés sont adaptés pour l'électrolyse PEM. Nous avons utilisé un modèle qui se base sur le bilan énergétique total d'un électrolyseur et qui s'exprime par l'équation [6] :

$$Ct \times dT = Q_{th} - Q_{loss} - Q_{eau} dt \quad (4.6)$$

Avec

Q_{th} : Puissance thermique dégagée par la réaction, (W)

$$Q_{th} = N_s \times (U_{cell} - U_{th}) \times I \quad (4.7)$$

Q_{loss} : Flux échangé avec l'extérieur, (W)

$$Q_{loss} = 1 R_t \times (T - T_a) \quad (4.8)$$

Q_{eau} : Flux échangé avec l'eau d'alimentation, (W)

$$Q_{eau} = h_e \times (T - T_{eau}) \quad (4.9)$$

Où

T (K) : Température de l'électrolyse.

T_a (°C) : Température ambiante.

T_{eau} (°C) : Température de l'eau.

N_s : Nombre des cellules.

U_{cell} (V) : Tension d'une cellule.

U_{th} (V) : Tension thermo neutre d'une cellule.

I (A) : Intensité.

R_t : Résistance thermique.

h_e : Coefficient d'échange .

Calcul de la température avec le modèle thermique statique :

$$T = T_{ini} + \Delta t C_t \times (Q_{th} - Q_{loss} - Q_{eau}) \quad (4.10)$$

T_{ini} : Température initiale (K),

C_t : Capacité thermique de l'appareil,

Δt : Intervalle de temps (s).

4.5.2 Modèle thermodynamique

Ce modèle sert à calculer deux variables :

La tension de décomposition réversible U_{rev} , définie par l'équation de Nernst, est exprimée sous la forme [7] :

$$U_{rev} = U_0 + \frac{R.T}{2.F} \times \ln \frac{P_{H2O}.P_{O2}^{1/2}}{P_{H2O}} \quad (4.11)$$

Lorsque :

R: Constante molaire des gaz (8,314 4 J.mol⁻¹.K⁻¹).

T (K): Température de la cellule.

F: Constante de Faraday (96 487 °C.mol⁻¹).

U₀ (V): Tension de décomposition réversible dans les conditions normales (25°C, Pression atmosphérique).

PH₂, PO₂ et PH₂O (Pa): Pressions de fonctionnement de l'électrolyseur.

Un accroissement de la température entraîne une diminution d'UREV qui se répercute alors aux ornes de l'électrolyseur.

Cette tension de décomposition réversible s'établit à , 9 V dans les conditions Normales.

Le fonctionnement irréversible des électrolyseurs industriels a pour effet de réduire la tension effective de cellule à densité de courant et température constantes lorsque la pression augmente. On définit également la tension thermo-neutre qui correspond à un Fonctionnement isotherme d'un électrolyseur par:

$$U_{th} = \frac{\Delta H}{\nu_e.F} \quad (4.12)$$

Quand :

F : Constante de Faraday (96 487 °C.mol⁻¹)

ν_e: Coefficient stœchiométrique

ΔH : Enthalpie de réaction

$$\Delta H = \Delta H_{H2} + 0.5 \times \Delta H_{O2} - \Delta H_{H2O} \quad (4.13)$$

4.5.3 Modèle électrochimique

La tension de cellule d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes [5]:

$$U_c = U_{rev} + \eta_a - \eta_c + R_{SPE} \quad (4.14)$$

Quand:

η_a: Surtension anodique (V).

η_c: Surtension cathodique (V).

R_{SPE}: Résistance globale (cm 2Ω).

4.6 Modélisation d'électrolyseur

L'électrolyseur d'eau est composé de plusieurs cellules d'électrolyse connectées en série et en parallèle. Le modèle d'électrolyseur considéré ici est basé sur les caractéristiques des cellules individuelles. Le calcul de la tension de fonctionnement requise, ainsi que des débits d'hydrogène et d'oxygène, est effectué sur une base par cellule. Les valeurs correspondantes pour l'ensemble de l'unité d'électrolyse sont simplement obtenues en multipliant par le nombre de cellules en série et en parallèle. Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur sont représentées ci-dessous :

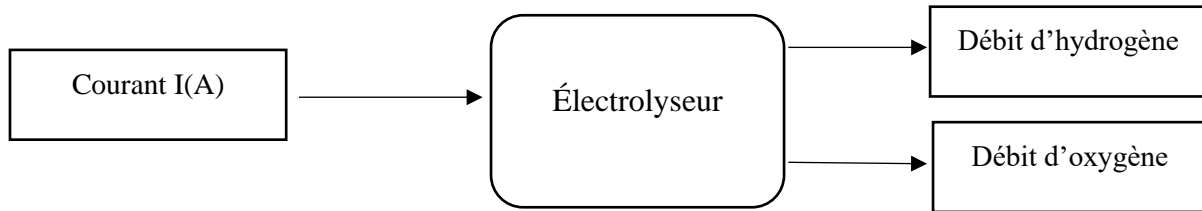


Figure 4.4 : Les entrées et sorties principales d'un électrolyseur.

4.6.1 La tension de cellule d'un électrolyseur

La tension de cellule d'activation est la suivante

$$U_{el} = U_{th} + U_{anode} + U_{cathode} + U_{ohm} \quad (4.15)$$

U_{th} : Tension théorique

U_{anode} : Surtension anodique

$U_{cathode}$: Surtension cathodique

U_{ohm} : Chute de tension dans la résistance interne d'électrolyseur R_{el}

4.6.2 Volume de production d'hydrogène

En utilisant la loi des gaz parfaits, le volume de gaz produit est calculé par l'équation suivante :

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{ItRT}{zFP} = Q \times t \quad (4.16)$$

Et :

$$n = \frac{I \times t}{z \times F} \quad (4.17)$$

V : volume d'hydrogène produit (l)

R : Constante des gaz parfaits $\approx 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

t : Temps correspondant à la production de volume $V = \text{Variable}$ (10 heures)

T : La température absolue C

P : Pression atmosphérique = 0.1013 bar

Z : Nombre d'électron requis pour libérer une molécule $N_{cellules} = 2$

F : Constante de Faraday = 96500

n : La quantité de matière (mol)

4.6.3 Débit de production d'hydrogène

$$Q = \frac{N_{cellules} \times R \times I_f \times T}{z \times F \times P} \quad (4.18)$$

$$Q = N_{cellules} \times \frac{V}{t} \quad (4.19)$$

Q: Débit de production d'hydrogène (l/s)

T: Température de l'électrolyte = 25°C

I_f: Le courant de fonctionnement d'électrolyseur = Variable

Z: Nombre d'électron requis pour libérer une molécule $N_{cellules} = 2$

F: Constante de Faraday = 96500

$N_{cellule} = 90$

4.6.4 Le rendement d'électrolyseur

Le rendement d'électrolyseur est donné par l'équation suivante:

$$\eta_{el} = \frac{1.23 \times S}{V_f} \quad (4.20)$$

V_f: La tension du point de fonctionnement.

S: Nombre de cellules série

4.7 Données pour une journée typique

Pour étudier fonctionnement du générateur PV, nous allons prendre les valeurs approximatives de l'éclairement en basant sur le tableau (4.3) et nous les avons variés'. On a utilisé les données trouvées à Chlef pour la journée 02/06/2024.

Tableau 4.3 : Les éclairements et les températures de la journée du 02/06/2024 à Chlef. [8]

Heure	6 :00	7 :00	8 :00	9 :00	10 :00	11 :00	12 :00
E(w/m2)	25	147	351	565	736	864	943
T(°C)	18	20	21	22°	25°	27°	29
Heure	13 :00	14:00	15 :00	16 :00	17 :00	18 :00	19 :00
E(w/m2)	949	916	839	699	526	319	117
T(°C)	32	32°	31°	31°	30	29	27

D'après le tableau (4.3) la variation d'éclairement et température est passée par deux étapes:

[6h00 à 13h00] :L'éclairement et température augmente jusqu'à (949 W/m2) (32°C) parce que dans cet intervalle on a un rayonnement direct appliqué sur les panneaux.

[13h00à19h00] :L'abaissement d'éclairement jusqu'à environ (117 W/m²) et la température à (27°C) car la diminution d'angle inclinaison du rayonnement solaire.

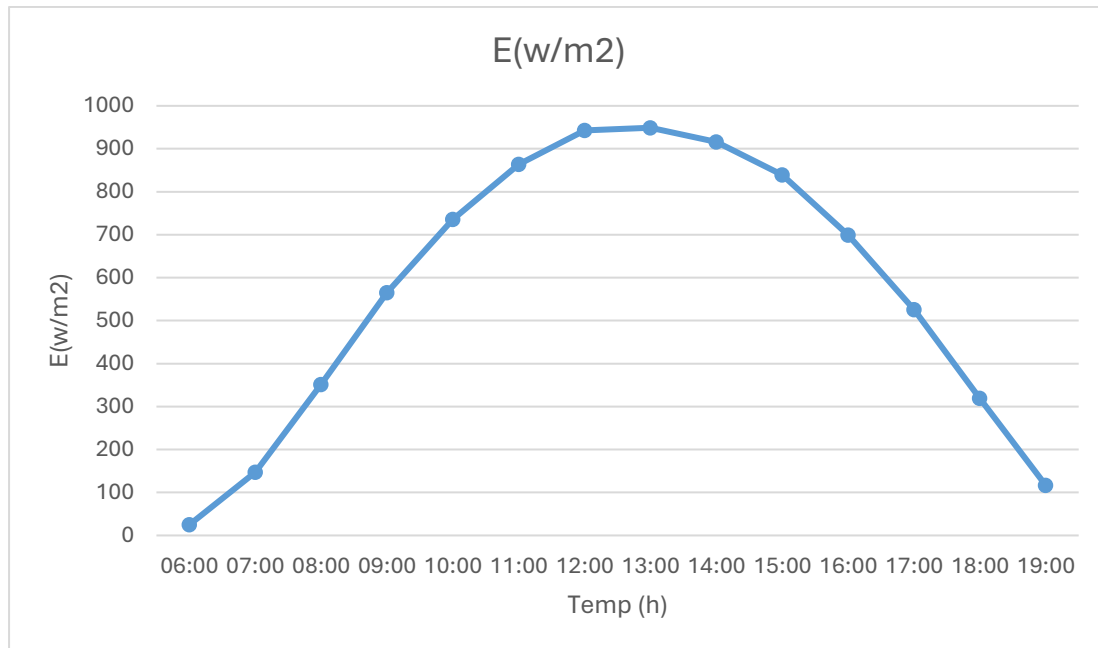


Figure 4.5 : Variation d'éclairement en fonction de temps .

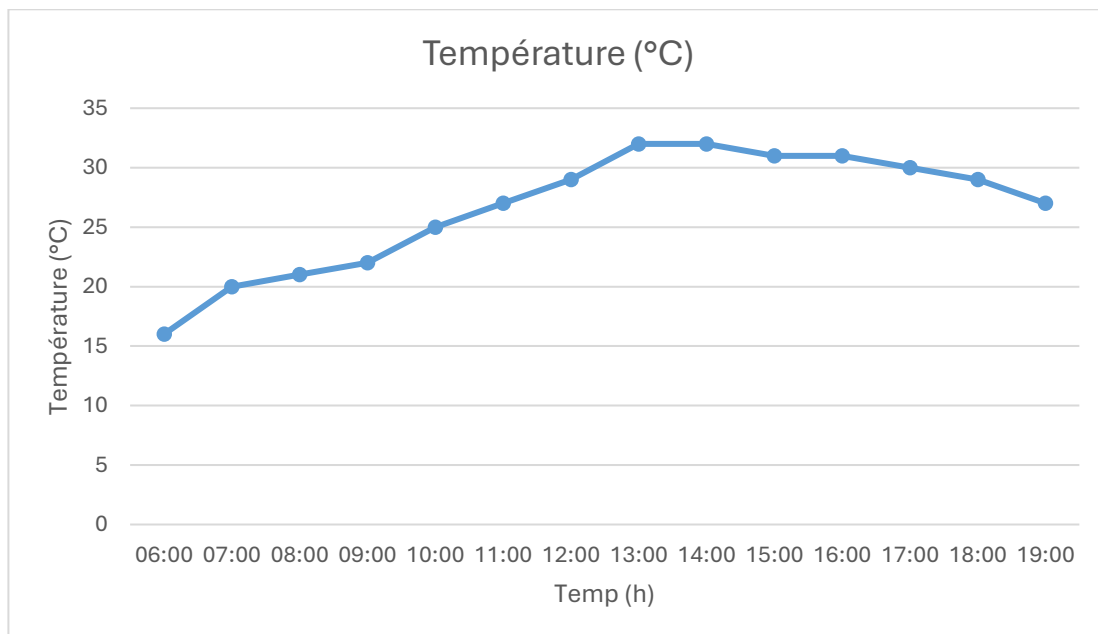


Figure 4.6 : Variation d'éclairement en fonction de temps.

4.8 Modèle de électrolyseurs PEM

Pour notre étude, nous avons choisi un électrolyseur de type PEM. À partir des graphes expérimentaux obtenus à différentes températures, nous avons sélectionné le graphe correspondant à une température de 80 °C et déterminé les points (I-V), qui sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 4.4 : Données expérimentaux d'électrolyseur extrait des caractéristiques (I-V).

Température = 80 °C	
Courant (A)	Tension (V)
0.14286	1.6857143
0.28571	1.7333333
0.42857	1.762069
0.5714	1.7896552
0.85714	1.8275862
1.000	1.85
1.2857143	1.8733333
1.7142857	1.9066667
2.000	1.9333333
2.5714286	1.9733333
3.000	2.0071429
4.000	2.0821429
5.000	2.15

Selon la loi de Tafel, la tension de cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par l'équation suivante :

$$V_e = a + (b \times \log(I)) + c \times I \quad (4.21)$$

Les paramètres a, b et c dépendent des caractéristiques spécifiques d'une cellule d'électrolyseur, telles que la géométrie, la membrane, l'écoulement, les matériaux, la température et la pression. Pour déterminer les facteurs a, b et c, nous choisissons trois points à partir du graphe de notre électrolyseur à T=80 °C, et nous remplaçons les valeurs de courant et de tension de ces points dans l'équation de Tafel. Nous obtenons donc le système d'équations suivant :

$$1.6857143 = a + b \times \log\left(\frac{1}{7}\right) + c \times \left(\frac{1}{7}\right) \quad (4.22)$$

$$1.85 = a + b \times \log(1) + c \times (1) \quad (4.23)$$

$$2.15 = a + b \times \log(5) + c \times (5) \quad (4.24)$$

La résolution de ce système d'équations donne les trois facteurs :

$$\begin{cases} a = 1.8018 \\ b = 0.0632 \\ c = 0.0482 \end{cases}$$

Finalement le modèle de cellule d'électrolyse s'écrit comme suit :

$$V = 1.8018 + 0.0632 \times \log(I) + 0.0482 \times I \quad (3.25)$$

Ces équations, modélisées sous Matlab SIMULINK 2022 et présentées sur la (figure 4.5) donnent le modèle d'un électrolyseur utilisé :

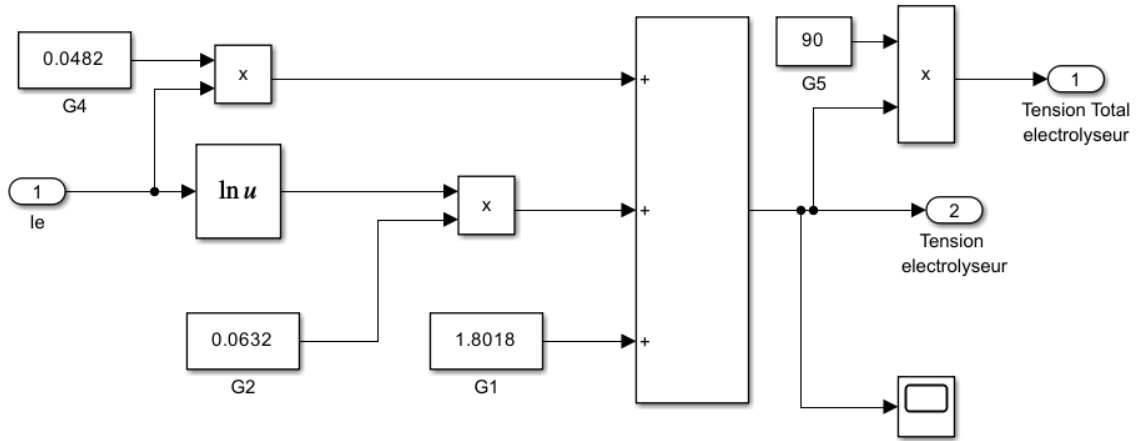


Figure 4.7 : Modélisation d'un électrolyseur.

- **Courbe (I-V) d'électrolyseur**

Le courant augmente de manière croissante en fonction de la tension, suivant une forme parabolique, et il est divisé en deux parties : non linéaire et linéaire. On observe que lorsque le courant et la tension sont faibles, la relation est non linéaire. Quand, à des valeurs élevées de tension, le courant devient très élevé et le changement devient linéaire.

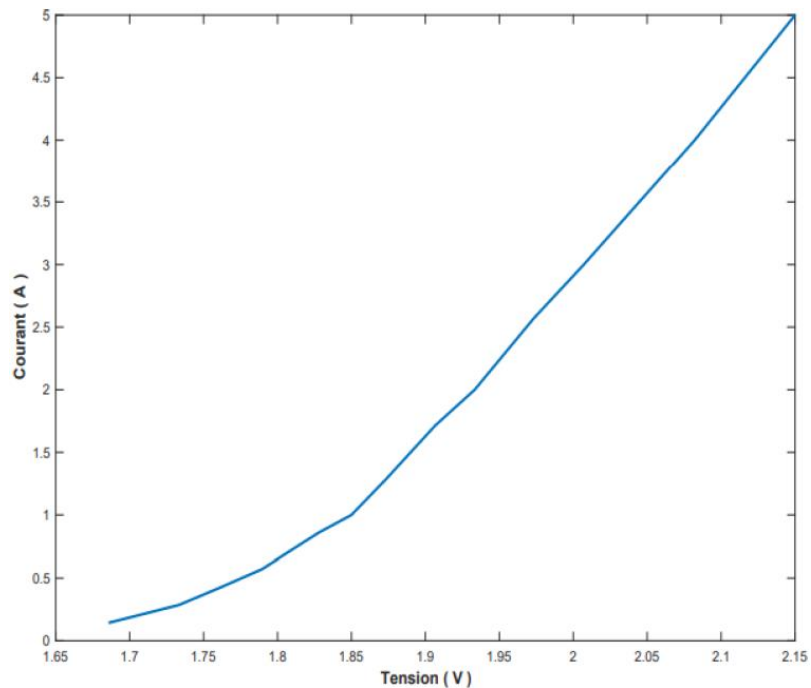


Figure 4.8 : Le courbe (I-V) d'électrolyseur expérimentale pour $T_{el} = 80^{\circ}C$.

- **Courbe variation de courant d'électrolyseur en fonction de temps**

La variation du courant entrant dans l'électrolyseur en fonction du temps passe par deux étapes:

[6h00 à 14h00] : Le courant augmente jusqu'à son maximum, car pendant cet intervalle, l'angle d'inclinaison du rayonnement solaire augmente.

[14h00 à 19h00] : Le courant diminue, car pendant cet intervalle, l'angle d'inclinaison du rayonnement solaire diminue.

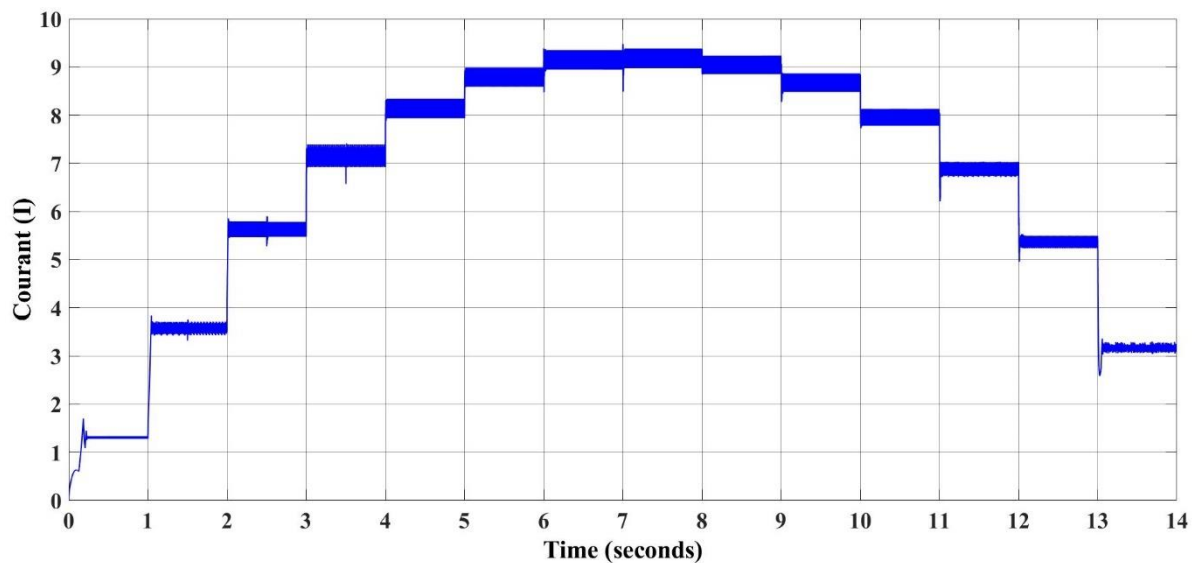


Figure 4.9 : Variation de courant d'électrolyseur en fonction de temps (avec $1=3600s$).

- **Courbe variation de tension d'électrolyseur en fonction de temps**

La variation de la tension entrant dans l'électrolyseur en fonction du temps passe par deux étapes:

[6h00 à 14h00] : La tension augmente jusqu'à un maximum en raison de l'augmentation de l'angle d'inclinaison du rayonnement solaire pendant cet intervalle.

[14h00 à 19h00] : La tension diminue en raison de la diminution de l'angle d'inclinaison du rayonnement solaire pendant cet intervalle.

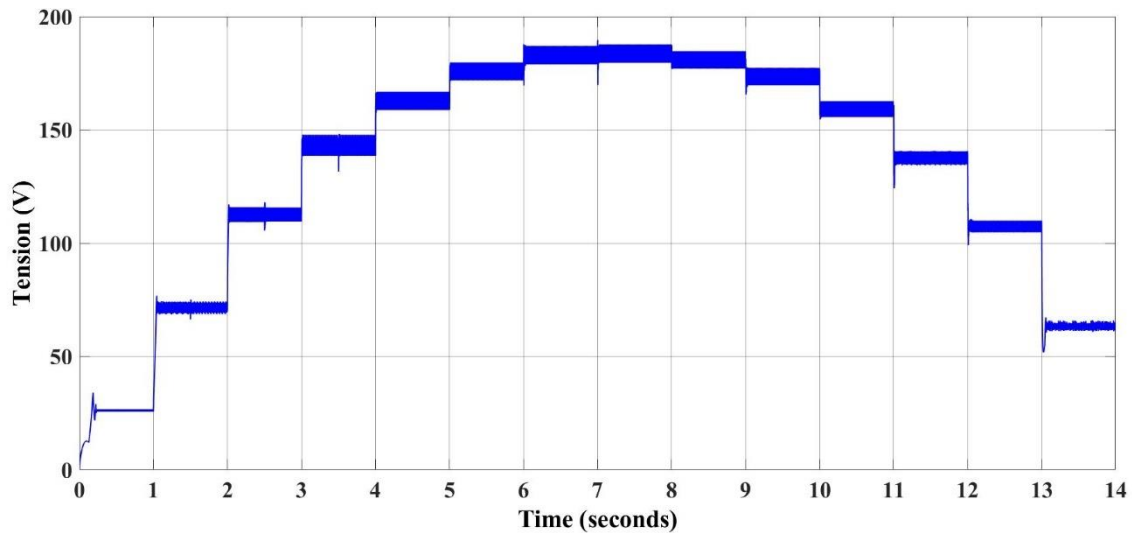


Figure 4.10 : Variation de tension d'électrolyseur en fonction de temps (avec 1=3600s).

4.9 Modèle de système de couplage GPV et électrolyseur

L'électrolyseur fonctionne à puissance maximale grâce à l'énergie renouvelable (solaire ou éolienne). Dans notre système, la source d'énergie est le générateur photovoltaïque (PV). Pour étudier notre système (générateur PV-électrolyseur), nous avons couplé les deux composants. Le système complet a été modélisé à l'aide du programme Matlab Simulink 2023 :

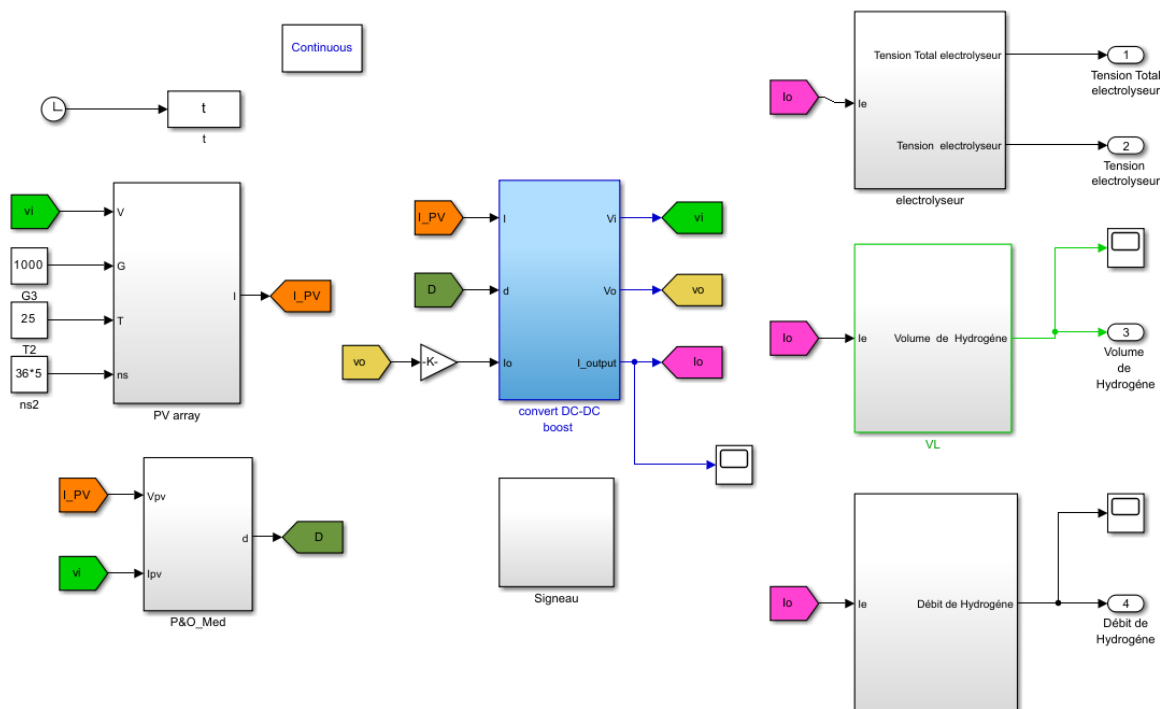


Figure 4.11 : Système de couplage GPV et électrolyseur sur Matlab Simulink.

- **Courbe de volume d'hydrogène**

La variation de volume d'hydrogène obtenu est passée par deux étapes :

[6h00 à 14h00] : On remarque une augmentation du volume jusqu'à sa valeur maximale de 3,1 ml à la mi-journée, conformément aux relations 4.17 et 4.16. Ainsi, lorsque le courant de l'électrolyseur augmente, le volume d'hydrogène augmente également.

[14h00 à 19h00] : On remarque que le volume diminue à environ 1,1 ml en raison de la diminution du courant de l'électrolyseur.

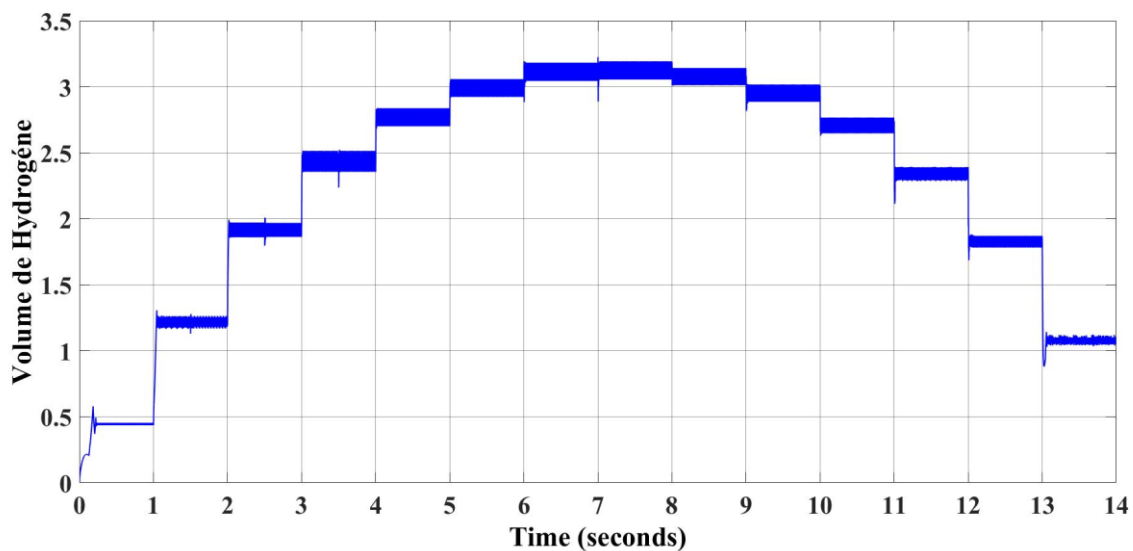


Figure 4.12 : Evolution de volume en fonction de temps (avec 1=3600s).

- **Courbe de débit d'hydrogène**

L'évolution du débit en fonction du temps, deux étapes sont observées :

[6h00 à 14h00] : on remarque une augmentation du débit jusqu'à sa valeur maximale de 8,5 l/h à la mi-journée, en raison de l'augmentation du courant de l'électrolyseur. Ainsi, lorsque le courant de l'électrolyseur augmente, le débit augmente également.

[14h00 à 19h00] : on remarque une diminution du débit à environ 3 ml/h, due à la diminution du courant de l'électrolyseur.

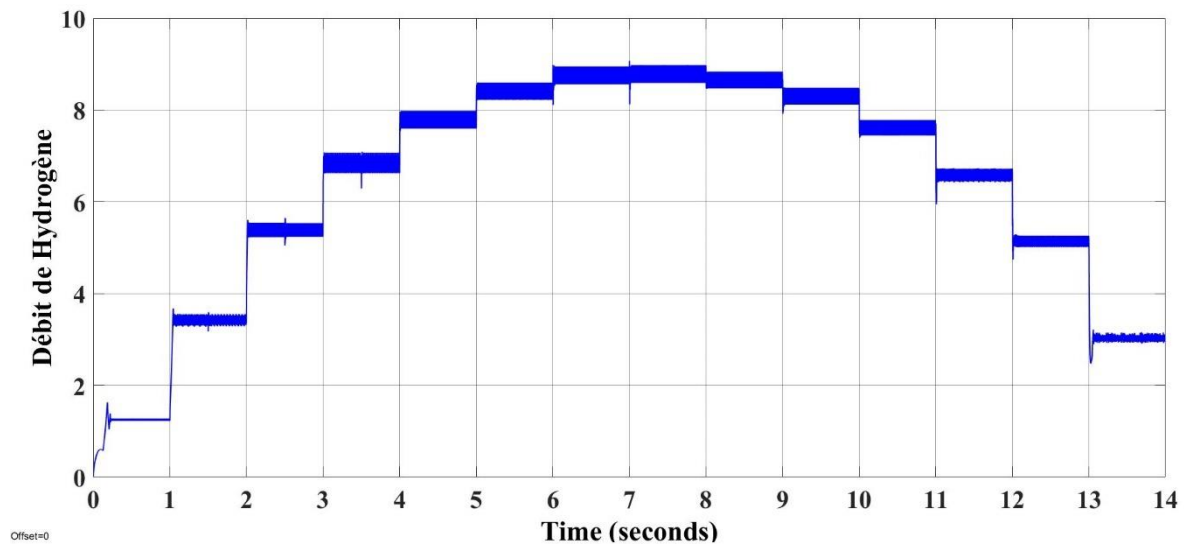


Figure 4.13 : Evolution de débit en fonction de temps (avec $1=3600s$).

4.10 Résultats et analyse de simulation

Nous avons exécuté notre système sous MATLAB. Les résultats de simulation montrent un volume total produit de 0,35 litres à un débit de 0,09 m³/s. Les résultats obtenus indiquent que le débit d'hydrogène et son volume sont directement liés au courant, et donc à l'éclairement et à la température.

4.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié électrolyseur, ses différents types et le principe de fonctionnement avec les modèles d'électrolyseurs PEM

Enfin, on a simulé l'électrolyseur PEM et branché le GPV avec autre systèmes pour un meilleur résultat de courant. On a réalisé-il d'après loi de Tafel avec des différentes valeurs de températures et éclairagements et faire notre mesure pour calculer le volume et le débit d'hydrogène selon ce branchement.

CHAPITRE 05
PANNEAUX
PHOTOVOLTAIQUE

5. Panneau photovoltaïque

5.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est générée par la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique, reposant sur l'effet photovoltaïque, un phénomène physique se produisant lorsque la surface d'une cellule photovoltaïque est exposée à la lumière, générant ainsi une force électromotrice. La tension produite peut varier en fonction du matériau utilisé pour fabriquer la cellule. En associant plusieurs cellules photovoltaïques, on obtient un générateur photovoltaïque présentant une caractéristique courant-tension non linéaire, avec un point de puissance maximale. Cependant, l'emplacement des modules photovoltaïques (PV) est parfois dicté par l'environnement, ce qui peut entraîner des ombrages partiels et des cellules polarisées en inverse, provoquant des points chauds et des dommages. En tenant compte des effets d'ombrage qui peuvent grandement réduire leurs performances, ce chapitre étudie le principe de fonctionnement et la composition d'un PV, les déséquilibres au sein des modules PV et les comportements des cellules sous ombrage, tout en évaluant l'impact sur la puissance. Les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) sont relevées en conditions standard de test (STC) pour différents scénarios d'ombrage afin de déterminer les pertes de puissance et le rôle des diodes by-pass. Une étude comparative par rapport à la simulation de l'effet d'ombrage sur un module PV par le logiciel Matlab Simulink a été menée avec différentes configurations.

5.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable. C'est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la terre. Elle est également une source d'énergie intermittente (pas d'énergie solaire la nuit).[1]

5.2.1 Soleil

Le soleil, une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre, possède un diamètre de 1 399 000 kilomètres, soit plus de 100 fois celui de notre planète. Principalement composé d'hydrogène et d'hélium, il exerce une influence majeure sur notre système solaire. La Terre orbite autour du soleil dans un mouvement connu sous le nom de "plan de l'écliptique", tandis qu'elle tourne également sur elle-même selon un axe incliné d'environ 23,27 degrés par rapport à ce plan.

5.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau. L'énergie émise par il est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela.[2]

- **Le rayonnement direct :**

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux.

- **Le rayonnement diffus :**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

- **Le rayonnement réfléchi :**

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure 5.1 suivante :

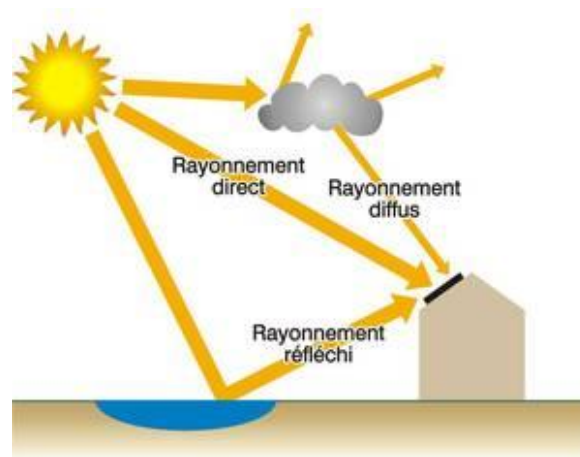


Figure 5.1 : Le rayonnement solaire. [3]

5.3 Gisement solaire

Le gisement solaire consiste en un ensemble de données qui détaille la variation du rayonnement solaire disponible sur une période donnée. Ces informations sont essentielles pour évaluer l'énergie captée par un système énergétique solaire, facilitant ainsi le dimensionnement précis en fonction des besoins à répondre.

5.3.1 Irradiation solaire Mondiale

L'irradiation solaire mondiale désigne la quantité totale d'énergie solaire reçue sur l'ensemble de la surface terrestre pendant une période donnée, habituellement mesurée en kilowatts par mètre carré (kW/m^2) ou en mégajoules par mètre carré (MJ/m^2). Cette énergie provient du rayonnement solaire, qui est la principale source d'énergie pour la Terre.

L'irradiation solaire mondiale varie selon plusieurs facteurs, tels que la latitude, l'heure de la journée, les conditions météorologiques, la saison et la présence d'obstacles comme les nuages ou les montagnes. Les régions situées près de l'équateur reçoivent généralement une irradiation solaire plus élevée en raison de l'angle plus direct du rayonnement solaire. Par exemple, l'Afrique, traversée par l'équateur, bénéficie en moyenne de plus de 325 jours d'ensoleillement intense par an, avec une réception quotidienne moyenne de plus de 6 kWh d'énergie par mètre carré.

L'Algérie est reconnue comme l'un des pays possédant un potentiel énergétique renouvelable parmi les plus riches au monde.

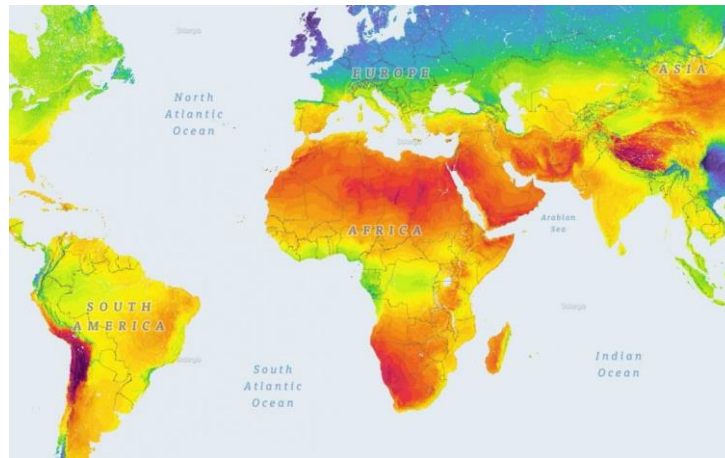


Figure 5.2 : L'irradiation solaire mondiale. [4]

5.3.2 Irradiation solaire en Algérie

L'Algérie bénéficie d'un fort potentiel en matière d'irradiation solaire en raison de son climat en grande partie désertique et semi-aride, avec une abondance de journées ensoleillées tout au long de l'année. Les régions du Sahara en particulier sont parmi les endroits les plus ensoleillés au monde.

Les données d'irradiation solaire en Algérie varient selon les régions, mais en général, le pays reçoit une irradiation solaire moyenne comprise entre 4,5 et 6,5 kWh/m² par jour. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays. Ces niveaux d'irradiation solaire sont favorables au développement de projets d'énergie solaire à grande échelle, tels que les centrales solaires photovoltaïques et les centrales solaires thermiques.[5]

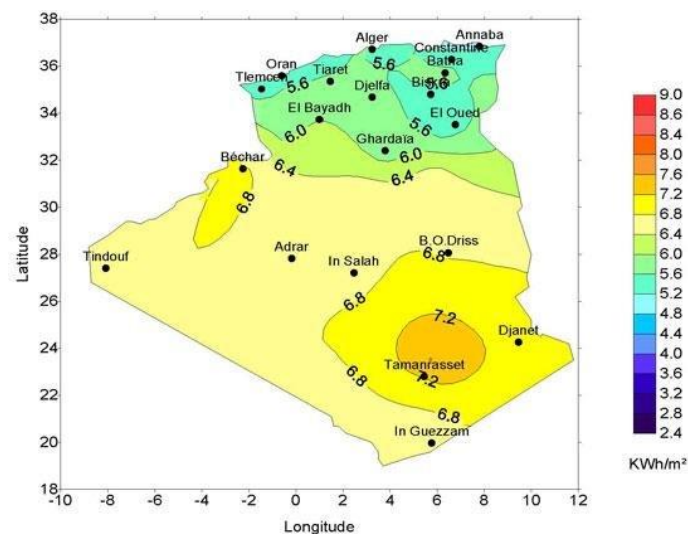


Figure 5.3 : Irradiation solaire en Algérie. [6]

5.3.3 Irradiation solaire à Chlef

Pour la ville de CHLEF, le mois le plus faible en énergie reçue est le mois de décembre, précisément le 21 décembre avec 3,6 KWh/m; et le mois où y a beaucoup d'énergie reçue est le mois de Juillet avec 6,804 KWh/m².

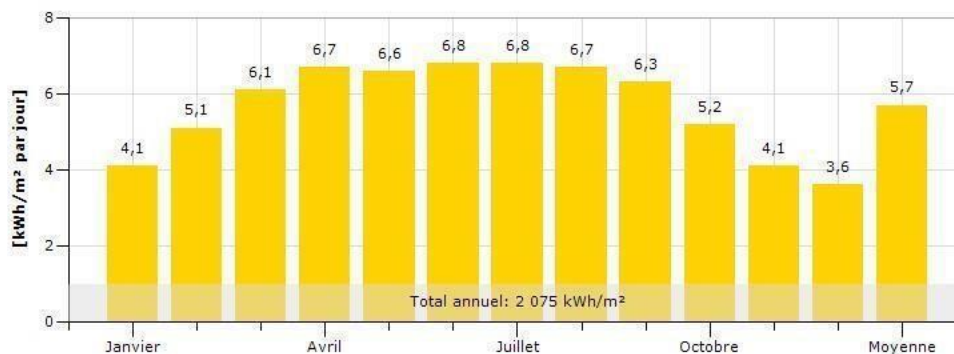


Figure 5.4 : Histogramme de l'énergie reçue en moyenne par mois.

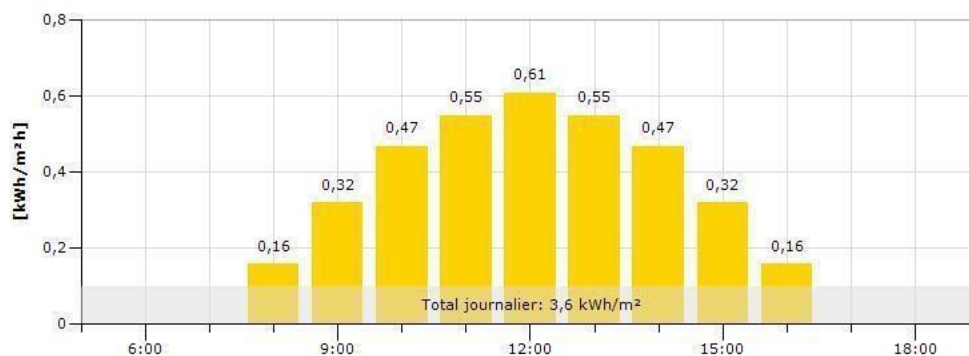


Figure 5.5 : Numéro de l'heure d'une journée de rayonnement pour le mois défavorable.

5.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semiconducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule.[7]

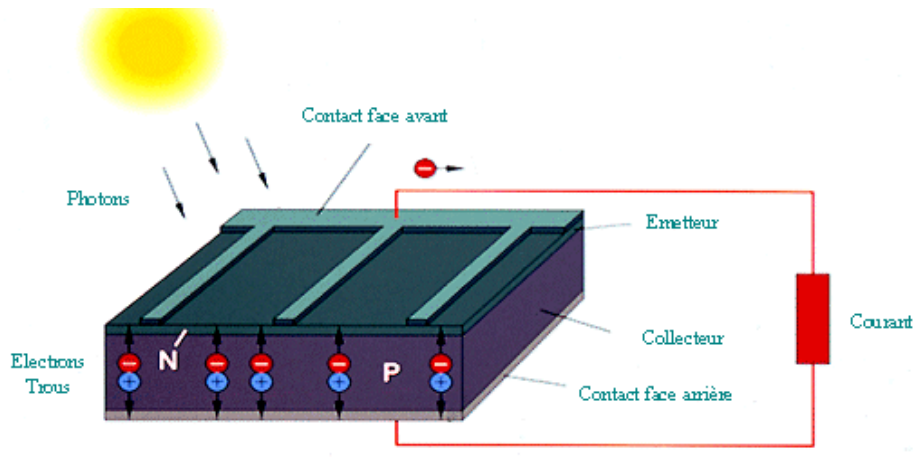


Figure 5.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire. [7]

5.5 Types des cellules photovoltaïques

Différents types de cellules solaires sont disponibles, chacun basé sur la structure microscopique particulière du silicium, à savoir :

5.5.1 Cellule en silicium monocristallin

La cellule en silicium monocristallin est un type de cellule photovoltaïque qui est considérée comme la meilleure dans la filière silicium. Elle se distingue par son rendement et sa durée de vie qui sont deux fois supérieurs à ceux du silicium amorphe. Le silicium monocristallin est obtenu directement d'un germe ou recristallisé à haute température sous forme d'un lingot, qui est ensuite découpé en fines tranches pour donner les cellules. Ces cellules sont généralement d'un bleu uniforme et ont un rendement élevé, allant jusqu'à 24%. Cependant, leur fabrication est plus délicate et coûteuse que celle des autres types de cellules solaires.[8]



Figure 5.7 : monocristallin. [8]

5.5.2 Cellule en silicium polycristallin

La cellule en silicium polycristallin est un type de cellule photovoltaïque qui est constituée de cristaux de silicium de 1mm à environ 2cm assemblés, appelés "grains". Elle a un aspect bleuté, mais pas uniforme, et on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Elle est

obtenue à partir de résidus de silicium fondus à l'intérieur d'un creuset pour créer un composé homogène, qui est ensuite refroidi pour obtenir un pain d'environ 150-200 kg. C'est ensuite découpé en plaquettes de même épaisseur que les plaquettes monocristallines. La cellule au silicium polycristallin a un bon rendement de conversion, allant jusqu'à 18%. [8]

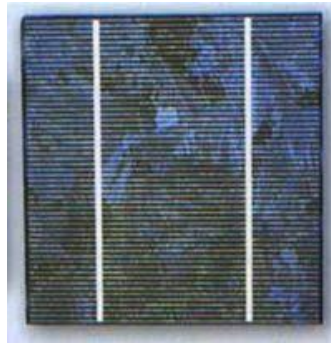


Figure 5.8 : polycristallin. [8]

5.5.3 Cellule en silicium amorph

La cellule solaire au silicium amorphe se distingue par une fine couche de silicium, bien plus mince que celle des cellules monocristallines ou polycristallines. Principalement utilisée pour alimenter des appareils de faible puissance tels que des montres solaires, des éclairages de jardin et des calculatrices solaires, elle présente divers avantages. En effet, sa fabrication est peu coûteuse et elle parvient à capter les rayons solaires même par temps nuageux. Cependant, son principal inconvénient réside dans son faible rendement, qui atteint au maximum environ 9 %. Pour être économiquement viable, il est nécessaire d'avoir une surface de panneau solaire considérable. De plus, ses performances ont tendance à diminuer au fil du temps. [8]

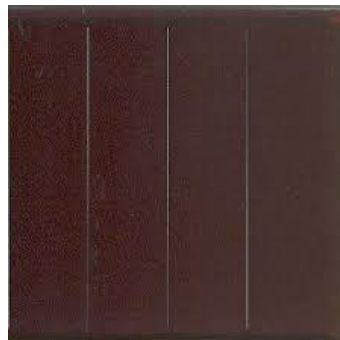


Figure 5.9 : amorph.

5.6 Association des modules photovoltaïque

Afin d'accroître la tension, le courant et la puissance d'un générateur photovoltaïque, il est possible de combiner plusieurs modules photovoltaïques en série, en parallèle ou une combinaison des deux (série/parallèle).

5.6.1 Association en série

L'association de cellules solaires en série consiste à connecter les bornes positives d'une cellule solaire à la borne négative de la cellule suivante, créant ainsi une chaîne de cellules solaires. Cette configuration permet d'augmenter la tension totale du système solaire. L'

association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

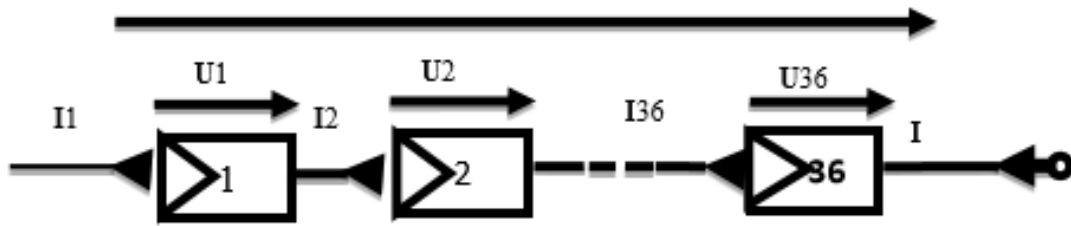


Figure 5.10 : Association en série des cellules PV.

5.6.2 Association en parallèle

L'association de cellules solaires en parallèle consiste à connecter les bornes positives de toutes les cellules solaires ensemble et de connecter les bornes négatives ensemble, créant ainsi une configuration parallèle. Cette configuration permet d'augmenter le courant total du système solaire, car les courants de chaque cellule s'additionnent. la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

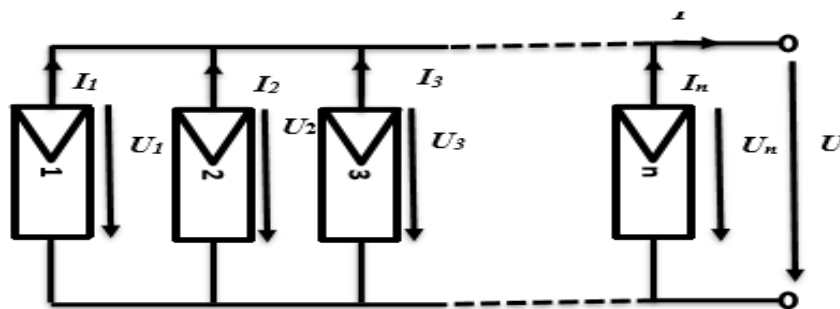


Figure 5.11 : Association en parallèle des cellules PV.

5.6.3 Association mixte (série/parallèle)

Pour obtenir à la fois un courant et une tension satisfaisants, il est nécessaire d'utiliser une combinaison mixte, c'est-à-dire série-parallèle.

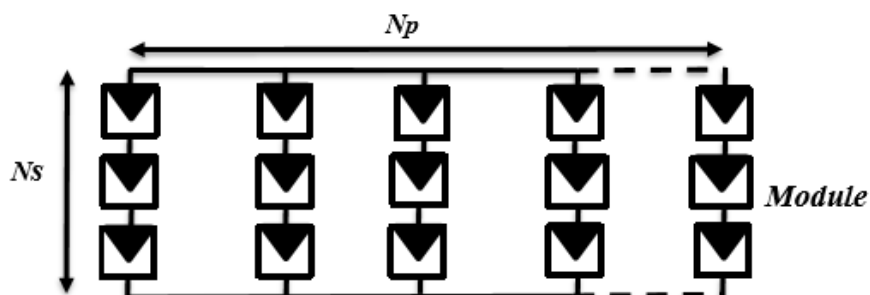


Figure 5.12 : Association mixte des cellules PV.

5.7 Compositions d'un panneau photovoltaïque

Un module photovoltaïque est formé de multiples cellules photovoltaïques connectées entre elles et enfermées dans un boîtier protecteur. Voici les principaux éléments constitutifs d'un module photovoltaïque :

- **Cellules photovoltaïques** : Les cellules photovoltaïques sont les unités de base du module. Elles sont habituellement fabriquées à partir de plaques de silicium dopées, traitées pour créer des couches p et n, formant ainsi une jonction p-n.
- **Connexions électriques** : Les cellules photovoltaïques sont reliées entre elles par des fils conducteurs, souvent en argent, qui relient les contacts métalliques des cellules. Ces connexions permettent de collecter le courant électrique produit par chaque cellule et de le diriger vers les bornes du module.
- **Encapsulation** : Les cellules photovoltaïques sont encapsulées pour les protéger contre les éléments extérieurs, comme l'humidité, les chocs et la corrosion. Généralement, les modules photovoltaïques sont encapsulés entre une feuille de verre trempé à l'avant et une feuille arrière en polymère, maintenues ensemble par un matériau d'encapsulation tel que l'EVA (éthylène-acétate de vinyle), assurant la stabilité des cellules.
- **Cadre** : Les modules photovoltaïques sont souvent encadrés dans de l'aluminium pour les renforcer et faciliter leur installation. Ce cadre offre une structure solide et protège les cellules des contraintes mécaniques.
- **Film de protection arrière** : À l'arrière du module, un film de protection supplémentaire peut être ajouté pour empêcher l'humidité et les contaminants de pénétrer. Ce film offre une isolation supplémentaire et protège le module des dommages.
- **Boîtier de jonction** : Le boîtier de jonction est un élément crucial du module photovoltaïque. Il abrite les connexions électriques entre les cellules et le câblage du module. De plus, il est équipé de diodes de contournement (bypass) pour éviter les pertes de rendement en cas d'ombrage partiel d'une ou plusieurs cellules.

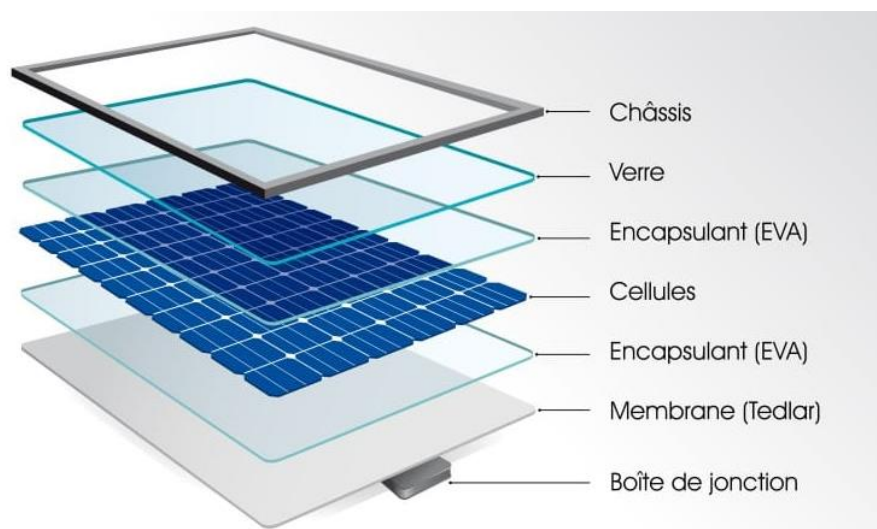


Figure 5.13 : Compositions d'un panneau photovoltaïque. [9]

5.8 Système photovoltaïque

Les composants d'un système photovoltaïque comprennent généralement un générateur photovoltaïque, des onduleurs solaires, des chargeurs de batteries, des panneaux solaires, des systèmes d'orientation ou de suivi, une gestion électronique, un stockage d'énergie, un convertisseur DC/AC, et une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard. Par le processus photovoltaïque, les panneaux solaires convertissent l'énergie solaire en courant continu (CC), qui peut être utilisé directement ou converti en courant alternatif (CA) par les onduleurs. L'excédent d'énergie produit par le système est stocké dans les batteries. Le régulateur contrôle la charge et la décharge des batteries, assurant ainsi la régulation entre la production, la consommation et le stockage.[10]

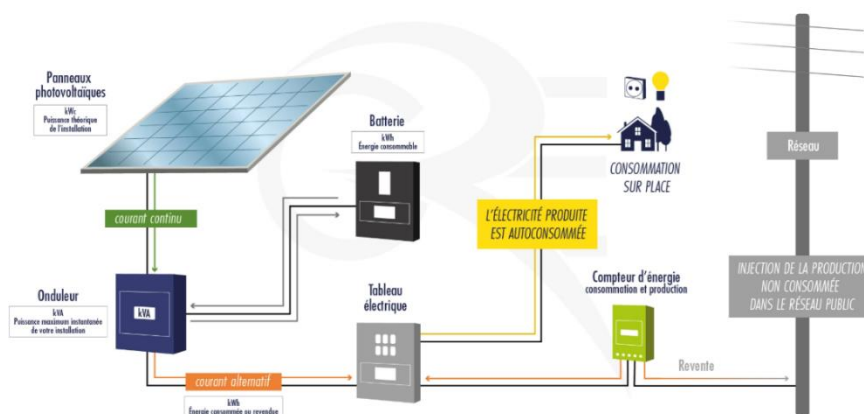


Figure 5.14 : Les constituants d'un système PV. [11]

5.9 Ombrage partiel

L'ombrage partiel se produit lorsque la moitié d'une cellule ou d'une rangée de cellules est affectée par l'ombre. Cet effet entraînera une réduction de la puissance proportionnelle au pourcentage de la surface ombrée. Lorsque les cellules photovoltaïques sont connectées en série, le courant circulant dans l'ensemble est limité par la cellule qui est la moins performante ou la moins exposée à la lumière. Ainsi, si une cellule reçoit moins de lumière que les autres, elle produira un courant plus faible, ce qui est appelé ombrage partiel. En raison de cet ombrage, la cellule recevant moins de lumière dissipera une partie de l'énergie produite par les autres cellules. Cela entraînera une diminution du courant produit par l'ensemble, ce qui est également appelé ombrage partiel.[12]

5.10 Effet de l'ombrage

Dans des conditions environnementales standards, le système photovoltaïque fonctionne à pleine puissance. Toutefois, lorsqu'il est exposé à des contraintes environnementales telles que l'ombrage partiel, ses performances peuvent diminuer. L'ombrage résulte d'une distribution inégale du rayonnement solaire sur la surface du générateur photovoltaïque, pouvant être causé par divers facteurs tels que des conditions atmosphériques (comme les nuages), des obstacles environnementaux (tels que des câbles, des branches) ou l'accumulation de poussière sur la surface du générateur. Cette ombre perturbe le fonctionnement normal du système photovoltaïque, car le module ombragé influe négativement sur les autres modules uniformément exposés à la lumière. Les problèmes résultants incluent une diminution du

rendement du système PV, la présence de pics locaux de puissance (miss-matching) et la formation de points chauds (hot spots). L'utilisation de diodes de dérivation permet de prévenir ces problèmes.[13]

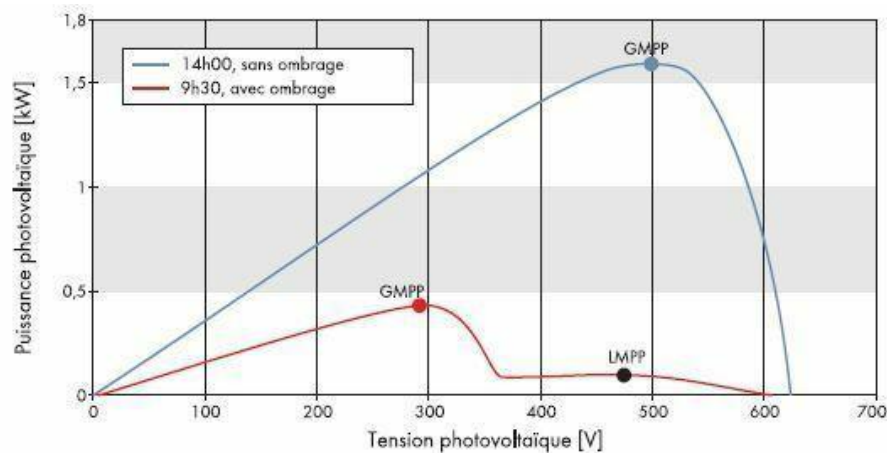


Figure 5.15 : La courbe caractéristique dans le cas d'un ombrage partiel. [14]

5.11 Système de protection

Pour assurer une longévité accrue des installations photovoltaïques destinées à produire de l'énergie électrique, il est nécessaire d'incorporer des dispositifs de protection électrique aux modules PV. Ces dispositifs sont essentiels pour prévenir les pannes potentiellement dévastatrices qui peuvent survenir en raison de la connexion des cellules en série et des modules en parallèle. Actuellement, deux types de protections conventionnelles sont couramment employés dans ces installations :

5.11.1 Diode By-pass

La diode by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules afin de protéger les cellules les moins performantes contre la polarisation inverse [15]. Les diodes by-pass sont capables d'isoler un sous-ensemble de cellules lorsque l'éclairement est inégal, ce qui prévient l'apparition de points chauds (hot spots) et la détérioration des cellules moins exposées à la lumière. Cependant, l'activation de ces diodes altère les caractéristiques de sortie du générateur en entraînant une perte partielle de la production d'énergie et la formation de pics locaux de puissance.[16]

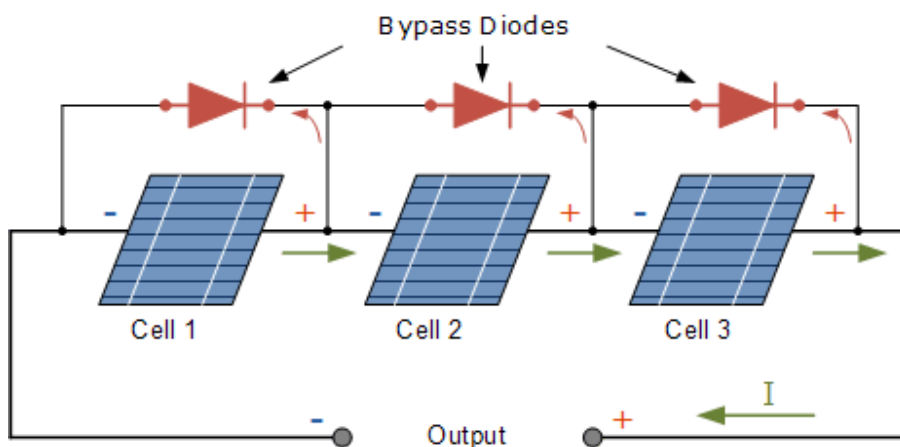


Figure 5.16 : Utilisation de la diode by-pass.

5.11.2 Diode anti-retour

La diode anti-retour empêche le courant négatif dans les générateurs photovoltaïques. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

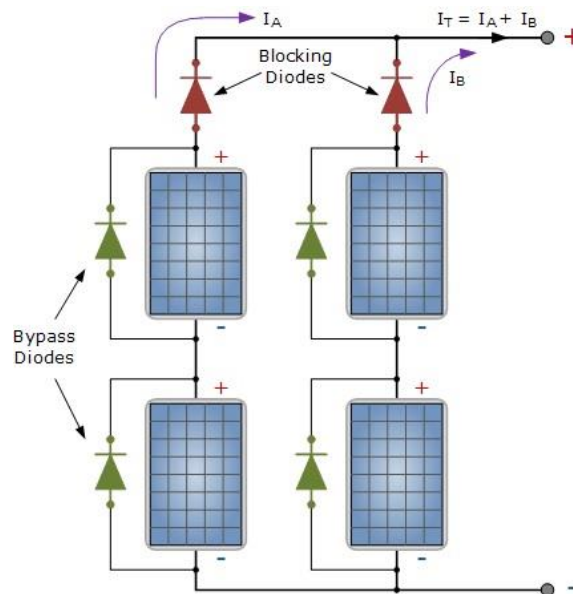


Figure 5.17 : Association sécurisée des modules PV en série parallèle.

5.12 Différents types de configurations des panneaux photovoltaïques

De nombreux chercheurs ont proposé des modèles pour étudier et analyser l'effet de l'ombrage sur différentes configurations de modules photovoltaïques afin de réduire les pertes par désadaptation et de trouver la configuration du système photovoltaïque qui offre les meilleures performances. Cette dernière repose sur l'interconnexion de la matrice des modules PV :

- La configuration Série (S)
- La configuration Parallèle (P)
- Série-Parallèle (SP)
- Total-Cross-Tied (TCT)
- Bridge-Linked (BL)
- Honey Comb (HC)

Plusieurs configurations ont été proposées comme le montre la figure (5.18). Il s'agit des configurations série (S), parallèle (P), série-parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL) et Honey Comb (HC). Les configurations série et parallèle sont les configurations de base. La configuration TCT est dérivée de la configuration SP. Dans la configuration BL, les modules sont connectés en mode pont redresseur, comme le montre la figure (5.18 e). On voit que quatre unités forment un pont. Ici, deux modules sont connectés dans le pont en série puis connectés en parallèle. Les modifications apportées à la configuration BL nous amènent à une nouvelle configuration appelée configuration HC. La configuration série/parallèle (SP) est utilisée pour former un système photovoltaïque de la tension et du courant n requis. Dans la

configuration SP, illustrée sur la figure (5.18 c), les modules sont d'abord connectés en série pour obtenir la tension requise, puis les modules connectés en série sont connectés en parallèle.

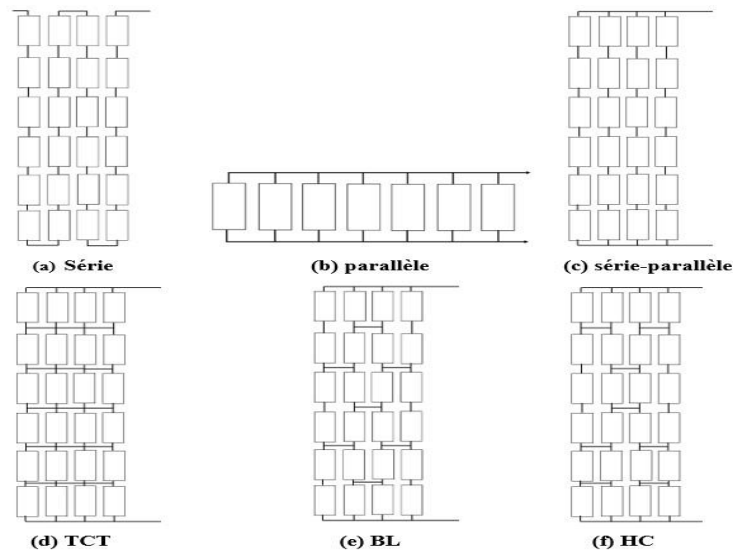


Figure 5.18 : Topologie des différentes configurations des modules photovoltaïques.

5.13 Générateur photovoltaïque

Nous avons choisi pour le modèle TPS105-90W de panneaux solaires, disponible au sein du laboratoire universitaire. Il se compose de 36 cellules en silicium identiques. Ces panneaux sont fabriqués en silicium monocristallin et comprennent du verre, des cellules en polymère, avec une puissance maximale de 90 watts et des dimensions de 1316 mm sur 546 mm avec une épaisseur de 35 mm. Chaque panneau est encadré dans de l'aluminium et fixé sur un support du kit photovoltaïque. Les spécifications techniques fournies par le fabricant sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.1: Les spécifications techniques fournies par le fabricant

Modèle	TPS105-90W
La puissance maximale P max	90 W
Dimensions (mm)	1316*546*35
Courant au point maximal	5.06 A
La tension au point maximal	17.8 V
Le courant de court-circuit	5.35 A
La tension au circuit ouvert	22.2 V
Poids (Kg)	8.4 Kg



Figure 5.19 : Générateur PV Suntech utilisé de faculté d'électronique.

5.14 Influence de l'éclairement

Après avoir fixé la température pour différents éclairages, nous remarquons que pour un éclairage $G=1000\text{W/m}^2$, nous pouvons voir que le courant subit un changement significatif lorsque l'éclairage augmente ; Le courant de court-circuit est augmenté mais par contre la tension varie légèrement. Ce qui entraîne une augmentation de la puissance lorsque le courant augmente.

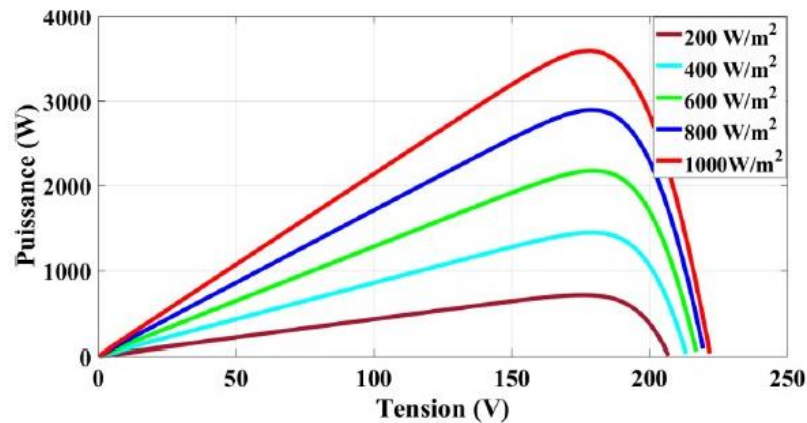


Figure 5.20: Caractéristique de $P = f(V)$ en fonction de l'éclairement

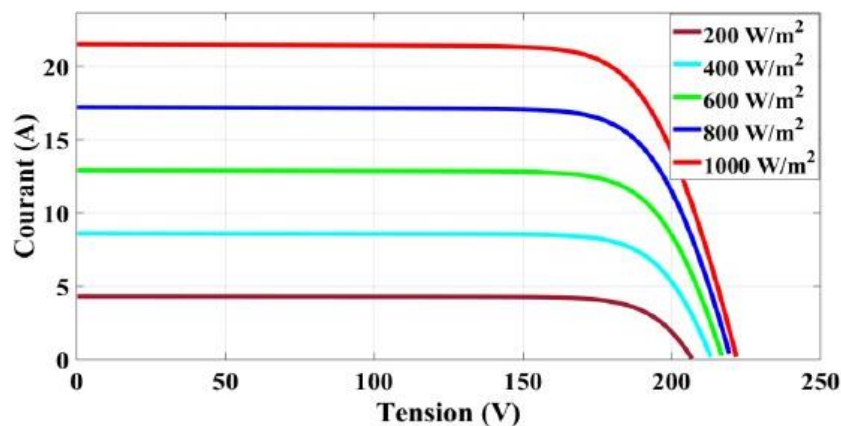


Figure 5.21 : Caractéristique de $I = f(V)$ en fonction de l'éclairement.

5.15 Simulation du modèle proposé

L'effet de l'ombrage partiel a été largement étudié par rapport aux différentes configurations des modules photovoltaïques. Lorsqu'un réseau photovoltaïque reçoit un ombrage partiel pendant le fonctionnement, ses performances deviennent difficiles à prévoir en raison du comportement des modules non linéaires et des contraintes de courant et de tension des chaînes du système. Le générateur photovoltaïque simulé est des configurations série (S), parallèle (P), série-parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL) et Honey Comb (HC) il est composé de 32 modules photovoltaïques de type TPS105-90W monocristallin dont les caractéristiques sont données dans le tableau (5.1) ci-dessus, la figure (5.22) donnant ainsi trois configurations différentes (Cas1), (Cas2) et (Cas3). Chaque configuration est simulée pour différentes valeurs d'éclairement de l'ombrage partiel et avec une température fixe $T=25^{\circ}\text{C}$.

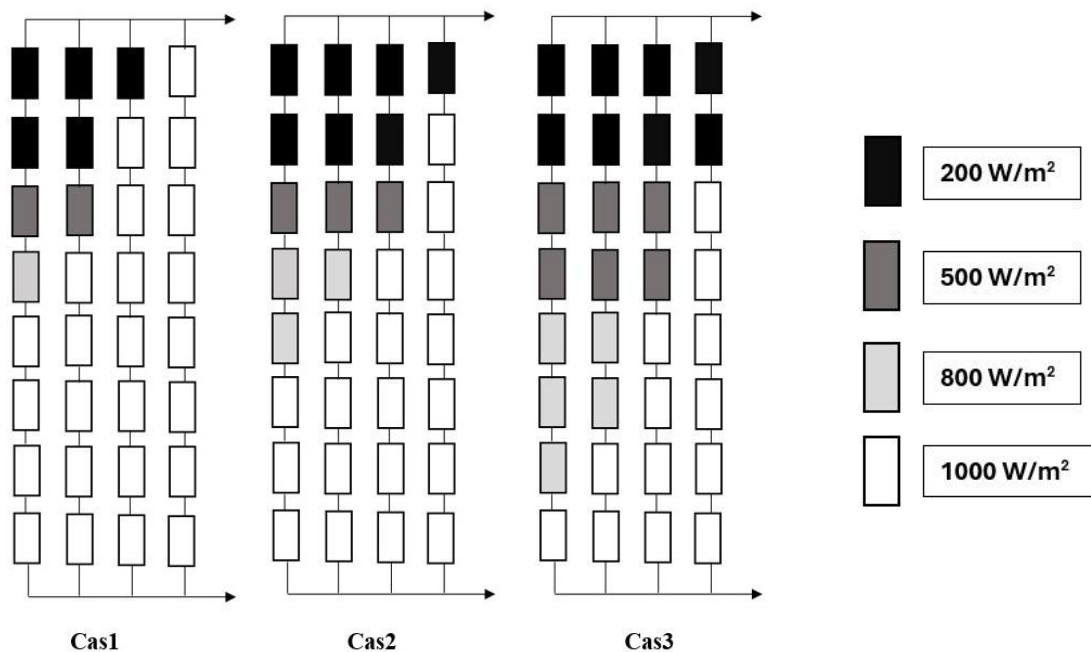


Figure 5.22: Configurations du GPV (Cas1), (Cas2) et (Cas 3).

5.15.1 Configuration Série (S)

Les graphiques illustrent les performances de panneaux photovoltaïques en série sous différentes conditions d'ensoleillement ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $800\text{W}/\text{m}^2$, $500\text{W}/\text{m}^2$, et $200\text{W}/\text{m}^2$) On remarque que :

Courbes I-V : Les cas (Cas1 en bleu, Cas2 en vert, Cas3 en cyan) présentent des paliers où le courant reste constant sur certaines plages de tension avant de chuter, indiquant des points de fonctionnement stables malgré les variations de tension.

Courbes P-V : Ces cas montrent des augmentations par paliers de la puissance, atteignant des plateaux avant de diminuer. Chaque cas atteint son pic de puissance à une tension différente, reflétant des variations dans l'efficacité des panneaux et les conditions environnementales.

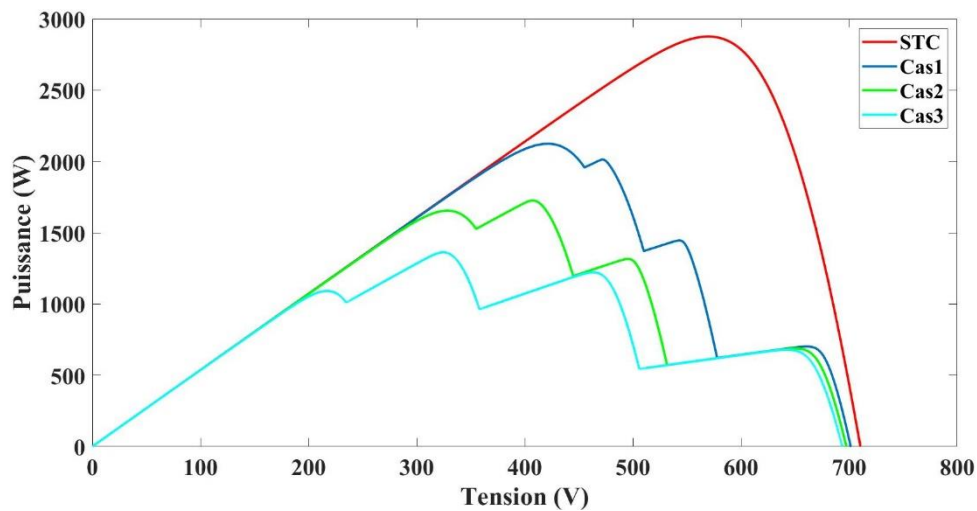


Figure 5.23 : Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en série avec ombrage partiel

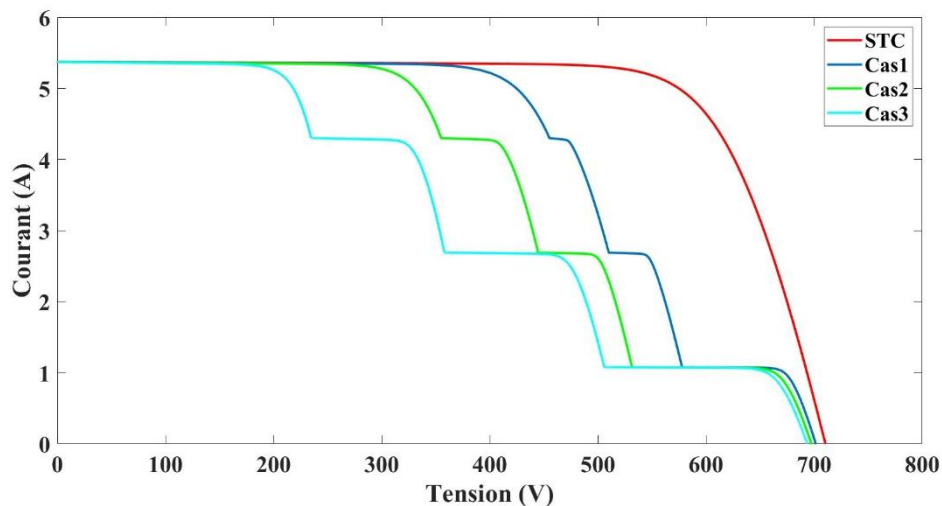


Figure 5.24 : Caractéristique I-V de 32 panneaux PV en série avec ombrage partiel

5.15.2 Configuration Parallèle (P)

Les graphiques montrent les caractéristiques de tension-courant (I-V) et de tension-puissance (P-V) pour un champ de panneaux photovoltaïques configurés en parallèle sous différents cas d'ombrage.

Courbes I-V: montrent que le courant reste constant jusqu'à un certain point de tension avant de chuter rapidement. Sous les conditions de test standard (STC, courbe rouge), cette chute de courant se produit à la tension la plus élevée, indiquant une performance optimale sans ombrage. En revanche, dans les cas d'ombrage (Cas1, Cas2, Cas3), la chute de courant se produit à des tensions de plus en plus basses, illustrant l'impact négatif croissant de l'ombrage.

Courbes P-V : révèlent que la puissance augmente avec la tension jusqu'à atteindre un pic, après quoi elle diminue. Le pic de puissance sous les conditions de test standard (STC) est le plus élevé, démontrant les meilleures performances sans ombrage. En revanche, les pics de puissance pour Cas1, Cas2 et Cas3 diminuent progressivement, indiquant que l'ombrage réduit la capacité des panneaux à générer de la puissance.

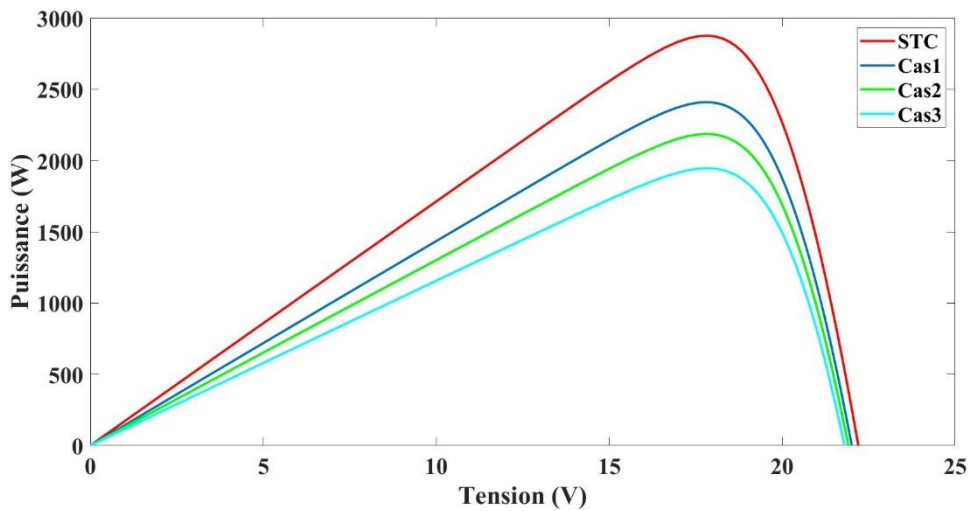


Figure 5.25: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en parallèle avec ombrage partiel

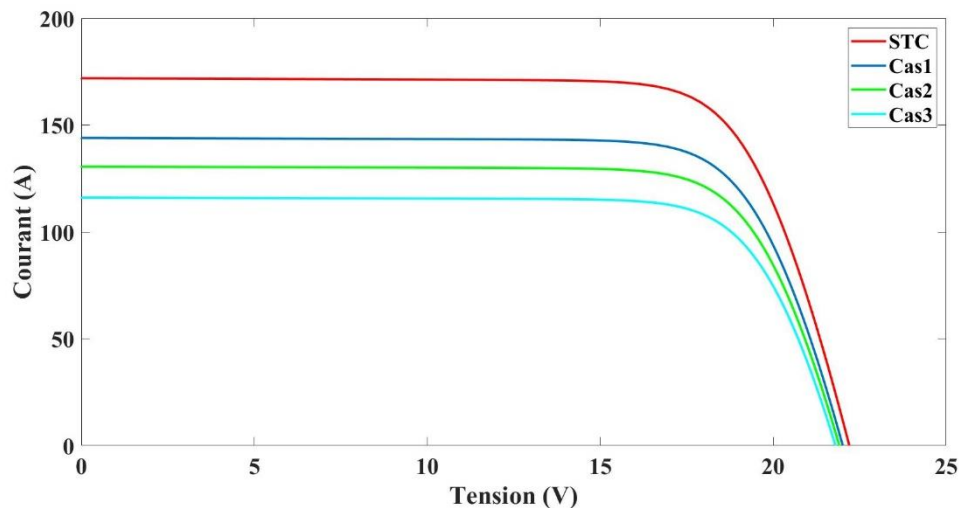


Figure 5.26 : Caractéristique I-V de 32 panneaux PV en parallèle avec ombrage partiel

5.15.3 Configuration Série Parallèle (SP)

Les deux graphiques illustrent les caractéristiques des courbes I-V et P-V pour un champ de panneaux photovoltaïques configurés en série-parallèle sous différents cas d'ombrage :

Courbes I-V : montrent qu'en conditions de test standard (STC), la courbe rouge présente un comportement stable du courant jusqu'à environ 18V, après quoi le courant chute rapidement à mesure que la tension augmente, indiquant une perte de performance significative sous des tensions élevées. Pour les cas d'ombrage (Cas1, Cas2, Cas3), les courbes montrent des chutes de courant à différents niveaux de tension, illustrant que sous ombrage, les panneaux produisent moins de courant, surtout à des tensions plus élevées.

Courbes P-V : La courbe rouge sous STC montre une augmentation de la puissance avec la tension jusqu'à un pic autour de 18V, après quoi la puissance diminue. Ce pic correspond au point de puissance maximale (MPP), crucial pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques. Pour Cas1, Cas2, et Cas3, les courbes montrent des pics de puissance à des tensions légèrement différentes, indiquant que l'ombrage affecte le point de tension où la

puissance maximale est atteinte. Les variations entre les cas suggèrent des degrés d'ombrage différents ou des réponses variables des panneaux à l'ombrage.

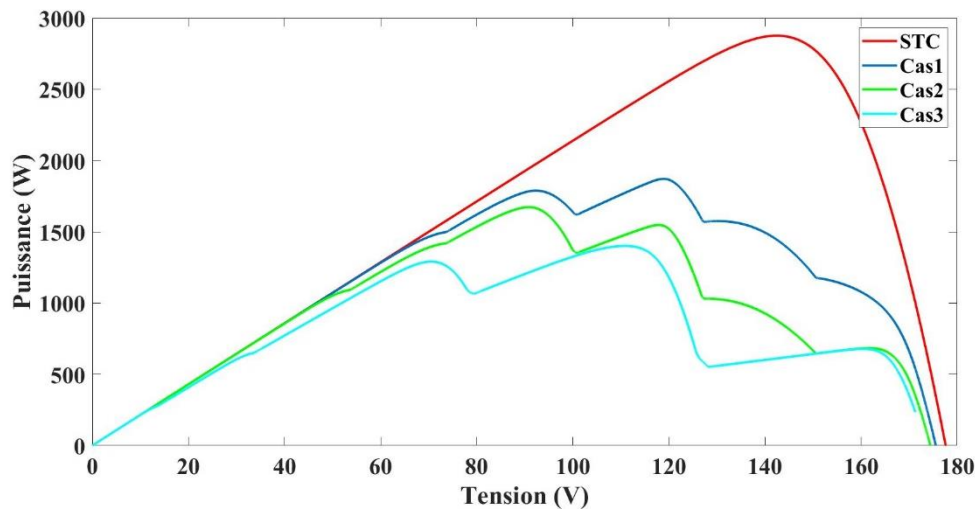


Figure 5.27: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en SP avec ombrage partiel

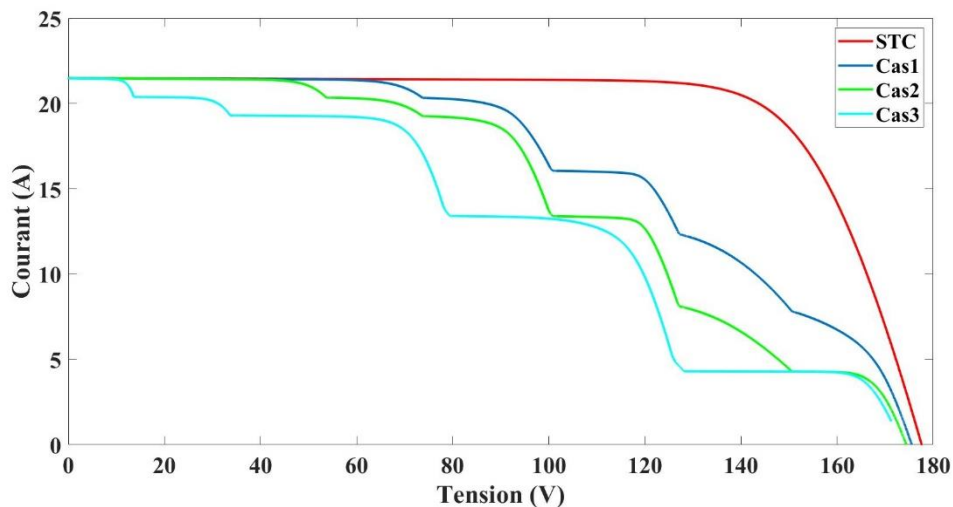


Figure 5.28: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV en SP avec ombrage partiel

5.15.4 Configuration Bridge Linked (BL)

Les deux figures illustrent les caractéristiques des courbes I-V et P-V on remarque :

Courbes I-V : montrent que sous les conditions de test standard (STC), la courbe rouge présente un comportement typique d'un panneau photovoltaïque sans ombrage : le courant reste stable à une valeur élevée avant de chuter rapidement lorsque la tension atteint la tension de circuit ouvert. Pour les cas d'ombrage (Cas1, Cas2, Cas3), les courbes montrent des variations de courant en fonction de la tension. Chaque cas présente des paliers où le courant chute à des niveaux inférieurs, indiquant les effets de l'ombrage partiel sur les cellules photovoltaïques. Ces paliers sont probablement dus à l'activation de différents chemins de dérivation au sein des modules PV sous l'effet de l'ombre.

Courbes P-V : montrent qu'en conditions de test standard (STC), la courbe rouge présente une augmentation progressive de la puissance avec la tension jusqu'à un pic, après quoi la puissance diminue. Ce pic représente le point de puissance maximale (MPP), où le produit

de la tension et du courant est maximal. Sous l'ombrage (Cas1, Cas2, Cas3), les courbes montrent plusieurs pics de puissance, ce qui est caractéristique des configurations avec des ombres partielles. Chaque pic correspond à un point de puissance maximale local, résultant de la configuration particulière des ombres sur les panneaux. Ces multiples pics indiquent que différents groupes de cellules atteignent leur point de puissance maximale à différentes tensions en raison de l'ombrage.

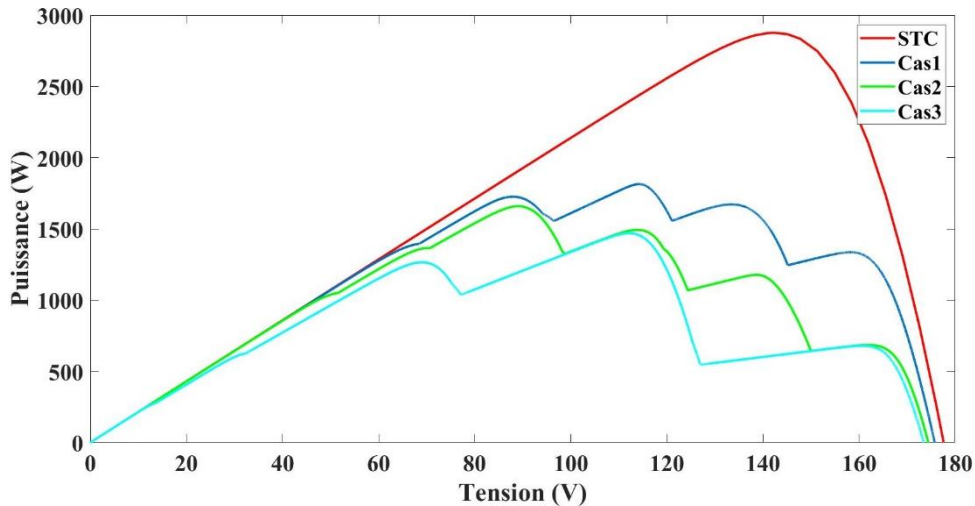


Figure 5.29 : Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour BL avec ombrage partiel

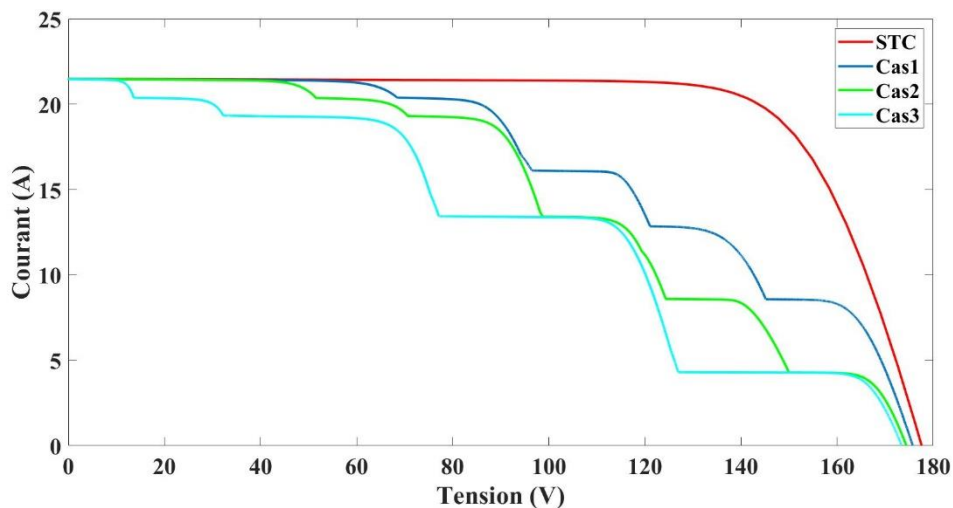


Figure 5.30 : Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour BL avec ombrage partiel

5.15.5 Configuration Honey Comb (HC)

Les deux figures illustrent les caractéristiques des courbes I-V et P-V on remarque :

Courbes I-V : présentent trois cas : la courbe STC , le courant reste stable à une valeur élevée avant de chuter brusquement à mesure que la tension augmente, indiquant une performance optimale sans ombrage. Pour Cas1, Cas2 et Cas3, le courant commence à des valeurs légèrement inférieures et présente plusieurs paliers ou chutes, reflétant l'effet de l'ombrage partiel sur les panneaux. Chaque cas montre une réduction progressive du courant avec l'augmentation de la tension, avec des chutes plus marquées pour Cas3.

Courbes P-V : à l'instar des courbes I-V, montrent que sous STC, la courbe est la plus élevée, indiquant la puissance maximale obtenue sans ombrage. Pour les cas d'ombrage (Cas1, Cas2, Cas3), les performances sont réduites. La puissance augmente avec la tension jusqu'à un certain point avant de chuter, ce qui est typique des caractéristiques P-V des panneaux photovoltaïques. Les chutes dans les courbes de puissance correspondent aux chutes dans les courbes de courant, reflétant les pertes dues à l'ombrage.

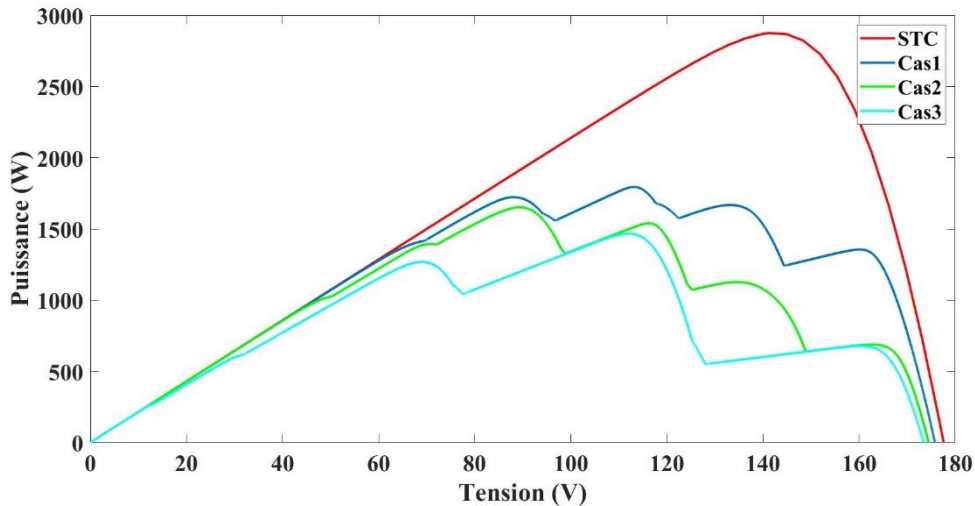


Figure 5.31: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour HC avec ombrage partiel

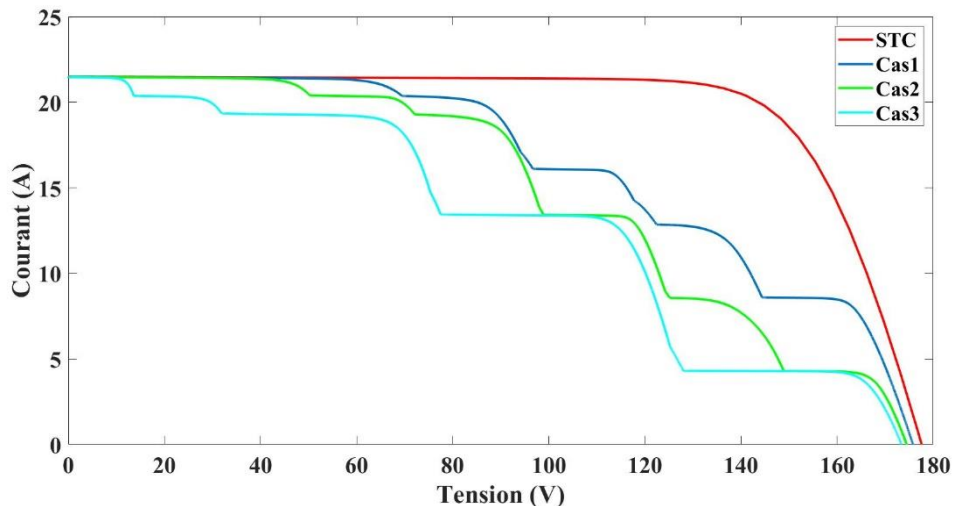


Figure 5.32: Caractéristique I-V de 32 panneaux PV pour HC avec ombrage partiel

5.15.6 Configuration Total-Cross-Tied (TCT)

Les deux figures illustrent les caractéristiques des courbes I-V et P-V on remarque :

Courbes I-V : montrent que sous les conditions de test standard (STC), le courant reste stable à une valeur élevée sur une large plage de tension avant de chuter brusquement à mesure que la tension se rapproche de la tension de circuit ouvert, indiquant le comportement idéal sans ombrage. Pour Cas1, le courant diminue légèrement par rapport à STC, indiquant un ombrage modéré avec une chute de courant qui commence plus tôt. Dans Cas2, l'ombrage est plus prononcé, le courant maximal est plus bas et la chute de courant débute plus tôt, signalant une perte de performance plus importante. Cas3 est le plus affecté, avec un courant

nettement plus bas sur toutes les plages de tension, montrant l'impact sévère de l'ombrage sur la performance.

Courbes P-V : montrent que sous STC, la puissance augmente régulièrement avec la tension jusqu'à un pic, après quoi elle diminue rapidement, ce qui est typique des caractéristiques des cellules photovoltaïques. Pour Cas1, le pic de puissance est légèrement réduit et se produit à une tension inférieure, indiquant une efficacité réduite due à l'ombrage. Cas2 montre une réduction plus notable de la puissance maximale et un déplacement du pic vers des tensions plus basses, reflétant une dégradation plus importante due à l'ombrage. Enfin, Cas3 présente le pic de puissance le plus bas, également à une tension inférieure, démontrant que l'ombrage sévère a un impact significatif sur la capacité du système à générer de la puissance.

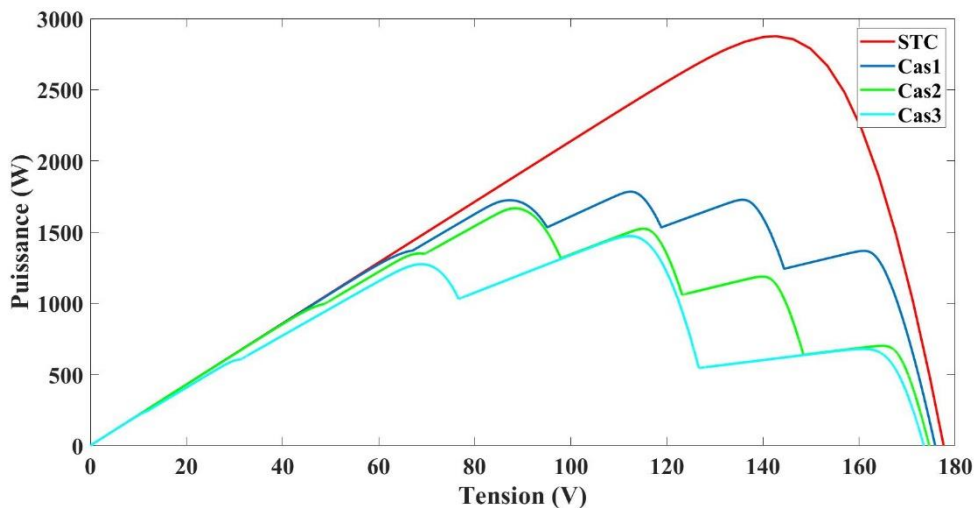


Figure 5.33: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour TCT avec ombrage partiel

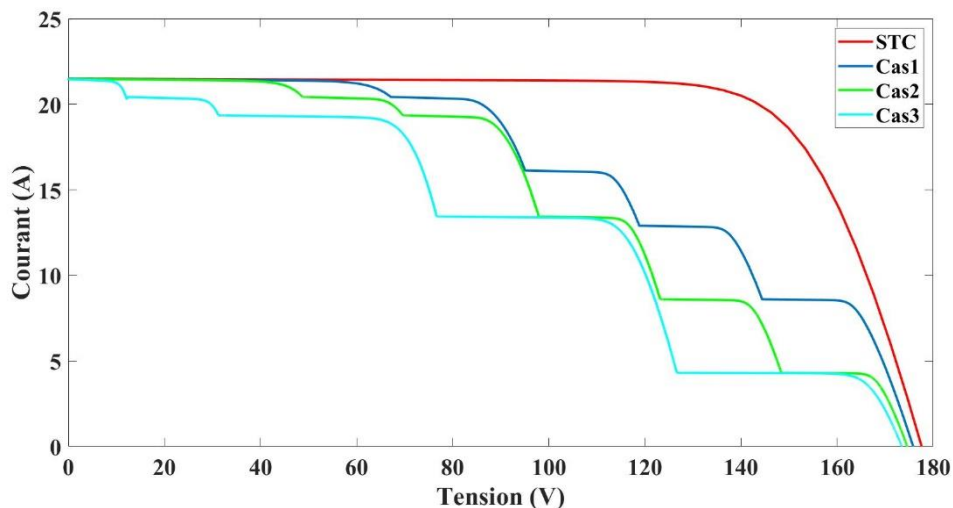


Figure 5.34: Caractéristique P-V de 32 panneaux PV pour TCT avec ombrage partiel

Toutes les puissances maximales qui en résultent de cette simulation sont récapitulées dans le tableau 5.2 , avec deux points de voltage , courant avec le facteur de forme.

Tableau 5.2 : Valeur des puissances maximal pour les différents niveaux.

		P (W)	V (V)	I (A)	FF (%)
Cas1	S	2141	428.1	5.001	57.7
	P	2410	17.78	135.54	63.85
	SP(M)	1871	119.2	15.69	48.59
	TCT	1784	112.1	15.91	48.54
	BL	1814	114.3	15.87	49.36
	HC	1795	113.2	15.85	48.84
Cas2	S	1725	405.9	4.24	46.49
	P	2184	17.98	121.46	57.86
	SP(M)	1672	91.34	18.430	43.42
	TCT	1667	88.63	18.80	45.36
	BL	1658	89.43	18.53	45.11
	HC	1652	89.46	18.46	44.95
Cas3	S	1362	326.1	4.176	36.71
	P	1946	17.78	109.44	51.56
	SP(M)	1400	110.5	12.66	36.36
	TCT	1472	112.3	13.10	40.05
	BL	1469	112.1	13.08	39.97
	HC	1667	112.1	13.08	39.91

Les résultats des trois cas montrent dans la figure (5.35) des performances variées en fonction des configurations et de l'ombrage. Dans Cas1, toutes les configurations affichent des performances relativement élevées, avec la configuration en série présentant la puissance la plus élevée. Pour Cas2, il y a une diminution notable de la puissance dans toutes les configurations par rapport à Cas1, ce qui indique un impact négatif accru des conditions d'ombrage, bien que la configuration en série continue de montrer la puissance la plus élevée. Dans Cas3, la tendance à la baisse se poursuit, avec toutes les configurations affichant une réduction supplémentaire de la puissance, et bien que la configuration en série reste la plus performante, l'écart entre les configurations se réduit. Globalement, ces résultats indiquent que la configuration en série tend à offrir la meilleure performance en termes de puissance maximale dans divers scénarios d'ombrage, bien que toutes les configurations subissent une réduction de performance à mesure que l'intensité de l'ombrage augmente. Ces informations sont cruciales pour la planification et l'optimisation des installations photovoltaïques dans des environnements susceptibles de subir différents niveaux d'ombrage.

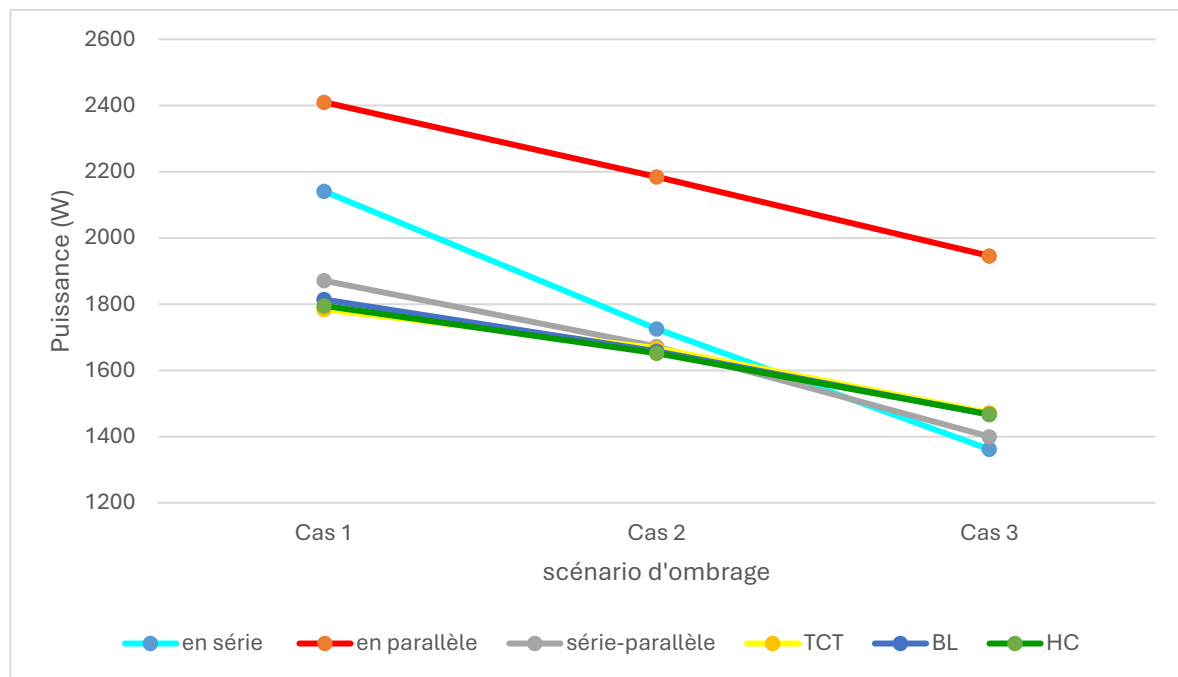


Figure 5.35: Puissance maximale de différentes configurations dans divers cas d'ombrage.

La figure (5.36) illustre le "Facteur de Forme (FF) pour diverses configurations à travers trois scénarios d'ombrage différents (Cas1, Cas2, Cas3). Le "Facteur de Forme" diminue pour toutes les configurations à mesure que nous passons du Cas1 au Cas3, indiquant une baisse générale de la performance avec l'augmentation de l'intensité des scénarios d'ombrage. La configuration "en parallèle" commence avec le FF le plus élevé dans le Cas1 mais connaît une chute significative, montrant la plus grande diminution parmi toutes les configurations dans le Cas3. En revanche, la configuration "en série" montre une baisse relativement stable à travers les scénarios, maintenant un FF modéré. Les configurations "série-parallèle" et "TCT" montrent une tendance similaire, commençant proches dans le Cas1 et divergeant progressivement, avec "TCT" maintenant un FF légèrement plus élevé dans le Cas3. Les configurations "BL" et "HC" montrent la plus faible diminution du FF à travers les scénarios, suggérant une meilleure résilience aux conditions d'ombrage par rapport aux autres configurations.

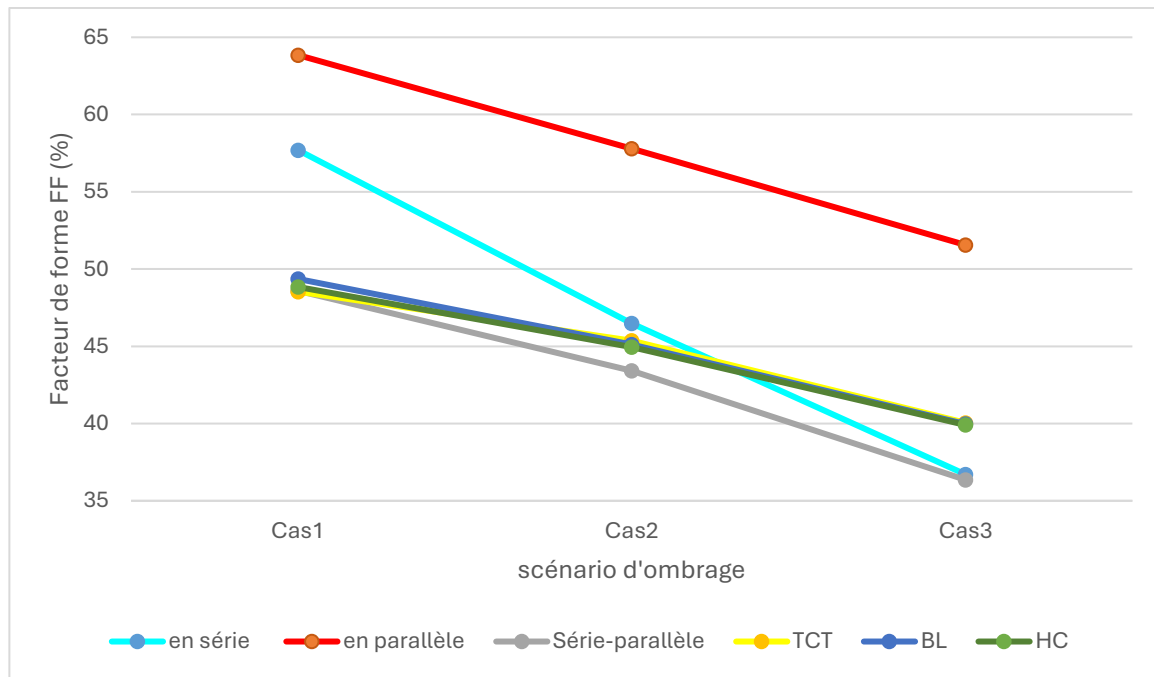


Figure 5.36 : Facteur de forme (FF) de différentes configurations dans divers cas d'ombrage.

5.16 Conclusion

Les performances des configurations de panneaux photovoltaïques S, P, SP, BL, HC et TCT dans des conditions d'ombrage sont étudiées et analysées sous MATLAB / Simulink. Les résultats obtenus par simulation montrent clairement que l'ombrage partiel du module PV a de graves conséquences sur la courbe de tension d'alimentation (P-V). Même un ombrage minime d'une partie du module ou de la cellule peut entraîner une diminution significative de la puissance produite. Chaque générateur photovoltaïque possède un point de fonctionnement unique où il peut fournir la puissance électrique maximale, connu sous le nom de point de puissance maximal. Cette puissance dépend principalement de l'intensité de l'irradiation solaire. Lorsque différents modules d'une chaîne ("String") au sein d'un générateur photovoltaïque sont ombragés, leurs propriétés électriques sont considérablement altérées.

**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

À la fin de l'étude, nous avons conclu que le développement durable nécessite de réduire l'utilisation des combustibles fossiles et de s'appuyer sur des énergies propres. Avec le réchauffement climatique croissant, l'épuisement des réserves pétrolières et la demande croissante d'énergie, il est devenu nécessaire de développer des ressources énergétiques efficaces et respectueuses de l'environnement. Parmi ces ressources, l'hydrogène utilisé dans les piles à combustible devraient constituer des alternatives incontournables

Les transports sont considérés comme l'une des principales causes de pollution de l'air dans les villes. Pour réaliser un moyen de transport idéal s'appuyant sur des sources abondantes telles que l'énergie solaire et l'hydrogène, il doit comporter peu de pièces mobiles et produire des gaz d'échappement purs semblables à de l'eau. Pour répondre à ces critères, on peut utiliser une pile à combustible à hydrogène fonctionnant à partir de différentes sources : un réservoir ou un électrolyseur qui produisent de l'hydrogène via des panneaux solaires, réalisant ainsi la production d'énergie et d'eau à partir de la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène sans gaspillage.

Nous avons effectué une étude afin de mieux comprendre le fonctionnement des piles à combustibles (PEM). Nous avons remarqué que cette technologie est très simple, mais elle est, en même temps, délicate à l'utilisation parce que plusieurs phénomènes contribuent au bon fonctionnement de cette dernière. Notre choix de commencer notre étude avec la cellule nous a été fondamentalement bénéfique, nous permettant de mieux comprendre les processus dynamiques à l'intérieur de la cellule et donc notre conclusion selon laquelle la structure cellulaire, ainsi que l'hydratation de la membrane en tant que conditions opératoires, jouent un rôle majeur dans l'influence des performances du dernier.

Nous l'avons simulé la production d'hydrogène à partir de couplage entre un générateur photovoltaïque avec un électrolyseur de type PEM. Son objectif était de produire le plus d'hydrogène possible. Nous avons simulé la caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque (GPV) et la caractéristique de l'électrolyseur PEM, on a branché le GPV avec autre système pour un meilleur résultat de courant. Après nous avons pris comme données, celles d'une journée typique sur un site réel, (la ville de CHLEF), À la suite de cette simulation les résultats obtenus se présentent comme suit, le volume total produit par un seul fil solaire est d'une valeur de 0,35 litres, quant au volume du débit résultant, il est 0,09 m³/seconde.

Enfin, nous avons étudié et simulé différentes configurations de panneaux photovoltaïques sous ombrage partiel. Où, nous avons introduit des concepts sur l'énergie photovoltaïque, le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes configurations existantes et utilisé le modèle mono-diode pour étudier et modéliser l'effet de l'ombrage partiel sur les configurations de panneaux photovoltaïques en série (S), parallèle (P), serie-parallèle (SP), Bridge Linked (BL), Honey comb (HC) et Total-Cross-Tied (TCT).

En guise de conclusion, le remplacement de la traction thermique par un système (panneaux solaire - électrolyseur - pile à combustible) conduira à une réduction de la consommation décarbonise, à une augmentation des performances et de l'autonomie. Pour atteindre cet objectif, les pouvoirs publics investir dans cette technologie et établir un cadre réglementaire

Conclusion générale

concernant les normes d'utilisation et la fiscalité. L'hydrogène est une nouvelle manière de vivre et nécessitera la préparation des publics aux changements de grande envergure à venir.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHE

Références Bibliographiques

Chapitre 01 :

[1] : HATTI. M, 2010, ' Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Pile à Combustible', memoire Doctorat, Université d'Oran

[2] : Dr. Rezig Mohamed, 2020/2021, 'Energies et Environnement', Département Génie Electrique, 2 ème Année ST – (Génie Électrique), Université de Mohamed Khider

[3] :AZIZI.A,'Modélisation optimisation D'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride', mémoire doctorat, Université d'Annaba, 2019.

[4] : BIDI .M, 2019 'Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures', MEMOIRE MASTER, Université de M'sila.

[5] : C. Darras, " Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE", Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.

[6] : A. Mirecki, " Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.

Chapitre 02 :

[1] : <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-hydrogene.aspx> (Consulté en mars).

[2]: Fiche 1.1 Th. A - cor. P.M_sept2018 <https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2018/09/1.1-1.pdf> (Consulté en mars).

[3] : 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.

[4] : <https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-energie> (Consulté en mars).

[5] : Fiche 3.1.1 - Production à partir de fossiles

[-https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2021/11/Fiche_203.1.1_20-20Production_20_C3_A0_20partir_20de_20fossiles_20-20rev_20nov2019_20Th_20A.pdf](https://s3.production.france-hydrogene.org/uploads/sites/4/2021/11/Fiche_203.1.1_20-20Production_20_C3_A0_20partir_20de_20fossiles_20-20rev_20nov2019_20Th_20A.pdf) (Consulté en mars).

[6] : <https://www.connaissancesdesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification> (Consulté en avril).

[7] : <https://youmatter.world/fr/definition/hydrogene-bleu-definition-exemples-enjeux/> (Consulté en avril).

- [8] : <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/hydrogene-blanc-tout-savoir/> (Consulté en avril).
- [9] : <https://youmatter.world/fr/definition/hydrogene-vert-definition-enjeux-chiffres/> (Consulté en avril).
- [10] : <https://www.discoverthegreentech.com/hydrogene/production/electrolyse/> (Consulté en avril).
- [11] : <https://www.crowcon.com/fr/blog/hydrogen-electrolysis/> (Consulté en avril).
- [12]: <https://www.terega.fr/nos-activites/hydrogene/le-stockage-dhydrogene-un-enjeu-pour-le-developpement-de-la-filiere> (Consulté en avril).
- [13]: <https://www.mahytec.com/fr/hydrogene/> (Consulté en avril).
- [14] : [Hydrogen storage cylinder Liaoning Alsafe Technology Company Ltd \(alsafechina.com\)](https://alsafechina.com) (Consulté en avril).
- [15] : Belkacem, H., & Yacheur, H. (2023). *Modélisation et simulation de la gestion d'énergie excédentaire photovoltaïque pour la production d'hydrogène* (Doctoral dissertation, Directeur: Mr M. Mebrouki).
- [16] : <https://www.encyclopedie-energie.org/competitivite-hydrogenes-gris-bleu-vert/> (Consulté en avril).
- [17] : <https://www.rncan.gc.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/utilisation-de-lhydrogene-au-canada/23150> (Consulté en avril).
- [18] : <https://learnandconnect.pollutec.com/guide-hydrogene-vert/quelle-utilisation-hydrogene-vert-industrie/> (Consulté en avril).

Chapitre 03 :

- [1] : KOUACHE, A. Z., & Lakhdar, R. E. H. O. U. M. A. *Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques* (Doctoral dissertation).
- [2] : <https://tpepilecombustible.wordpress.com/category/i-la-pile-a-combustible-historique-et-fonctionnement/> (Consulté en avril).
- [3]: Belfeddal, A., & Zeggai, M. A. (2023). *Modélisation et simulation d'une pile à combustible de type PEMFC* (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun).
- [4] : Ludivine Franck Lacaze, Caroline Bonnet, François Lopicque. Les membranes pour piles à combustible PEMFC. Techniques de l'Ingénieur, 2016 . hal-03202217
- [5] : <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/pile-combustible-fonctionnement-avantages-inconvenients/> (Consulté en avril).

- [6] : Friede, K. W. (2003). *Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM* (Doctoral dissertation, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL).
- [7] : <https://www.actinnovation.com/innovation-pratique/pile-combustible-powertrek-recharger-smartphone-eau-4245.html> (Consulté en avril).
- [8] : <https://www.largus.fr/actualite-automobile/essai-bmw-ix5-hydrogen-au-volant-du-suv-electrique-a-pile-a-combustible-30025351.html> (Consulté en avril).
- [9] : Nizar Doss. Plaques bipolaires dans une pile à combustible à membrane: effet du design sur les performances et recherche de matériaux métalliques adaptés. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008. Français. NNT: 2008INPL068N. tel-01751636
- [10] : Belatel, M., Aissous, F. Z., & Ferhat, F. (2012). Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte. *Journal of Renewable Energies*, 15(1), 13-28.
- [11] : ARAB, L., & CHEBBI, Z. (2016). ETUDE ET SIMULATION D'UNE PILE A COMBUSTIBLE DE TYPE PEM. *mémoire de master, Université Bouira*.
- [12] : Dana-Maria Paclisan. Optimisation par la modélisation de l'expérimentation vibratoire des systèmes pile à combustible pour le transport terrestre. Autre. Université de Technologie de BelfortMontbéliard, 2013. Français. NNT: 2013BELF0208.

Chapitre 04 :

- [1] : EMBARKI Ala Eddine, B. E. N. Modélisation D'électrolyseur Proton Exchange Membrane (PEM). 20-Jun-2020
- [2] : <https://demaco-cryogenics.com/fr/blog/tout-sur-lelectrolyseur-dhydrogene/> (Consulté en avril).
- [3] : Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à haute température https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber37_4_5.pdf (Consulté en mai).
- [4] : Sara Soual, Florent Brissaud-Delord, Kévin Gault. Sécurité des électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons. Congrès Lambda Mu 23 " Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable "- 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03876164
- [5] : Rabih, S. (2008). *Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques* (Doctoral dissertation).
- [6] : EMBARKI Ala Eddine, B. E. N. Modélisation D'électrolyseur Proton Exchange Membrane (PEM).

[7] : BOUHAMED Yousri, T. A. M. LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR LES RESSOURCES RENOUVELABLES (PHOTOVOLTAÏQUE).

[8] : <https://fr.tutitempo.net/chlef.html> (Consulté en 02/06/2024)

Chapitre 05 :

[1] : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire (Consulté en mai).

[2] : ZERROUKI, Z., & BEREKSI REGUIG, R. (2017). *Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome* (Doctoral dissertation).

[3] : <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/> (Consulté en mai).

[4] : <https://www.abiola.ngo/fr/11-rayonnement-solaire-mondial-2>

[5] : TABET, I., & BELLEL, N. (2010). CONTRIBUTION A L'ETUDE, REALISATION ET SIMULATION D'UN DISTILLATEUR SOLAIRE À CASCADES. *Sciences & Technology. A, exactes sciences*, 29-35.

[6] : https://www.researchgate.net/figure/Irradiation-solaire-globale-recue-sur-un-plan-incline-a-la-latitude-du-lieu-24_fig24_285322379 (Consulté en mai).

[7] : <https://www.power-africa.com/leffet-photovoltaïque/> (Consulté en mai).

[8] : http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Technologies_de_cellules_solaires (Consulté en mai).

[9] : <https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire/> (Consulté en mai).

[10] : Belharrat, S. A. (2010). *Production et gestion de l'énergie solaire photovoltaïque adaptée à une maison* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[11] : <https://www.gre-enr.fr/autoconsommation-photovoltaïque/>(Consulté en mai).

[12] : Belboula, A. (2015). *Commande MPPT avancée d'un système de conversion d'énergie solaire: Photovoltaïque et thermoélectrique* (Doctoral dissertation, Mohamed TADJINE).

[13] : Étude des commandes MPPT d'un système Photovoltaïque https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1099/1/pfe.2020.aut.OUARI.Mondhe_ZINE.Yakoub.pdf (Consulté en mai).

[14] : <https://www.sma-france.com/centre-de-connaissances/conseils-techniques-avant-l'installation/gestion-de-l'ombrage> (Consulté en mai).

[15] : Y. El Basri, Architecture de puissance distribuée reconfigurable dédiée à l'optimisation de l'énergie photovoltaïque. PhD thesis, Toulouse 3, 2013.

[16] : K. Kim, Hot spot detection and protection methods for photovoltaic systems. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014.