



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

Conception et étude d'un système hybride : Piles à combustibles et capteurs photovoltaïques Thermiques

Présenté par :

Oumelkhir DIB

Djihad ARROUSI

Soutenue publiquement le: 21/06/2023

Devant le jury composé de :

Abdelhakim ELAKHDARI	Maitre de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Président
Charaf Abdelkarim MOSBAH	Maitre de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Examineur
Ahmed BAHRI	Maitre de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Examineur
Khaled TOUAFEK	Directeur de recherche	URAER Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire: 2022/2023



Dédicace

Avec gratitude et sincérités je dédie ce modeste Travail à :

**À mes très chers parents fond du cœur. Qu'ils trouvent ici l'hommage de ma gratitude qui, si grande qu'elle puisse être, ne sera jamais à la hauteur de leur éloquence et leur dévouement. Aucune dédicace ne pourra exprimer la profondeur de mes sentiments*

**A Mes frères :*

**A Mes Sœurs :*

**A mes amis :*

**A tout ce qui a contribues à la réalisation de ce travail.*



DIB Oumelkhir

Remerciement

Avant tout, nous remercions notre Bon Dieu tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir réaliser ce travail.

Ce travail a été réalisé au niveau de Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER). Ce travail doit beaucoup à l'aide précieuse de membres de service, Nous voudrais saluer et remercier tous les membres de ce service.

*Nous aimerions exprimer notre admiration sans limite pour Monsieur le Docteur **TOUAFEK Khaled**, directeur de ce thème. Grâce à son bonté et sa gentillesse. Sans lui, ce thème n'aurait jamais été. Il nous a fait une grande confiance en nous proposant cette étude et en acceptant d'encadrer notre travail. Nous lui sommes extrêmement reconnaissants pour nous avoir consacré du temps, surtout dans la correction de ce manuscrit.*

Nous remercions les membres du jury pour leur présence et pour avoir accepté d'évaluer et examiner ce travail.

A Nos Enseignants de la Faculté de Science et Technologies à l'Université de GHARDAIA. Nous adressons tous nos sincères remerciements.

Enfin, Nous ne pourrions oublier de remercier du fond du cœur nos parents pour nous avoir toujours permis de suivre le chemin des études. Merci pour leurs soutiens, leurs encouragements et sur tout leur amour qui a toujours été une source motivante.

Résumé

Le point commun des capteurs hybrides PVT et les piles à combustibles étant leur dépendance à la température de fonctionnement. La faite d'intégrer des échangeurs de chaleurs permet de refroidir les cellules photovoltaïques et les piles à combustibles d'un côté, et d'utiliser cette énergie calorifique pour satisfaire des charges thermiques d'un autre côté. Par conséquent, la combinaison des capteurs photovoltaïques Thermiques (PVT) et de la pile à combustible permettra de répondre complètement aux besoins énergétiques d'une charge autonome. Ce système énergétique peut aussi être injecté au réseau. Dans ce dernier cas, les deux sources énergétiques (Capteur PVT et PAC) vont fonctionner d'une manière optimale.

Dans ce travail, le système énergétique multi sources constitué des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques et des piles à combustibles est étudié. Une simulation de fonctionnement de ces parties pour l'alimentation de charges autonomes a été faite. Les résultats de simulations ont été discutés et des perspectives de recherche dans ce domaine ont été données.

Les mots clés : hybride, capteur PVT, PAC, PEMFC, chaleur.

Abstract

Most common point of PVT hybrid captor and fuel cells being their dependence on the operating temperature. Integrating heat exchangers can cool the photovoltaic cells and fuel cells on one side, and to use this calorific energy to satisfy thermal loads on the other side. The combination of PVT collectors and the fuel cell in an energy system will therefore make it possible to completely satisfy the energy demand of an autonomous load. The electricity produced by this energy system can also be fed into the grid. In the latter case, the two energy sources (PVT collector and heat pump) will operate optimally.

In this work, the multi-source energy system consisting of thermal photovoltaic hybrid collectors and PEMFC type fuel cell is studied. A modeling was made on these components. A simulation of the operation of these parts for the supply of autonomous loads has been made. Simulation results were discussed and research perspectives in this area were given.

Key words: hybrid system, PVT collector, fuel cell, PEMFC, heat.

ملخص

النقطة المشتركة لأجهزة الاستشعار الهجينة وخلايا الوقود PVT هي اعتمادها على درجة حرارة التشغيل. إن حقيقة دمج المبادلات الحرارية تجعل من الممكن تبريد الخلايا الكهروضوئية وخلايا الوقود على جانب واحد، واستخدام هذه الطاقة الحرارية لتلبية الأحمال الحرارية على الجانب الآخر. وبالتالي، فإن الجمع بين مستشعرات PVT وخلية الوقود في نظام الطاقة سيجعل من الممكن تلبية متطلبات الطاقة الكهربائية والحرارية للحمل المستقل تمامًا. يمكن أيضًا تغذية الكهرباء التي ينتجها نظام الطاقة هذا في الشبكة. في الحالة الأخيرة، سيعمل مصدرا الطاقة (مستشعر PVT ومضخة الحرارة) على النحو الأمثل.

في هذا العمل، تمت دراسة نظام الطاقة متعدد المصادر المكون من مجسات حرارية كهروضوئية وخلية وقود من النوع PEMFC. تم عمل نمذجة على هذه المكونات. تم إجراء محاكاة لتشغيل هذه الأجزاء لتزويد الأحمال المستقلة. نوقشت نتائج المحاكاة وأعطيت وجهات نظر البحث في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين، مستشعر PVT، خلية وقود، PEMFC، الحرارة.

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiii
Introduction générale	01
Chapitre 1 : Energies renouvelables et développements durables.	
1.1 Introduction	04
1.2 Les Energies renouvelables	04
1.2.1 Énergie hydraulique	04
1.2.2 Énergie de la géothermie	05
1.2.3 Energie éolienne	05
1.2.4 Energie de La biomasse	06
1.2.5 Energie marine	07
1.2.6 Energie Solaire	07
1.2.7 Capteurs solaire photovoltaïques	11
1.2.8 Capteur solaire thermique	18
1.2.9 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire	19
1.3 Le développement durable (DD)	25
1.3.1 Le développement durable et la problématique de l'énergie	26
1.3.3 Les perspectives des énergies renouvelables dans le monde d'ici 2050	26
1.4 Potentiel des énergies renouvelable en Algérie	27
1.5 Conclusion	27
Références	28
Chapitre2 : Etat de l'art sur les capteurs hybrides PVT et sur la pile à combustible.	
2.1 Introduction	31
2.2 Capteurs hybrides PVT	31
2.2.1 Etude et synthèse bibliographique sur le capteur hybride PVT	32
2.2.2 Concept de capteur hybride photovoltaïque thermique	34
2.3 La Pile à combustible	36
2.3.1 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	39
2.3.2 Différents types de piles à combustibles	40
2.4 Conclusion	48
Références	49
Chapitre 3 : Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybride et Pile à combustible	
3.1 Introduction	52
3.2 Etude d'un système énergétique à base des capteurs hybride et Pile à combustible	52

Sommaire

3.2.1 Système autonome	53
3.2.2 Système connecté au réseau	54
3.3 Modélisation du système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à Combustible	55
3.3.1 Modélisation des capteurs PVT	55
3.3.2 Modélisation de la pile à combustible	63
3.3.3 Modélisation des convertisseurs statiques	68
3.4 Fonctionnement du système hybride PVT-PAC	75
3.5 Conclusion	76
Références	77
Chapitre 4 : Simulation du système hybride PVT-PAC	
4.1 Introduction	80
4.2 Simulation par MATLAB/SIMULINK	80
4.3 Construction d'une simulation par MATLAB/SIMULINK	81
4.3.1 Modèle Simulink du capteur solaire photovoltaïque	82
4.3.2 Modèle de capteur photovoltaïque thermique PVT	87
4.3.3 Modèle de convertisseur DC/DC (Boost)	92
4.3.4 Modèle de pile à combustible (PEMFC)	97
4.4 Conclusion	100
Références	101
Conclusion générale	104

LISTE DES FIGEURS

Chapitre 1		
Figure 1-1	Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique	05
Figure 1-2	Exemple de l'énergie de la géothermie	05
Figure 1-3	Exemple sur l'énergie éolienne	05
Figure 1-4	Exemple sur l'énergie de la biomasse.	06
Figure 1-5	Fonctionnement des panneaux photovoltaïques.	07
Figure 1-6	Fonctionnement des panneaux thermiques.	08
Figure 1-7	Potentiel solaire en Algérie.	09
Figure 1-8	Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale = direct + diffus + albédo	11
Figure 1-9	Effet photovoltaïque.	11
Figure 1-10	Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque.	12
Figure 1-11	Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.	12
Figure 1-12	Technologie des cellules solaires : a) monocristallines, b) a morphes, c) polys cristallins	15
Figure 1-13	Cellule photovoltaïque organique	15
Figure 1-14	Composants d'un générateur photovoltaïque.	16
Figure 1-15	Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en parallèle.	17
Figure 1-16	Schéma de cellules photovoltaïques associées en série	17
Figure 1-17	Capteur solaire thermique	18
Figure 1-18	Schéma de transfert de chaleur conductif loi de Fourier	20
Figure 1-19	Les trois modes de transfert thermique.	22
Figure 1-20	Schéma d'un capteur à liquide plan sans vitrage.	23
Figure 1-21	Schéma d'un capteur à liquide plan avec vitrage.	24
Figure 1-22	Capteurs solaires à tubes sous vides.	24
Figure 1-23	Capteur à concentration.	25
Chapitre 2		
Figure 2-1	Composants d'un capteur hybride PVT	31
Figure 2-2	Systèmes d'exploitation de l'énergie solaire.	33
Figure 2-3	Capteurs solaires thermique à eau.	34
Figure 2-4	Prototype de modèle PVT à air réalisée à l'URAER.	35
Figure 2-5	Prototype concentrateur CPVT.	36
Figure 2-6	Pile à combustible	36
Figure 2-7	Principe de fonctionnement de la pile à combustible	39
Figure 2-8	Différents types de piles à combustible	40
Figure 2-9	Structure d'un empilement de cellule d'une PAC.	42
Figure 2-10	Elément de base d'une cellule de pile à combustible PEM.	43
Figure 2-11	Synthèse de la filière hydrogène.	45
Chapitre 3		
Figure 3-1	Systèmes hybrides autonome.	53
Figure 3-2	Schéma globale de système hybride avec capture PVT à eau.	53
Figure 3-3	Schéma globale de système hybride avec capture PVT à air.	54
Figure 3-4	Système hybride connecté au réseau.	54
Figure 3-5	Caractéristique $I = f(V)$ et $P=f(V)$ d'une cellule PV.	56
Figure 3-6	Schématique en coupe du système Photovoltaïque/Thermique	57

LISTE DES FIGEURS

Figure 3-7	Diagramme de résistance thermique équivalente pour capteur PVT.	58
Figure 3-8	Différents constituants d'un système pile à combustible.	64
Figure 3-9	Schéma électrique d'une pile à combustible.	64
Figure 3-10	Courbe de polarisation d'une cellule de PAC.	68
Figure 3-11	Schéma de principe d'un convertisseur Boost	69
Figure 3-12	Schémas équivalents de l'hacheur survolteur (a) : fermé, (b) : ouvert.	69
Figure 3-13	Organigramme de l'algorithme de P&O	73
Figure 3-14	Structure d'un onduleur monophasé sous Matlab	74

Chapitre 4

Figure 4-1	L'interface de MATLAB R2023a	81
Figure 4-2	Ouvrir de l'interface de SIMULINK	81
Figure 4-3	Bloc de paramètre de PV Array.	82
Figure 4-4	Bloc de paramètre de Bus selector.	82
Figure 4-5	Bloc de paramètre de Constant.	83
Figure 4-6	Bloc de paramètre de To Workspace.	83
Figure 4-7	Bloc de paramètre de Controlled Voltage Source.	84
Figure 4-8	Modèle de capture solaire photovoltaïque sous Matlab Simulink.	84
Figure 4-9	Caractéristiques I(V) et P(V) d'un capture solaire photovoltaïque.	85
Figure 4-10	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)	86
Figure 4-11	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).	86
Figure 4-12	Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V).	87
Figure 4-13	Block paramètre de Goto S.	88
Figure 4-14	Block de paramètre repeating table " solar_irradiance ".	88
Figure 4-15	Block de paramètre Goto A	89
Figure 4-16	Block de paramètre de repeating table " solar_inclination ".	89
Figure 4-17	Block Solar inputs.	89
Figure 4-18	Block de Pump flow inputs.	89
Figure 4-19	Paramètre de solar cell.	90
Figure 4-20	Modèle de capteur photovoltaïque thermique PVT sous Matlab Simulink.	90
Figure 4-21	Rayonnement solaire globale.	91
Figure 4-22	Puissance électrique de sortie.	91
Figure 4-23	Puissance thermique.	92
Figure 4-24	La température de l'eau.	92
Figure 4-25	Bloc de paramètre de Battery.	93
Figure 4-26	Bloc de paramètre de IGBT.	93
Figure 4-27	Modèle de convertisseur DC/DC (Boost) sans command MPPT sous Matlab simulink.	94
Figure 4-28	Modèle de convertisseur DC/DC (Boost) avec command MPPT sous Matlab Simulink.	95
Figure 4-29	Caractéristiques d'entrée de convertisseur boost avec le command MPPT	96
Figure 4-30	Caractéristiques de sortie de convertisseur boost avec le command MPPT.	97
Figure 4-31	Block paramètre de fuel cell stack.	98
Figure 4-32	Block paramètre de MinMax.	98

LISTE DES FIGEURS

Figure 4-33	Block paramètre de fonction (fcn).	99
Figure 4-34	Modèle de pile à combustible sous Matlab Simulink.	99
Figure 4-35	Caractéristiques V(I) et P(I) d'une pile à combustible	100
Figure 4-36	La quantité d'hydrogène.	100

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2-1	Les différents types de pile à combustible	41
Tableau 2-2	Les différents types de réservoirs gazeux	46

LISTE DES ABREVIATIONS

- PV** : Photovoltaïque.
- GPV** : Générateur Photovoltaïque.
- PVT** : Photovoltaïque thermique.
- MPPT** : Maximum Power Point Tracking.
- MLI** : Modulation de Largeur d'Impulsions.
- FF** : Facteur de forme.
- P&O** : Perturbation et Observation.
- I_{cc}** : Le courant de court-circuit (A).
- V_{co}** : La tension de circuit ouvert (V).
- DC** : Courant Continu (Direct Current).
- AC** : Courant Alternatif (Alternatif Current).
- DD** : Développement Durable.
- PAC** : Pile A Combustible.
- PEMFC** : Proton Exchange Membrane Fuel Cell.
- MCFC** : Molten Carbonate Fuel Cell.
- SOFC** : Solide Oxide Fuel Cell.
- PAFC** : Phosphorique Acid Fuel Cell.
- AFC** : Alkaline Fuel Cell.



Introduction Générale

Introduction générale

De nombreux scientifiques et experts en énergie se sont engagés à trouver des solutions innovantes pour répondre aux besoins énergétiques croissants. Les énergies renouvelables ont donc vu le jour pour offrir une alternative plus propre et plus efficace aux combustibles fossiles. Parmi ces énergies renouvelables, on peut citer les systèmes hybrides de pile à combustible et de capteurs solaires PVT.

Le système hybride PVT de capteurs solaires et de piles à combustible utilise deux sources différentes. Les piles à combustible utilisent de l'hydrogène pour produire de l'électricité, tandis que les capteurs solaires photovoltaïques PV utilisent le rayonnement solaire.

Les systèmes hybrides à pile à combustible et les capteurs solaires photovoltaïques Thermiques ont de nombreux avantages. En effet, ce type de dispositif permet de générer de l'énergie à partir de deux sources différentes, ce qui augmente la quantité d'énergie disponible. L'utilisation de ces systèmes dans les centres urbains peut également contribuer à réduire la pollution atmosphérique.

La conception et l'étude d'un système hybride piles à combustible et capteurs solaires PVT nécessitent une analyse approfondie. En effet, il est important d'étudier leurs avantages et inconvénients ainsi que les exigences opérationnelles pour une efficacité optimale. De plus, le dimensionnement et le choix des composants doivent être effectués avec précision pour garantir une performance et une fiabilité à long terme.

Ensuite, les systèmes hybrides de piles à combustible et de capteurs solaires PVT sont une technologie d'énergie renouvelable Prometteuse. Leur conception et leur étude sont basées sur l'expertise et les connaissances des experts en énergie pour assurer leur efficacité et leur durabilité. Ces systèmes hybrides offrent une solution énergétique propre et efficace.

L'étude d'un système énergétique basé sur des piles à combustible et des capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques est l'objectif de ce mémoire. Le but est d'augmenter la productivité de ces systèmes. Ce document est structuré en quatre parties distinctes :

Dans le premier chapitre on a étudié des généralités sur les ENR et sur le développement durable. Notamment nous allons citer les différents types des énergies renouvelables tel que les énergies solaires photovoltaïques et thermiques.

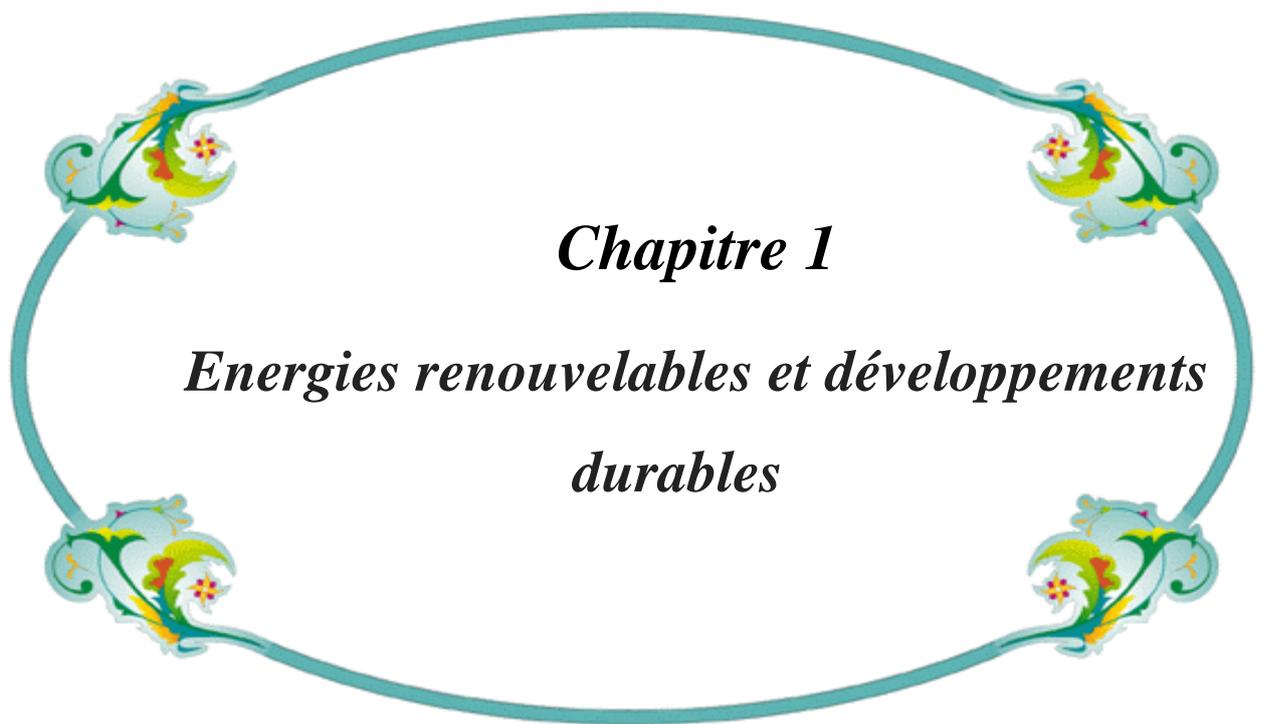
Nous avons abordé dans le deuxième chapitre les capteurs PVT et les PAC.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre nous avons étudié en détail le système énergétique à base de capteurs hybride et Pile à combustible tel que leurs modélisations et quelques scénarios de leur fonctionnement.

Le dernier chapitre a été consacré à la simulation du fonctionnement des composants de notre système énergétique et à la discussion des résultats.

Une conclusion générale qui détail les principaux résultats termine ce mémoire.



Chapitre 1

*Energies renouvelables et développements
durables*

Chapitre 1

Énergie renouvelables et développements durables

1.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont des solutions pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux tout en assurant un développement durable. Elles sont définies comme des sources d'énergies qui proviennent des ressources naturelles régénérables. Le développement durable, quant à lui, est un concept clé dans la gestion des ressources naturelles, visant à satisfaire les besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Ainsi, en mettant en œuvre des sources d'énergies renouvelables, nous favorisons le développement durable en réduisant l'impact environnemental tout en répondant aux besoins énergétiques actuels. Cette approche soutenable permet d'assurer un futur énergétique stable et durable pour les générations à venir.

1.2. Énergies renouvelables

La source d'énergie est considérée comme renouvelable si la consommation d'énergie ne limite pas son utilisation à l'avenir. Cela concerne l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et généralement la biomasse humide ou sèche à l'échelle de la durée de vie humaine. Cela ne s'applique pas aux énergies fossiles ou nucléaires. Ces sources ne s'épuiseront jamais au fil du temps humain, comme l'indique leur nom. [1]

Les énergies renouvelables sont produites à partir de diverses sources. [1] notamment, l'énergie solaire, éolienne, marine, biomasse, hydroélectrique et géothermique.

1.2.1. Énergie hydraulique

L'hydroélectricité utilise la puissance de l'électricité circulant dans une centrale pour entraîner une turbine pour produire de l'électricité (**figure 1-1**). Contrairement au vent et au soleil, l'hydroélectricité est relativement indépendante des conditions météorologiques. Selon la saison, cependant, les débits enregistrés au niveau des centrales sont toutefois fort différents. [2]

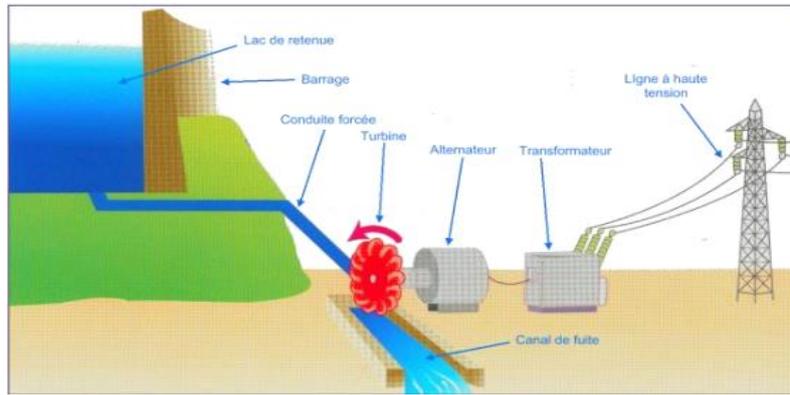


Figure 1-1 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [2].

1.2.2. Énergie de la géothermie

L'énergie générée à partir de l'énergie géothermique contenue dans des couches chaudes de la terre (Figure 1-2). [2]

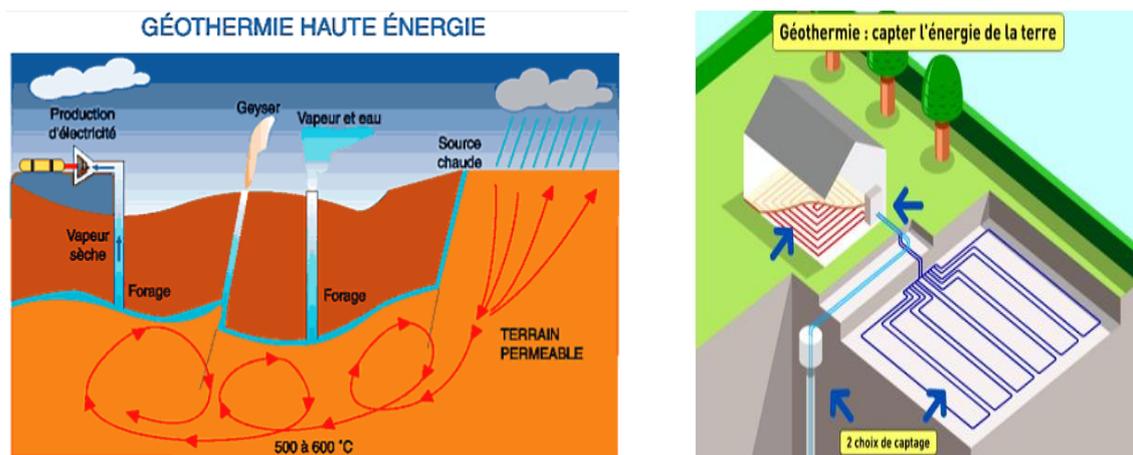


Figure 1-2 : exemple de l'énergie de la géothermie. [2]

1.2.3. Énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelée éolienne dans la figure 1-3.



Figure 1-3 : Exemple sur l'énergie éolienne [3]

1.2.4. Energie biomasse

La combustion directe, la digestion anaérobie, la co-incinération, la pyrolyse et la gazéification sont quelques-unes des nombreuses façons dont la biomasse peut être transformée en chaleur et en électricité. (Figure1-4). [3]

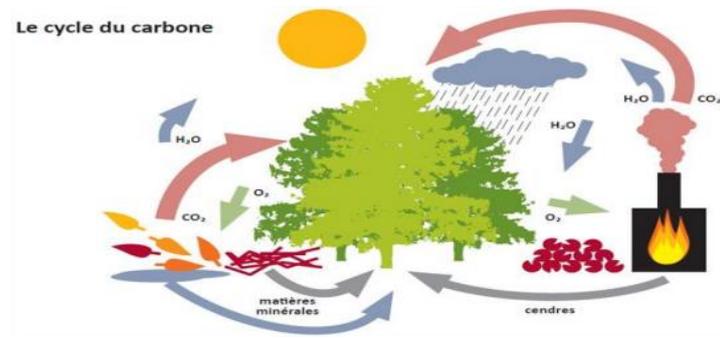


Figure 1-4 : Exemple sur l'énergie de la biomasse. [4]

Lorsqu'elle est transformée en énergie, la biomasse ne libère pas plus de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qu'elle ne l'a accumulé pendant sa croissance en une seule année. En d'autres termes, l'énergie de la biomasse est considérée comme neutre par rapport aux émissions de gaz à effet de serre. Une autre forme de gazéification est la pyrolyse. La pyrolyse nécessite plus d'air que le chauffage de la biomasse. Le gaz de gazogène est un mélange de monoxyde de carbone, d'hydrogène et de méthane ainsi que de dioxyde de carbone et d'azote.

Il est soit utilisé pour produire de l'électricité dans des turbines à gaz, soit brûlé pour produire de la vapeur. Les émissions atmosphériques de dioxyde de carbone, une source majeure de gaz à effet de serre, ne proviennent pas de la biomasse. Grâce aux cycles de repousse des plantes et des arbres, l'utilisation de la biomasse permet également de réduire les émissions de méthane, un autre gaz à effet de serre produit lors de la décomposition des matières organiques. Lorsque la biomasse est utilisée à bon escient et que les émissions de combustion sont efficacement contrôlées, elle peut fournir des quantités importantes d'énergie, être plus propre et avoir un effet de serre beaucoup plus faible que les combustibles fossiles non renouvelables tels que le charbon et le pétrole. Cependant, la combustion directe de la biomasse peut entraîner des émissions atmosphériques préoccupantes. Comme pour toute technologie de production d'énergie, il est essentiel de prendre en compte tous les aspects environnementaux avant de prendre une décision finale. [3]

1.2.5. Energie marine

Les ressources naturelles des mers et des océans sont essentielles à l'énergie marine. Ils utilisent les flux énergétiques naturels des courants, des marées et de la matière marine pour produire de l'électricité dans divers types d'installations. [1]

➤ Les différentes énergies marines

- L'énergie des marées.
- L'énergie des courants marins.
- L'énergie thermique des mers.
- L'énergie des vagues.
- L'énergie osmotique
- La biomasse marine

1.2.6. Energie Solaire

Le soleil est la plus grande source d'énergie disponible sur Terre. S'il ne brille pas tous les jours, surtout à la maison, il est un acteur majeur de la production d'énergie et son rôle devrait continuer et croître. L'énergie qui est transmise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur est appelée énergie solaire. Cette énergie est considérée comme renouvelable car elle est presque inépuisable à l'échelle du temps humain. Il existe actuellement deux façons d'utiliser le solaire. [5] : Photovoltaïque et thermique.

1.2.6.1. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par les panneaux solaires photovoltaïques ou les centrales électriques à partir du rayonnement solaire. Il est reconnu que sa source (le soleil) est inépuisable pour l'humanité, ce qui la rend renouvelable. (Figure 1-5). [6]



Figure 1-5 : Fonctionnement des panneaux photovoltaïques. [1.4]

En fin de compte, un panneau solaire générera 20 à 40 fois plus d'énergie qu'il ne l'est nécessaire pour la fabrication et le recyclage. [6]

1.2.6.2. L'énergie solaire thermique

Les technologies solaires thermiques produisent de la chaleur à partir de l'énergie solaire. Ensuite, un fluide caloporteur est utilisé pour transférer la chaleur produite par les capteurs solaires à un circuit hydraulique. En général, ce circuit comprend un ou plusieurs réservoirs, ce qui permet une alimentation à tout moment de la journée. (Figure 1-6). [5]

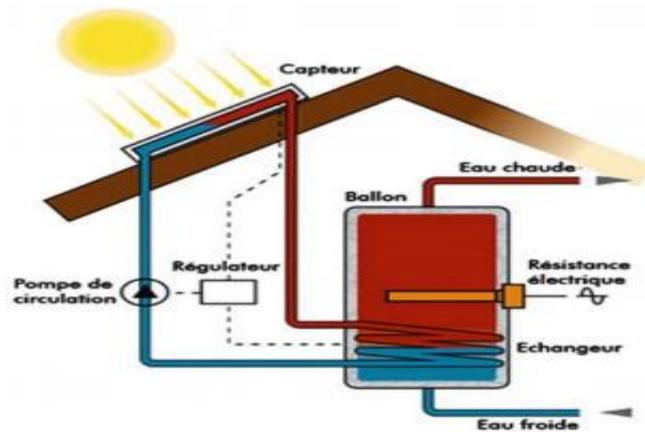


Figure1-6 : Fonctionnement des panneaux thermiques. [4]

Ainsi, après la concentration des rayons solaires, les capteurs solaires sont destinés à tous les usages à basses et moyennes températures, ce qui permet la production de vapeur pour l'industrie et la production d'électricité. (Figure 1-6). [5]

1.2.6.3. Situation géographique de l'Algérie

Le pays le plus grand d'Afrique est l'Algérie, qui s'étend sur une superficie de 2 381 741 km². Il se trouve à une latitude de 18° à 38° nord et à une longitude de 9° à 12° est. Près de Mostaganem se trouve le premier méridien international (0° Greenwich). Chaque région de l'Algérie possède son propre climat, ce qui fait de cette nation un pays immense. Le nord de l'Algérie, qui s'étend sur 1600 km de côtes, est principalement composé du bassin méditerranéen. Le climat est doux et pluvieux en hiver et chaud et sec en été. De temps en temps, des précipitations rares et inattendues ponctuent la sécheresse extrême dans la région du Sahara. L'amplitude thermique entre le jour et la nuit est saisonnière et très importante dans ces régions. Cela a un impact sur les activités humaines dans les domaines agricole et pastoral. [7]

1.2.6.4. Généralité sur l'énergie solaire

Le Soleil est un gigantesque réacteur de fusion thermonucléaire situé à une distance de 150 millions de kilomètres de la Terre et est la seule étoile du système solaire. 99,8 % de la masse totale du système solaire est représentée par cette étoile. Grâce à ses champs magnétiques exceptionnels et au recyclage de ses propres déchets, elle est de loin la source d'énergie la plus importante de notre planète. La distance entre la Terre et le Soleil varie tout au long de l'année. Tout au long de l'année, le flux de rayonnement solaire E , qui est reçu de la surface perpendiculaire aux rayons du soleil et situé à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (c'est-à-dire à une altitude d'environ 80 km), change. La valeur moyenne de la constante solaire est $E_0 = 1353 \text{ W.m}^2$. En première approximation, la valeur de E peut être déterminée en fonction du nombre de jour de l'année j par [8]

$$E = E_0 [1 + 0.033 \cos(0.984j)] \tag{1.1}$$

1.2.6.5. Potentiel solaire en Algérie

En raison de sa position géographique, l'Algérie possède certaines des réserves d'énergie solaire les plus importantes au monde (**Figures 1-7**). La majorité de la nation connaît une durée d'ensoleillement supérieure à 2000 heures et peut atteindre jusqu'à 3900 heures dans les hautes terres et le Sahara. La quantité d'énergie consommée par jour sur une surface horizontale de 1 m^2 est d'environ 5 kWh dans la plupart des régions du pays. [8]

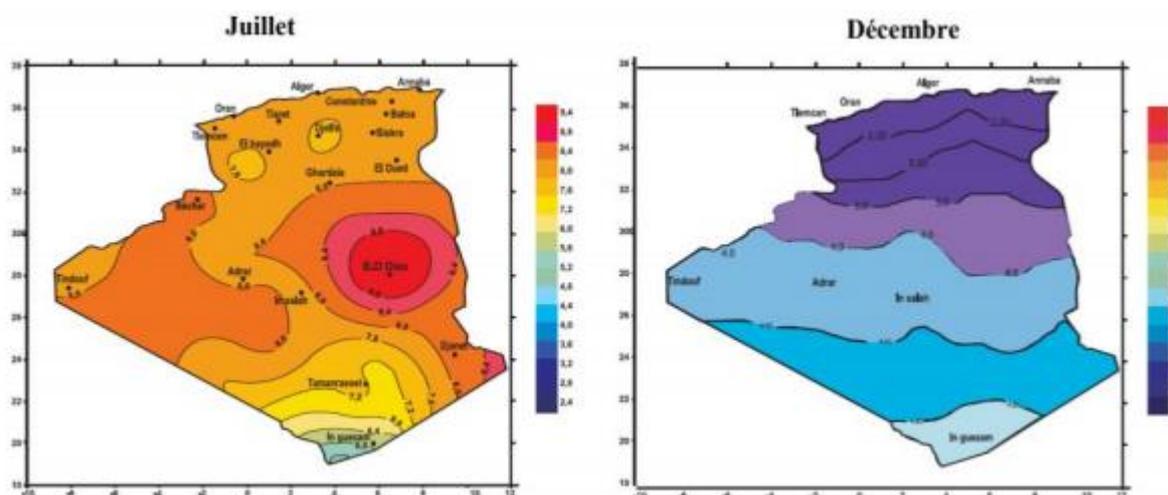


Figure 1-7 : Potentiel solaire en Algérie. [8]

• Rayonnement lumineux direct I_b

Le terme « rayonnement direct » fait référence au rayonnement reçu directement du soleil. Ou le rayonnement arrive directement au niveau du sol du disque solaire sans être perturbé. Cela peut être mesuré à l'aide d'un pyréliomètre. Si I est le rayonnement direct, le rayonnement s'écrit dans un plan horizontal. [7]

$$I_b = I \cdot \sin(h) \quad (1.2)$$

Avec : h : hauteur du soleil.

Le rayonnement I_d est diffus.

Le terme rayonnement diffus fait référence au rayonnement provenant d'obstacles tels que les nuages, le sol ou les bâtiments, qui se rencontrent dans l'atmosphère lors de collisions avec des éléments atmosphériques. Un pyranomètre de protection solaire peut être utilisé pour les mesurer. il distingue deux types de rayonnement :

- Le rayonnement isentropique diffus de la galaxie entière.
- Le rayonnement diffus de la couronne solaire.
- En raison de l'accumulation d'aérosols à basses altitudes, une bande d'horizon mince produit du rayonnement diffus horizon. [7]

• Le rayonnement réfléchi

C'est la partie du sol qui réfléchit, qui varie selon le type de site (nuages, sable, etc.). Un coefficient spécifique du type de liaison connu sous le nom d'albédo (coefficient de réflexion du sol Φ) est défini comme tel que $0 < \Phi < 1$. [8]

• L'albédo du sol

Seule une surface inclinée doit être prise en compte pour le rayonnement réfléchi. Elle est proportionnelle au rayonnement total. La terre réfléchit naturellement une partie de la lumière qu'elle reçoit.

- 10 à 25 % de sol cultivé
- Neige entre 60 et 90 %
- Sable entre 30 et 40 %

Albédo relie le rayonnement incident à celui diffusé ou réfléchi. En ce qui concerne le sol ou les nuages, cette expression est généralement employée pour décrire la valeur moyenne de

leur réflectance pour le rayonnement en question et pour tous les angles d'incidence possibles. Un corps noir sans albédo. [7]

• Le rayonnement global

Le rayonnement du soleil sur une surface horizontale et la somme des éléments précédents, tels que la montre **figure 1-8** :



Figure 1-8 : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, Globale = direct + diffus + albédo. [4]

1.2.7. Capteurs solaire photovoltaïques

Un capteur photovoltaïque est un dispositif capable de convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Comme le montre la figure, l'effet photovoltaïque (PV) est un phénomène physique qui permet à une cellule photovoltaïque (PV) de produire cette conversion d'énergie. (**Figure 1-9**). [9]

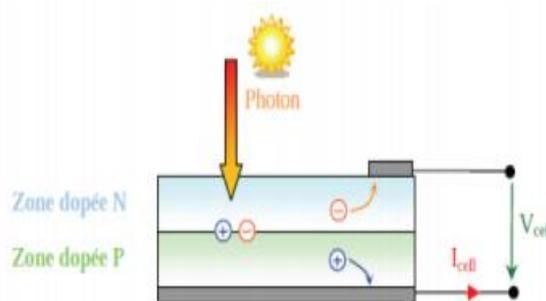


Figure 1-9 : Effet photovoltaïque. [10]

1.2.7.1. Principe de conversion

Un module photovoltaïque utilise des cellules qui sont assemblées en modules (Figure1-10) pour générer de l'électricité. Les photons sont des particules à haute énergie qui forment la lumière du soleil. [9]

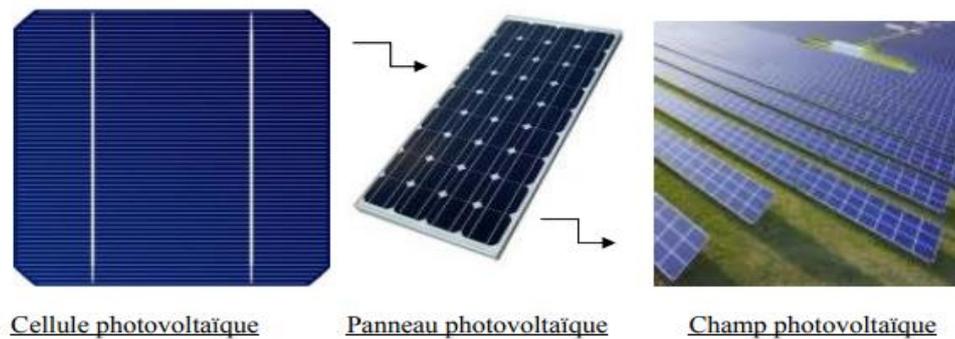


Figure 1-10 : Cellule, Panneau, Champ photovoltaïque. [11]

Lorsqu'une cellule semi-conductrice absorbe suffisamment de lumière solaire, les photons libèrent des électrons des atomes de la cellule, créant ainsi un courant électrique. [9]

1.2.7.2. Schéma équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire

Un circuit équivalent d'une diode est généralement utilisé pour modéliser une cellule solaire (Figure 1-11). L'idée est de représenter à travers la diode le courant de court-circuit influencé par l'éclairage et l'effet photovoltaïque, tandis que la résistance série et le lit parallèle représentent les pertes du module. [12]

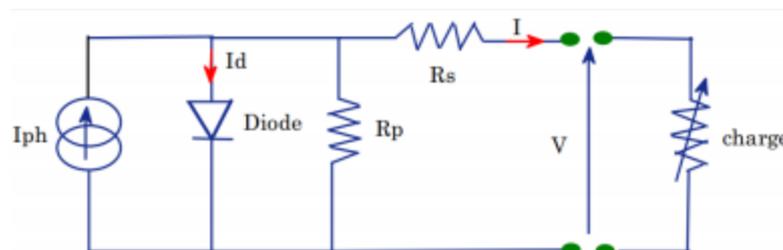


Figure 1-11 : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque. [1.13]

La formule spécifique d'une cellule solaire est fournie par :

$$I = (I_{ph} - I_0 * (e^{(V+I*R_s) * \frac{1}{\alpha * V_t}} - 1) - \frac{V - I * R_s}{R_p}) \tag{1.3}$$

Où :

I_{ph} : Le courant photonique produit par la lumière.

- I_0 : Saturation cellulaire du courant d'obscurité.
 R_p : Résistance d'un shunt Ω .
 R_s : Résistance série en Ω .
 a : Factor de référence [1.6 pour le silicium].

Le courant dans la cellule provoqué par le rayonnement solaire est appelé courant de photons. La température et l'éclairage déterminent cela. En conséquence, quelle que soit la tension externe, sa valeur reste constante. L'équation suivante fournit cela. [1.12] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_h} * (I_{phn} + K_i * (T - T_n)) \quad (1.4)$$

Où :

- I_{phn} : Courant photonique nominal en STC.
 T : Température de la cellule en Kelvin.
 T_n : Température nominale en Kelvin au STC, 25 ° C.
 K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit.
 G : Éclairement solaire en 1 kW / m².
 G_h : Rayonnement solaire en KW / cm².

La diode a le courant de saturation inverse de la cellule. Elle peut être calculée en utilisant : Elle ne dépend que de la température.

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i * (T - T_n)}{\frac{V_{ocn} + K_v * (T - T_n)}{e^{qV_i} - 1}} \quad (1.5)$$

Où :

- I_{scn} : Est le courant de court-circuit nominal au STC.
 V_{ocn} : Est la tension nominale à vide du STC.
 K_v : Coefficient de température de la tension de circuit ouvert à I_{sc}

La tension thermique est donnée par :

$$V_i = \frac{K * T}{q} \quad (1.6)$$

Où :

$$V_t = \frac{k^* T}{q}$$

avec k^* constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

1.2.7.3. Types de cellules photovoltaïques

Le "silicium", un semi-conducteur, est le composant principal de presque toutes les cellules solaires modernes. La même matière première et les mêmes procédures de base sont utilisées pour fabriquer les cellules solaires. Ils existent sous une variété de formes et de technologies. Les cellules photovoltaïques inorganiques et organiques sont classées dans deux catégories principales : les cellules photovoltaïques organiques et inorganiques. Ces catégories diffèrent en fonction des matériaux utilisés. [5]

- **Cellules photovoltaïques inorganiques**

99 % des panneaux solaires vendus dans le monde proviennent de cellules photovoltaïques inorganiques, également appelées silicium. Les cellules photovoltaïques inorganiques sont les suivantes :

- **Les cellules de silicium monocristallin**

Ils sont produits en découpant un cristal en petits morceaux qui forment des cellules. Ces cellules ont généralement une couleur bleue uniforme. Ce type de cellule a le plus haut taux de conversion. (Figure 1-12-a). [5]

- **Siliceous morphed**

Ils sont fabriqués en découpant un cristal en petits morceaux qui forment des cellules. En général, ces cellules ont une couleur bleue uniforme. Ce type de cellule a le taux de conversion le plus élevé. (Figure 1-12-b). [5]

- **Les cellules en silicium poly cristallin**

Étant donné qu'elles fonctionnent moins bien que les cellules en silicium monocristallin, elles sont moins chères. Ils sont composés de cristaux visibles de silicium. Ce type de cellule est bleu, mais d'une façon différente. (Figure 1-12-c). [5]

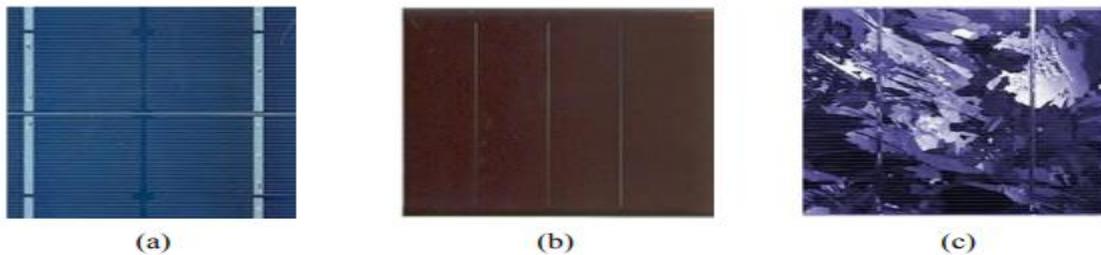


Figure 1-12 : Technologie des cellules solaires : a) monocristallines, b) amorphes, c) polycristallins. [5]

➤ **Cellules à couches minces**

De grandes cellules à couches minces qui peuvent être utilisées dans des éléments de façade, par exemple, peuvent être fabriquées à l'aide de nouvelles techniques de fabrication. Le terme "couche mince" fait référence à un type de cellule (ou module) créé en déposant une fine couche de silicium amorphe sur un substrat (verre). À ce jour, diverses technologies ont été créées et mises en œuvre (en fonction de l'alliage utilisé). [5]

• **Cellule photovoltaïque organique**

Le développement d'une chaîne d'approvisionnement respectueuse de l'environnement peut être justifié pour plusieurs raisons, dont les avantages de ces matériaux. En effet, Des méthodes industrielles de microélectronique et des procédés secs ou humides peuvent facilement les reproduire. (Figure1-13). [5]



Figure 1-13 : Cellule photovoltaïque organique [5]

De plus, il y a peu de matériaux utilisés et la couche est de 100 nm d'épaisseur. De plus, l'ingénierie moléculaire peut être utilisée pour modifier les valeurs de bande interdite et les niveaux d'énergie. [5]

1.2.7.4. Le module photovoltaïque

L'énergie solaire est utilisée par un générateur photovoltaïque pour générer de l'électricité. Il est accompli en connectant une série de modules photovoltaïques en parallèle et en série. En combinant les puissances de ses modules, le générateur produit une puissance totale. Les cellules sensibles à la fissuration et à la corrosion nécessitent également une protection environnementale. En conséquence, ils sont généralement enfermés sous une couche de plastique ou de verre. Le dispositif est appelé module photovoltaïque. **(Figure 1-14). [14]**

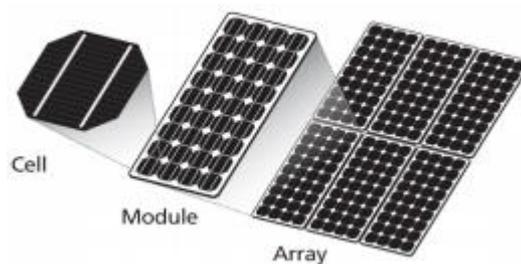


Figure 1-14 : Composants d'un générateur photovoltaïque. [14]

Pour augmenter la tension et l'intensité d'utilisation, les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle. [14]

Les cellules photovoltaïques sont connectées électriquement en série et/ou en parallèle pour générer des tensions et/ou des courants plus élevés. Les modules PV sont constitués de cellules PV interconnectées, ces modules peuvent former une unité d'un panneau PV complet. Les modules PV se composent de plusieurs modules PV assemblés en tant qu'ensemble pré-câblé et assemblé sur site, formant une unité de production d'énergie complète. [15]

Les propriétés d'un groupement de cellules parallèles sont deux fois plus importantes que celles d'un groupement de cellules en série. Ainsi, dans un groupe de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et les courants sont sommés à une tension spécifique, ce qui crée la caractéristique du groupe. Les caractéristiques résultantes (I_{Pc} , V_{Pv}) obtenues à partir de l'appariement parallèle (indice p) de cellules N_p identiques sont représentées à la **(figure 1-15). [17]** :

$$I_{Pc} = N_p * I_c \text{ et } V_{Pv} = V_c \quad (1.7)$$

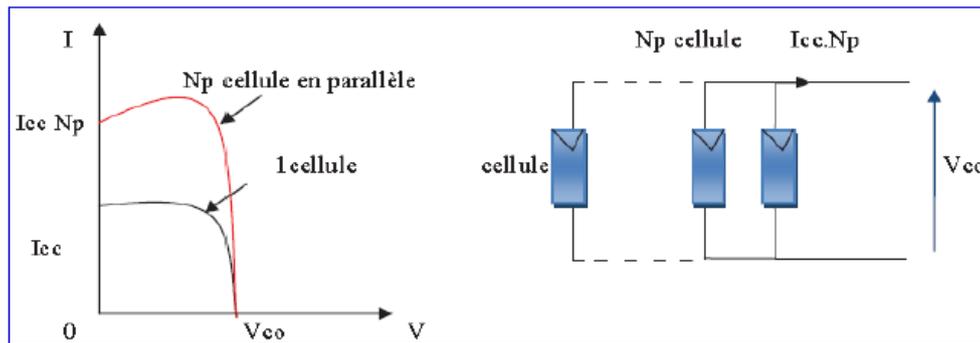


Figure 1-15 : Schéma de deux cellules photovoltaïques associées en parallèle. [16]

Le même courant traverse les cellules dans le groupement en série, et en ajoutant des tensions à un courant donné, les caractéristiques du groupement en série sont obtenues. La caractérisation résultante (I_{sc} , V_{so}) obtenue par association en série (indice s) de N_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) est présentée à la (figure 1-16) [17] :

$$I_{sc} = I_{cc} \text{ et } V_{so} = N_s * V_{co} \tag{1.8}$$

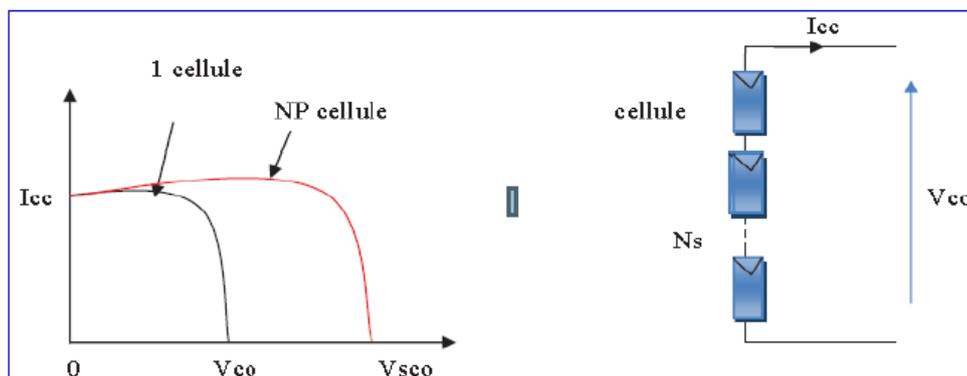


Figure 1-16 : Schéma de cellules photovoltaïques associées en série. [16]

La formule suivante détermine la puissance de sortie maximale d'un module solaire en divisant la tension V_{qp} et le courant I_{qp} . [17] :

$$P_{\max} = I_{qp} * V_{qp} \tag{1.9}$$

1.2.7.4. Les avantages et les inconvénients des modules photovoltaïques

Les avantages sont suivants :

- ✓ Lorsqu'il est utilisé, le soleil peut être considéré comme une source d'énergie propre et renouvelable qui ne produit ni gaz ni déchets nocifs. [3]

- ✓ Le système photovoltaïque ne consomme que des semi-conducteurs et un bloc. Aucun composant n'est en mouvement et aucun matériau n'est produit ou émis.
- ✓ Le système photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à un coût abordable dans les zones éloignées. [10]
- ✓ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles en raison d'un entretien limité et ils ne nécessitent pas de carburant, de transport ou de personnel hautement spécialisé. [6]
- ✓ Les panneaux photovoltaïques sont modulaires, ce qui les rend faciles à installer et adaptables aux différents besoins en énergie. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au mégawatt. [6]

Les inconvénients sont :

- ✓ En raison du rayonnement solaire, la production d'électricité est instable et imprévisible. Il n'y a pas de production d'électricité le soir et la nuit. [3].
- ✓ Un système photovoltaïque ne dure pas éternellement, mais environ 20 à 30 ans. [10]
- ✓ Le coût d'un système photovoltaïque augmente s'il faut stocker de l'électricité dans des batteries. [10]

1.2.8. Capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires sont des dispositifs qui transforment le rayonnement solaire en énergie thermique sous forme de chaleur et la transfèrent ensuite à un caloporteur, généralement de l'air ou du liquide. [3]

Un capteur solaire thermique est généralement constitué d'un cadre rigide et vitré avec une plaque et des tubes métalliques noirs qui absorbent le rayonnement solaire en chauffant un fluide caloporteur (antigel). Surveiller le (figure 1-17). [9]

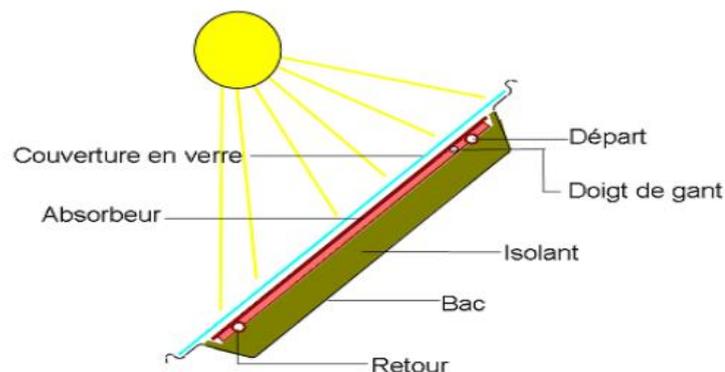


Figure 1-17 : Capteur solaire thermique [3]

L'effet de serre augmente considérablement les performances du capteur grâce à la couverture transparente. En limitant les déperditions de chaleur, la couverture protège l'absorbeur et joue un rôle important dans l'équilibre thermique. Généralement, la couverture est faite de verre. [9]

Deux caractéristiques physiques fascinantes sont présentes dans le verre utilisé : il transmet le rayonnement solaire de faible longueur d'onde (UV et visible) et absorbe le rayonnement infrarouge provenant d'une surface émettrice. L'effet de serre se produit lorsque la chaleur est bloquée entre l'absorbeur et la couverture. Taux de transmission, qui dépend du type et de l'épaisseur du verre, détermine la qualité du verre. [9]

L'absorbeur doit capter et émettre le plus de rayonnement solaire possible. En effet, lorsqu'il est chauffé, l'absorbeur génère de nouveau des rayons infrarouges. Par conséquent, le revêtement de surface est essentiel : Il contrôle les caractéristiques de l'absorbeur, telles que l'absorption α du rayonnement solaire et l'émission ϵ du rayonnement infrarouge. La surface absorbante fonctionnera le mieux lorsque $\alpha = 1$ et $\epsilon = 0$. Ces valeurs peuvent être obtenues en traitant la surface par électrochimie ou électro physique (traitement sous vide).

Par exemple, une peinture noire disponible dans le commerce peut atteindre un coefficient d'absorption de 0,9 à 0,95, mais avec un coefficient d'émission IR très élevé (0,85), qui varie selon la nature du support. [9]

Les tuyaux sont soudés sous l'absorbeur. Un fluide caloporteur (généralement de l'air, de l'eau ou un nano fluide comme dans nos travaux) circule en permanence dans ces tubes. Le liquide reçoit ses calories de l'absorbeur via ces tubes. [9]

L'isolation est essentielle pour optimiser les performances du capteur et limite les pertes de chaleur vers l'extérieur. L'arrière de l'appareil est donc isolé par une couche de polystyrène ou de laine de verre. [9]

1.2.9. Les différents modes de transferts thermiques dans un capteurs solaire

L'analyse des performances des capteurs solaires nécessite une compréhension des différents modes de transfert de chaleur. Ce qui suit explique la théorie de base du transfert de chaleur spécifiquement appliquée aux capteurs solaires. [18]

A. Transfert par conduction

Ce qui se produit est le transfert de chaleur dans un milieu opaque sans mouvement de matière sous l'influence d'un changement de température. Les vibrations des atomes ou des molécules et la transmission des électrons libres sont les deux méthodes par lesquelles la chaleur par conduction est propagée dans le corps. [3]

Le transfert de chaleur de cette manière est moindre, plus le matériau est épais et plus la densité est faible.

Dans un capteur solaire, l'énergie est absorbée par les cellules en verre et en silicium et la chaleur est dissipée à travers les intercalaires à l'avant et à l'arrière du capteur. La loi de Fourier pour les cartes unidimensionnelles en régime permanent est la suivante (**figure 1-18**) :

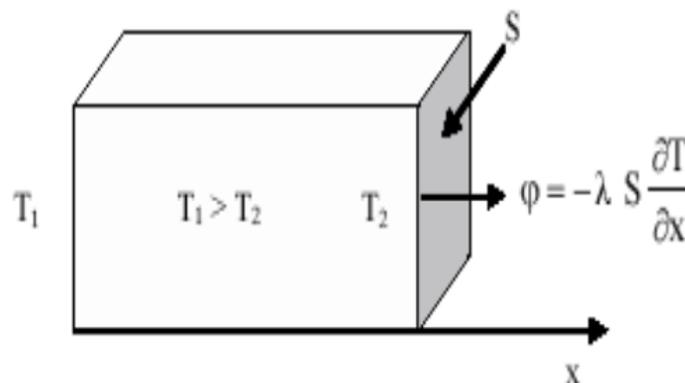


Figure 1-18 : Schéma de transfert de chaleur conductif loi de Fourier [3]

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1.10)$$

Cette équation est donnée dans le cas où k (coefficient de conductivité thermique) est une constante. [3]

Avec :

Q : Flux de chaleur exprimée en **W**.

A : Aire de la section perpendiculaire au flux de chaleur, exprimée en **m²**.

λ : Conductivité thermique du solide exprimée en **W/mK**.

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température dans la section d'aire A exprimée en **C°/m**.

B. Transfert par convection

Le type d'écoulement dans un canal, qu'il soit laminaire ou turbulent, a un impact significatif sur le transfert de chaleur. Le nombre de Reynolds du débit du canal. Le transport d'énergie provoqué par les mouvements macroscopiques est connu sous le nom de convection [4]. Il existe deux catégories de convection :

- **La convection forcée**

Le mouvement du liquide est généré par un dispositif externe (pompe). [4].

- **La convection naturelle**

Les variations de densité causées par les variations de température du fluide, comme dans le thermo circulation, provoquent le mouvement du fluide [4]. La loi de NEWTON s'applique au transfert de chaleur par convection :

$$Q = h * s * (T_p - T_f) \quad (1.11)$$

Avec :

Q : Le flux échangé par convection.

h : Coefficient de convection.

S : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p : Température de la paroi solide.

T_f : Température du fluide.

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- ✓ Le verre et l'environnement, via la convection libre ou forcée.
- ✓ La plaque et la vitre de l'absorbeur fonctionnent par convection libre.
- ✓ La convection libre entre le tube et le fluide.
- ✓ La convection libre se produit entre le fluide et l'isolant.
- ✓ Le vent est responsable de la convection libre ou forcée entre l'isolant et l'environnement. [4].

C. Transfert par rayonnement

Le rayonnement provient de l'émission et de l'absorption électromagnétique entre des corps de températures différentes et est appelé rayonnement thermique. Aucun support n'est requis pour la distribution. L'exemple le plus évident est le rayonnement solaire accumulé à la surface de la terre. Selon STEFAN-BOLTZMANN, l'émissivité d'un corps noir parfait, c'est-à-dire un parfait émetteur de rayonnement thermique, est proportionnelle à la quatrième puissance de sa température. Il peut être réécrit en émission d'énergie ou en fréquence industrielle. [18]

En raison du fait que ce mode de transmission ne nécessite pas de milieu matériel, nous nous concentrons principalement sur les échanges radiatifs qui existent actuellement. [18]

Lorsqu'une surface émet des ondes électromagnétiques et les absorbe, le transfert de chaleur par rayonnement se produit. Lorsque des corps sont séparés par un vide ou un autre milieu intermédiaire suffisamment transparent aux ondes électromagnétiques, cet échange peut se produire. [18]

La loi de Stefan-Boltzmann est la loi fondamentale du rayonnement. [18] :

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1.12)$$

Avec :

- Q : Densité de flux de chaleur émis par le corps.
- ε : Émissivité thermique du matériau.
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- T : Température absolue du corps

Avec un capteur plan, le transfert de rayonnement se produit entre :

- ✓ La vitre et le ciel.
- ✓ La vitre et la plaque chauffante.
- ✓ L'isolant et le sol. [18]

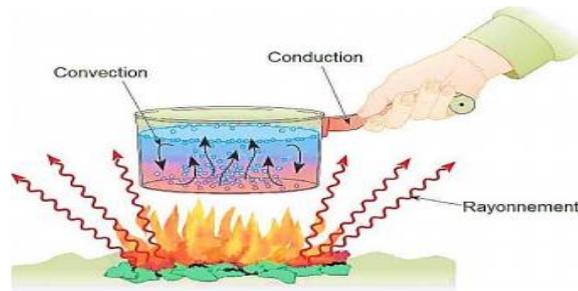


Figure 1-19 : Les trois modes de transfert thermique. [4].

D. Les différents types des capteurs thermiques

✓ Les capteurs à liquide plans sans vitrage

Les polymères noirs sont généralement utilisés pour fabriquer des collecteurs à plaques plan non émaillées, comme le montre la **figure 1-20**. Ils n'ont généralement pas d'isolation arrière ou de cadre sélective. Ils sont simplement placés sur un support en bois ou sur le toit. Même si ces capteurs bon marché captent efficacement l'énergie solaire, la perte de chaleur dans l'environnement augmente rapidement avec la température de l'eau, en particulier dans les endroits venteux. Les capteurs non vitrés sont donc fréquemment utilisés pour des applications qui nécessitent une alimentation électrique à basse température (piscines, eau d'appoint dans les fermes piscicoles, chauffage industriel, etc.) ; cependant, en raison de la forte perte de chaleur dans les climats froids, ils ne sont généralement utilisés qu'en été. [8]

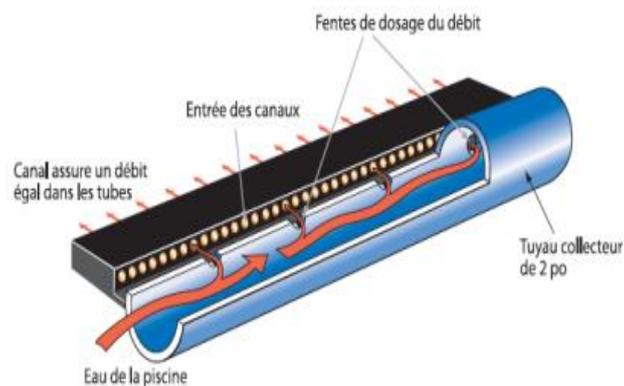


Figure 1-20 : schéma d'un capteur à liquide plan sans vitrage. [8]

✓ Capteurs à liquide plan avec vitrage

Les capteurs plans sont les plus fréquemment utilisés. Ils sont constitués de verre à l'avant et d'un absorbeur logé dans une coque isolante à l'arrière. Cet absorbeur possède une couche sélective qui réduit les pertes par rayonnement tout en augmentant l'absorption de l'énergie

solaire. Le verre augmente l'efficacité du capteur car il empêche le vent de refroidir l'absorbeur. Comme le montre la (Figure 1-21) La perte de chaleur est réduite en isolant l'arrière du capteur. [8]

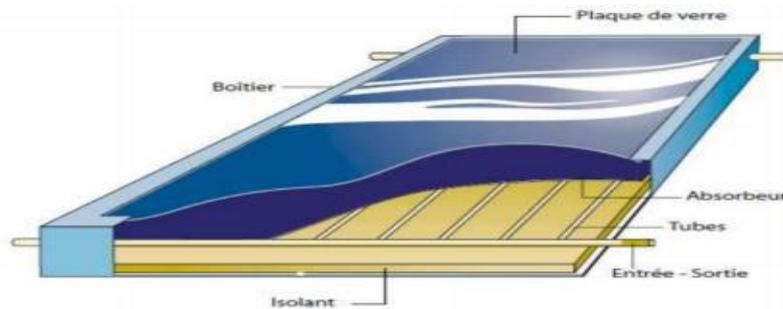


Figure 1-21 : schéma d'un capteur à liquide plan avec vitrage. [8]

✓ Capteurs solaires à tubes sous vides

Les capteurs solaires sous vide ont un absorbeur revêtu d'une surface sélective et scellé sous vide dans un tube de verre, comme le montre la figure 1-22. Ils captent efficacement l'énergie solaire et ne perdent pas beaucoup de chaleur à l'environnement. Les systèmes disponibles sur le marché utilisent un caloduc pour récupérer la chaleur de l'absorbeur. Lorsque le liquide se vaporise au contact de l'absorbeur chaud, la chaleur est récupérée en haut du tuyau lorsque la vapeur s'y condense et que le condensat reflue par gravité. Les capteurs sous vide sont idéaux pour les applications nécessitant une alimentation en énergie à moyenne ou haute température (chauffage de l'eau, chauffage des locaux et chauffage urbain industriel dans la plage de température de 60 à 80 °C en fonction). [8]

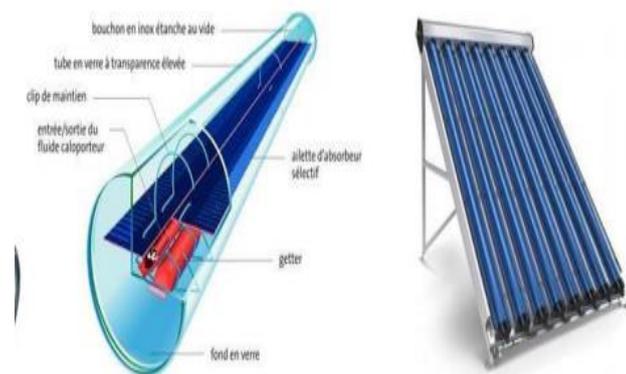


Figure 1-22 : capteurs solaires à tubes sous vides. [5]

✓ Les capteurs à concentration

Ce sont des capteurs solaires avec un système optique (réflecteurs, lentilles, etc.) qui concentre le rayonnement qui traverse une grande surface (ouverture) sur l'absorbeur.

(figure 1-23). [4]

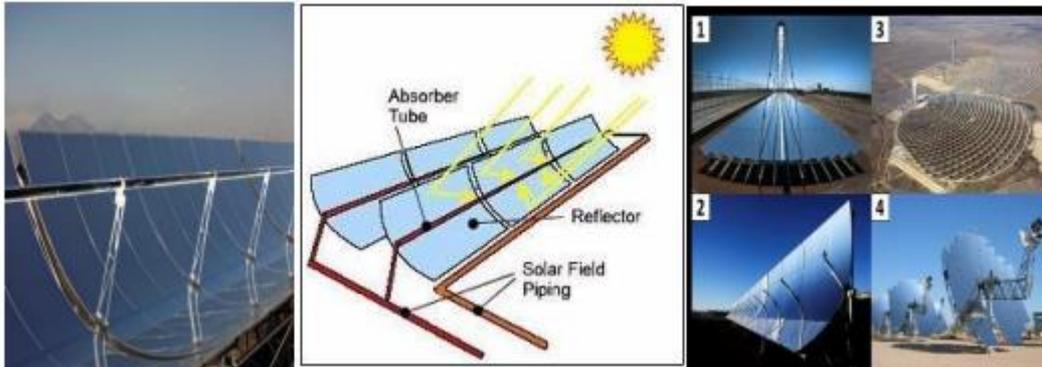


Figure 1-23 : Capteur à concentration. [5]

1.3. Le développement durable (DD)

La définition la plus courante est "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité de répondre aux besoins des générations futures", selon le rapport Brundtland. [19]

Il est indéniable que le concept de développement durable a subi une révolution majeure, mettant en lumière les nouveaux défis auxquels les sociétés sont confrontées. Il est nécessaire de repenser la mesure de la croissance économique pour inclure les aspects économiques, environnementaux et sociaux du développement durable, tout en tenant compte des besoins actuels et futurs. Il est crucial d'articuler les dimensions internationales et locales ainsi que les générations. [19]

La durabilité ne se limite pas seulement à l'environnement, comme on le suppose souvent. Il a trois dimensions :

- Préserver l'intégrité de l'environnement signifie intégrer le souci de la préservation de la vitalité et de la diversité des gènes, des espèces et de tous les écosystèmes naturels des ressources terrestres et aquatiques dans toutes les activités des communautés humaines, notamment par des mesures de protection de la qualité de l'environnement par la restauration, le développement et la conservation des habitats importants pour les espèces et par la gestion durable.
- Améliorer l'équité sociale signifie permettre la satisfaction des besoins fondamentaux des communautés humaines présentes et futures et l'amélioration de la qualité de vie, en permettant

à tous d'accéder à l'emploi, à l'éducation, aux soins médicaux et aux services sociaux, à un logement de qualité, au respect des droits de l'homme et à la participation de tous les groupes sociaux aux processus décisionnels.

- Améliorer l'efficacité économique implique d'encourager une gestion optimale des ressources humaines, naturelles et financières afin de répondre aux besoins des communautés humaines. Cela entraîne la responsabilisation des entreprises et des consommateurs sur les biens et services qu'elles fabriquent et utilisent, ainsi que l'adoption de politiques gouvernementales appropriées (principe pollueur-payeur, principe pollueur-payeur, internalisation des coûts, etc.).

1.3.1. Le développement durable et la problématique de l'énergie

Le développement des énergies renouvelables est lié au développement du développement durable. [19]

- ✓ Les énergies alternatives sont une option pour les générations à venir. Les sources d'énergie renouvelable pourraient satisfaire les demandes d'énergie actuelle et future de la population. Effectivement, ces sources d'énergie sont renouvelables et une augmentation de leur utilisation garantira une plus grande pérennité des ressources terrestres et des combustibles fossiles pour les générations à venir. Il prévient également l'épuisement des ressources naturelles tout en maintenant les conditions nécessaires à un développement durable.
- ✓ Protéger la planète : Une partie de la définition du développement durable comprend le maintien de l'équilibre mondial et la valeur du patrimoine naturel. Les énergies renouvelables remplissent parfaitement cette condition car ce sont des énergies propres, respectueuses de l'environnement et ne produisant pas de gaz à effet de serre. Il convient donc de préciser que la production d'électricité à partir de sources renouvelables réduit la part d'électricité produite par centrales électriques conventionnelles, ce qui se traduit directement par moins de déchets radioactifs à stocker pour les générations futures. [19]

1.3.3. Les perspectives des énergies renouvelables dans le monde d'ici 2050

Les énergies renouvelables joueront un rôle important dans les bilans énergétiques de demain, en termes de sécurité d'approvisionnement, de protection de l'environnement (CO₂ et déchets) et de développement local. [20]

Les énergies renouvelables sont au cœur des controverses sur l'avenir énergétique mondial (importance des ressources fossiles, rôle de l'énergie nucléaire, crédibilité du stockage du

carbone, ampleur de l'activité d'effacement, etc.). Ils sont présents dans tous les scénarios, même si dans certains ils ne contribuent que faiblement à l'approvisionnement énergétique d'une région, d'un pays, d'un continent ou du monde. [20]

1.4. Potentiel des énergies renouvelable en Algérie

La sécurité énergétique de l'Algérie peut bénéficier d'une nouvelle alternative et d'un avenir sûr grâce aux énergies renouvelables, qui répondent à la double contrainte de la rareté des énergies fossiles et du changement climatique. [21]. Il est incontestable que l'Algérie se classe parmi les nations les plus performantes en matière d'énergie renouvelable, qui englobe des sources d'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, géothermique et de biomasse. [20]

1.5. Conclusion

Il est essentiel d'utiliser les énergies renouvelables pour atteindre les objectifs de développement durable. Les sources d'énergie renouvelables sont une source d'énergie propre, abondanceuse et sans fin. Ils contribuent à la diminution de la pollution, à la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles et à la lutte contre le changement climatique. De plus, ils encouragent la création d'emplois verts, l'indépendance énergétique, la sécurité énergétique et la diversification des sources d'énergie. En somme, l'adoption des énergies renouvelables est une solution essentielle pour un développement durable et un monde plus juste, plus propre et plus durable.

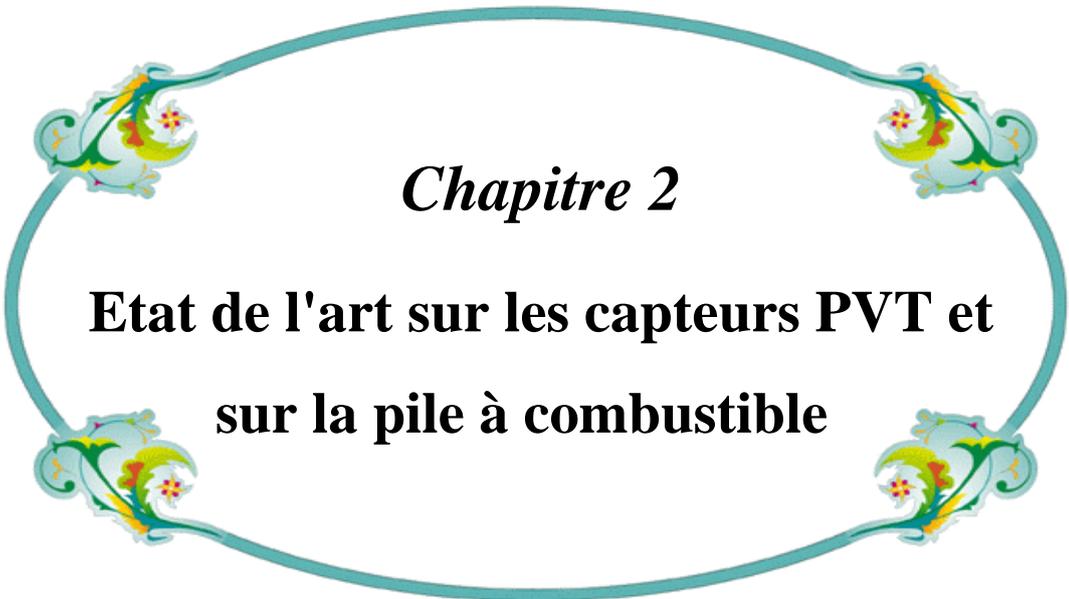
Références

- [1] Bouksara, M & Djeddi, A. E. (2022). Etude et dimensionnement d'un système de Stockage pile à hydrogène via GPV dans un site isolé (Mémoire de Master, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM).
- [2] Guessabi, A. & Bedhane, Y. (2021). Contribution à l'étude de la conversion d'énergie Photovoltaïque -triboélectrique (Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ).
- [3] Reteri, A., & Fentrouci, A. (2013). Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP (Mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKRBELKAID – TLEMCEM).
- [4] Belguendouz, M. A & Brahimi, M. (2022). Optimisation des performances d'un panneau solaire à air-Système Hybride PV/T–Etude expérimental (Mémoire de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA).
- [5] Kouki, N. (2022). Etude et Réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique destinée à usage domestique (Mémoire de Master, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [6] Daheur, M., & Taini, S. A. E. (2020). Etude et simulation du système hybride PV/Pile à combustible/Batterie (Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [7] Errahmani, A., Ben Athmane, N., & Maouedj, R. (2019). Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïques par l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV (Mémoire de Master, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [8] Benzaza, Z. (2021). Etude technique et économique de l'efficacité énergétique dans un réseau d'habitation en Algérie dans une approche de green city (Mémoire de fin d'étude, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES -T L E M C E N).

- [9] Beldjani, C.E. (2020). Amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque par l'usage de la nanotechnologie (Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER DE BISKRA).
- [10] Chibi, Z. (2016). Effet du refroidissement sur les performances des panneaux PV (Mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEN).
- [11] Guendouz, A. E. F. (2015). Intégration des réflecteurs dans les capteurs hybrides PVT à eau (Mémoire de Master, UNIVERSITE GHARDAIA).
- [12] Benadel, F. (2016). Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV (Mémoire de master, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [13] Ait Mahrez, S. & Adjeroud, B. (2020). Gestion optimale d'énergie d'un système PV/PAC avec stockage d'hydrogène (Mémoire de fin d'étude, UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1).
- [14] Mecikar, F., & Loukkas, N. (2013). Etude et commande d'un système hybride éolien-photovoltaïque connecté au réseau (Mémoire de Master, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE -ALGER).
- [15] Tabet, I. (2016). Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire (Thèse De Doctorat, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE).
- [16] Lasmi, Y. (2013). Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes (Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE SETIF 1-FERHAT ABBAS).
- [17] Belkacem, M. (2015). Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT (Mémoire de master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN).
- [18] Sedik, N. M. (2018). Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire. (Mémoire de master, UNIVERSITE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR D'ANNABA BADJI MOKHTAR, ALGERIE).
- [19] Harid, R. (2017). Les énergies renouvelables comme un levier de développement durable : Réalité et opportunités en Algérie. Revue des Sciences Humaines – UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA No :47.

[20] Hamiti, D. (2022). Les énergies renouvelables un paradigme de développement durable en Algérie Renewable energies a paradigm of sustainable development in Algeria. Journal of Advanced Economic Research//V, 7(02).

[21] Boubou-Bouziani, N. (2017). Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie. Communication science et technologie, 1(18),123-132.



Chapitre 2

**Etat de l'art sur les capteurs PVT et
sur la pile à combustible**

Chapitre 2

Etat de l'art sur les capteurs PVT et sur la pile à combustible

2.1. Introduction

Les capteurs photovoltaïques thermiques et les piles à combustible sont deux technologies innovantes dans le domaine des énergies renouvelables. Les capteurs photovoltaïques thermiques (PVT) combinent deux technologies : la génération d'électricité grâce aux cellules solaires et la génération de chaleur grâce aux échangeurs thermiques. Cependant, les piles à combustibles produisent de l'énergie en combinant l'hydrogène et l'oxygène dans une réaction chimique qui crée de l'eau et de la chaleur. Ces deux technologies offrent des avantages considérables en matière de durabilité et de fiabilité et sont susceptibles d'avoir un impact significatif sur l'avenir de la production d'énergie. Les capteurs hybrides PVT et les piles à combustibles produisent tous deux de l'électricité et de la chaleur, ce qui les rend générateurs d'énergies CO.

Dans ce contexte, cet état de l'art a pour objectif d'examiner les dernières avancées en matière de capteurs photovoltaïques thermiques et de piles à combustible, ainsi que les perspectives d'avenir pour leur utilisation dans divers secteurs d'activité.

2.2. Capteurs hybrides PVT

En utilisant un caloporteur (eau, air, etc.), un capteur solaire thermique transforme généralement le rayonnement solaire en énergie thermique utilisable. (**figure 2-1**). [1]

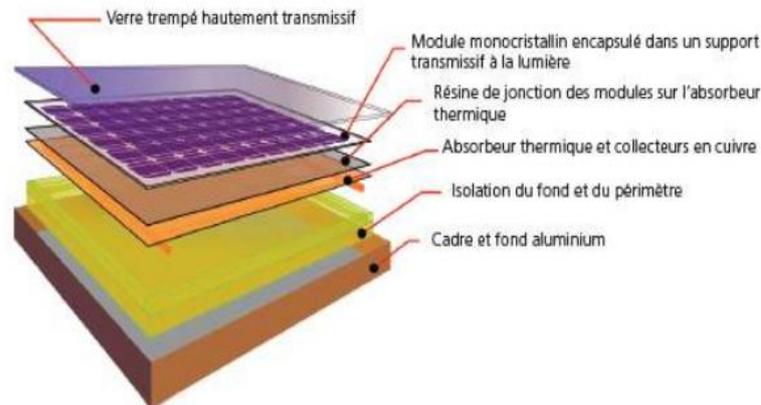


Figure 2-1 : Composants d'un capteur hybride PVT [2]

Le concept est de superposer les deux fonctions de l'électricité et de la chaleur. Dans de tels dispositifs hybrides, les cellules photovoltaïques agissent comme des absorbeurs de chaleur et sont refroidies par la circulation d'un fluide caloporteur sur leur W face arrière. Il existe différentes configurations de capteurs, qui se distinguent principalement par le type de liquide utilisé (eau, air ou bi-fluide) et le type d'absorbeur (air, concentrateur, etc.).[3]

2.2.1. Etude et synthèse bibliographique sur le capteur hybride PVT

Nous présentons une synthèse des résultats et des projets de capteurs solaires hybrides (PVT). Il est important de souligner que les études concernant les capteurs solaires ont commencé dans les années 1970 et ont connu une augmentation significative dans les années 1980 [4]. Le travail de Wolf et Kernet Russell sur la conception et le fonctionnement des capteurs PVT utilisant de l'eau ou de l'air a été la première étape dans le domaine des capteurs PVT [5]. En 1978, Kern et Russel ont fourni les bases du fonctionnement des capteurs solaires utilisant l'eau ou l'air comme fluide caloporteur dans une étude. Un modèle théorique d'un système PVT hybride basé sur des corrélations liées aux panneaux solaires conventionnels a été développé par Hendrie en 1982. [4]. Florschuetz, Cox et Raghuraman ont suivi cela en 1985 en créant un logiciel de simulation pour tester les performances des capteurs d'air PVT, mettant l'accent sur comment les propriétés optiques du verre affectent les performances thermiques et électriques. [5]. En 1986, Lalovic et al. ont proposé un nouveau type de cellules a-Si transparentes amorphes comme solution économique pour la construction de modules photovoltaïques. [4]. Sopian et al. (1996), Garg et Adhikari, Brinkworth et al., Moshfegh et Sandberg ont proposé une étude théorique et expérimentale des phénomènes thermiques et aérauliques dans une lame d'air permettant une ventilation naturelle sous une façade photovoltaïque et un toit de panneaux photovoltaïques. Cette étude a été suivie de l'étude de Brinkworth. Eker et al. Rapportent les résultats de la surveillance du système BIPVT, tandis que Bazilian et al. ont examiné plusieurs modèles expérimentaux de train d'atterrissage intégré au système PVT d'avion. Chow a rapporté avoir utilisé des systèmes PVT pneumatiques, Les recherches de Hausler et Rogash concernant ce sujet reposent sur la création de dispositifs de stockage thermique utilisant le capteur PVT, tout comme ceux de Kalogirou. Huang et al. ont présenté un système PVT avec un réservoir d'eau chaude, tandis que Sandness et Rekstad ont rapporté des résultats pour un PVT avec un absorbeur en polymère. Zondaga et al. ont publié des modèles PVT d'eau dynamiques et en régime permanent 3D, 2D et 1D.

Ces dernières années, des travaux expérimentaux ont été menés sur les systèmes PVT à eau et à air, y compris l'utilisation de réflecteurs diffusants. [5]

D'autres études visent à optimiser les performances des modules photovoltaïques actuels en améliorant leurs conditions de fonctionnement (comme leur inclinaison ou leur orientation...) ou en proposant des configurations géométriques inédites. Par conséquent, ils impliquent des changements dans les dimensions ou les caractéristiques des matériaux constitutifs (isolants thermiques, absorbeurs, cellules photovoltaïques, etc.) ou des caloporteurs. Ces améliorations visent à augmenter la quantité d'énergie solaire absorbée et le transfert de chaleur entre le fluide chauffant et l'absorbeur tout en réduisant les pertes de chaleur externes du capteur solaire hybride. [4]

La majorité de notre approvisionnement en énergie renouvelable et notre utilisation directe du rayonnement solaire proviennent du soleil. Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en énergie thermique. Un liquide ou un gaz est chauffé et pompé dans un capteur thermique, ou il peut être mis en circulation dans un circuit par convection thermique et utilisé pour le chauffage d'espaces domestiques ou industriels. La lumière du soleil est transformée directement en électricité par des cellules photovoltaïques. La principale distinction entre les systèmes solaires et photovoltaïques est que les premiers produisent de la chaleur tandis que les seconds produisent de l'électricité. La température des cellules solaires et l'efficacité du module augmentent car les cellules solaires utilisent seulement une petite partie du rayonnement solaire incident pour produire de l'électricité. La température des cellules photovoltaïques peut être réduite grâce au refroidissement par circulation naturelle ou forcée. L'utilisation d'un système thermo-photovoltaïque (PVT), qui combine la cellule photovoltaïque avec des dispositifs de dissipation thermique, est une alternative à la cellule photovoltaïque. [4]



Figure 2-2 : Systèmes d'exploitation de l'énergie solaire. [4]

En refroidissant le module PV en même temps, le rendement électrique reste à un niveau satisfaisant et le collecteur PVT offre ainsi une meilleure façon d'exploiter l'énergie solaire tout en augmentant le rendement global. Les caractéristiques intéressantes du système PVT sont :

- ❖ L'électricité et la chaleur peuvent être générées avec le même système.
- ❖ Le rendement combiné est toujours plus élevé lors de l'utilisation de deux systèmes indépendants et est particulièrement intéressant en BIPV où la distance entre les toits est limitée.
- ❖ La génération de chaleur peut être utilisée à la fois pour le chauffage et le refroidissement à sec selon la saison, et est pratique pour un usage domestique.
- ❖ Il peut être facilement modernisé/intégré dans la structure sans modifications majeures et le remplacement du toit par un système PVT peut réduire la période de récupération.

[2.4]

2.2.2. Concept de capteur hybride photovoltaïque thermique

Le concept du capteur hybride photovoltaïque thermique repose sur l'association des deux fonctions de l'électricité et de la chaleur. Il se caractérise par une combinaison de couches qui séparent l'air et l'eau. Le fluide caloporteur est canalisé et permet une circulation forcée. Le sol est isolé et il n'y a pas d'absorbeur. [3]

➤ Concept hybride PVT à eau

Un module photovoltaïque qui convertit la lumière du soleil en électricité et se compose de trois couches (**figure 2-3**). [3]



Figure 2-3 : Capteurs solaires thermique à eau. [6]

La face avant du module est exposée au rayonnement, la deuxième couche contient des cellules photovoltaïques et la troisième couche représente l'arrière du module. Cela garantit un bon contact thermique entre les deux composants et permet au fluide caloporteur de circuler et de dissiper la chaleur stockée par la plaque absorbante. Enfin, les parois doivent être isolées avec une ou plusieurs couches d'isolant pour réduire les pertes de chaleur du système. [3]

➤ **Concept hybride capteur photovoltaïque thermique à air**

Un système hybride à air-thermique combine un module PV générateur d'électricité avec un capteur thermique situé derrière ce panneau. La chaleur résiduelle du capteur photovoltaïque est transférée par conduction et convection dans le conduit du capteur thermique, car la ventilation du capteur photovoltaïque améliore son rendement électrique (**figure 2-4**). [3]



Figure 2-4 : Prototype de modèle PVT à air réalisée à l'URAER. [4]

L'utilisation de ces capteurs hybrides ne se limite pas au chauffage, mais peut également être utilisée pour la ventilation. Il convient également de noter que ces systèmes sont hautement adaptables à différentes configurations de bâtiments. [3]

➤ **Capteur solaire hybride PVT de concentration**

Les systèmes photovoltaïques à concentration (CPV) sont capables de fonctionner à des températures supérieures à celles des capteurs plans. Ils produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur à des températures moyennes en collectant la chaleur émise par le système CPV et en la transférant au système CPV thermique (CPVT). L'utilisation de CPVT en combinaison avec des réflecteurs de focalisation offre un potentiel considérable pour augmenter la puissance de sortie d'une zone spécifique de cellules solaires. Des recherches sont actuellement en cours pour créer un capteur solaire CPVT capable de produire plus de chaleur et d'électricité. Les chercheurs ont travaillé dans ce sens, permettant aux systèmes hybrides polyvalents de répondre à la demande croissante d'électricité et de chaleur tout en protégeant l'environnement. (**figure 2-5**). [7]



Figure 2-5 : Prototype concentrateur CPVT. [7]

Ce type de système de concentration a un rendement plus élevé que les collecteurs conventionnels, mais il ne peut être atteint qu'en maintenant une température aussi basse du module PV. Les dispositifs optiques réfractifs et réfléchissants utilisés dans les systèmes solaires à concentration sont caractérisés par des rapports de concentration (CR). Les systèmes à concentrateur dont la CR est supérieure à 2,5 doivent utiliser un suiveur solaire, tandis que les systèmes à concentrateur dont la CR est inférieure à 2,5 peuvent utiliser des concentrateurs fixes. Le mode de refroidissement approprié et la répartition uniforme du rayonnement solaire concentré sur la surface du module PV contribuent au bon fonctionnement du système et à la conversion efficace d'une puissance électrique élevée. [4]

Certaines études sur la concentration des capteurs solaires avec des réflecteurs à faible concentration et avec l'intégration de concentrateurs paraboliques (CPC). [4]

2.3. La Pile à combustible

Une pile à combustible est une cellule dans laquelle une tension électrique est générée par l'oxydation d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) au niveau d'une électrode en combinaison avec la réduction d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air, est généré à l'autre électrode (**figure 2-6**). [8]

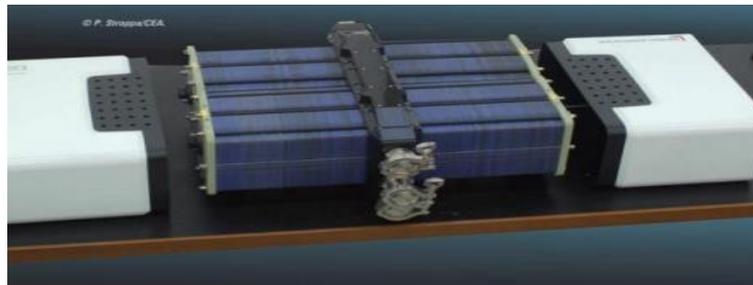


Figure 2-6 : Pile à combustible [7]

Les piles à combustible sont des dispositifs de production d'électricité et sont considérées comme des sources d'énergie en raison de leur haute densité énergétique. [8]

L'énergie chimique est transformée en énergie électrique par des piles à combustible (PAC). Sa technologie, qui a été découverte il y a plus de 150 ans, est devenue de plus en plus populaire au cours des dernières décennies. [9]. En 1838, le professeur Christian Friedrich Schönbein a découvert l'effet physico-chimique de la pile à combustible en observant un courant électrique provoqué par la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène. [10].

En 1839, Sir William Grove, un avocat et chimiste amateur anglais, décrit une expérience utilisant de l'oxygène et de l'hydrogène pour produire de l'eau et de l'électricité. L'expérience Grove a conduit à la construction d'une installation de stockage de gaz, qui a ensuite été renommée pile à combustible. Toutefois, pendant que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor, la découverte de W. Grove n'a pas été exploitée et a été reléguée au statut de curiosité scientifique. [9]

De nouveaux concepts utilisant des électrolytes fondus à haute température ont été développés depuis 1855. En 1939, le bilan des recherches du premier siècle est plutôt pessimiste, malgré le potentiel indéniable du secteur. Les résultats sont modestes. Cependant, alors que les machines thermiques, les accumulateurs et les piles électriques se développent, la technologie est plus ou moins oubliée. Cependant, les scientifiques ont continué d'être intéressés par cette technologie :

- ❖ En 1889, L. Mond et C. Langer ont introduit les catalyseurs, également appelés platine, et ont amélioré l'électrolyte.
- ❖ En 1921, E. Baur comprend l'importance de la cinétique et crée une cellule capable de fonctionner à des températures élevées (1000 °C). [10]
- ❖ Au début du siècle, l'électrolyte a été amélioré grâce à l'introduction de nouveaux matériaux tels que des carbonates fondus, des oxydes solides et de l'acide phosphorique, qui seront utilisés pour créer les différents types de piles qui existent actuellement. [10]

Trois groupes de recherche (aux États-Unis, en Allemagne et en URSS) ont repris les études sur les principaux types de générateurs après 1945, ce qui a conduit aux améliorations technologiques nécessaires au développement "industriel". Les idées actuelles sont issues de ces

recherches, telles que celles de Siemens et Pratt. Les piles à combustible ont été utilisées pour la première fois dans les programmes spatiaux dans les années 1960, tels que GEMINI, APPOLLO et Spacelab. A cet effet, des piles à membrane (General Electric) et des piles alcalines sous pression (Pratt et Wittney) ont été créées. [10]

En 1932, le Dr Francis Bacon poursuit les travaux initiés par W. Grove et parvient à créer une pile à combustible de 5 kW en 1959. La NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) a contribué au développement de la pile à combustible dans le but de produire de l'électricité à bord de ses navires spatiaux. Puisque l'oxygène et l'hydrogène étaient présents dans les systèmes de propulsion, la pile à combustible s'est avérée être le système idéal. Les piles à combustible ont été utilisées avec succès dans la capsule Gemini en 1964, et la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène utilisés par les astronautes a produit de l'eau. C'est l'une des premières utilisations réelles des batteries. [9]

Depuis les années 1970, de nombreuses grandes entreprises industrielles ont participé à de nombreux projets de recherche, souvent financés par le gouvernement, dans le cadre de programmes nationaux ou internationaux liés à la diversification énergétique ou à la protection de l'environnement. [10]. Il y a depuis 1973 que l'utilisation des piles à combustible dans les transports suscite l'intérêt. Le premier choc pétrolier a poussé les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher des alternatives aux énergies fossiles pour garantir l'indépendance énergétique. De nombreuses mesures ont été prises pour réduire les coûts de fabrication des systèmes de pile à combustible, améliorer leur fiabilité et leur compacité. [9]

La société Ballard, qui est maintenant l'un des leaders mondiaux dans le domaine des piles à combustible, a fabriqué le bus à pile à combustible en 1993 en collaboration avec le constructeur automobile Daimler-Benz. La pile à combustible était de type PEM (Proton Exchange Membrane). Le méthanol était transformé en hydrogène à bord pour alimenter la pile à combustible. Depuis les années 1990, l'hydrogène et les piles à combustible sont considérés comme des candidats potentiels pour la production d'énergie propre et durable pour les applications mobiles et fixes. [9]

Depuis 1998, l'offre commerciale s'est développée chaque jour. Bien que certains secteurs semblent être à maturité économique, d'autres ont encore des défis technologiques à résoudre pour devenir compétitifs, fiables et sûrs, selon nos connaissances actuelles. [10].

Le type PEM (Proton Exchange Membrane, également connu sous le nom de PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell)) est le type de pile à combustible le plus couramment utilisé dans les

applications automobiles. Ce choix a plusieurs raisons. Les travaux de Lachaize 2004, Emadi et al. 2005 et Boettner et al. 2002 ont été publiés. [11]

2.3.1. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un appareil capable de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique sans passer par des processus thermiques ou mécaniques externes. Bien qu'il existe de nombreux types de piles à combustible, toutes ont les caractéristiques suivantes :

Ils sont principalement composés de deux plaques (plaques bipolaires) qui servent à alimenter le gaz, à fournir du courant et à résister mécaniquement, ainsi que de deux électrodes (anode et cathode) qui sont séparées par un électrolyte. [8]

- La réaction d'oxydation électrochimique du composé hydrogène (carburant) commence à l'anode. (figure 2-7).

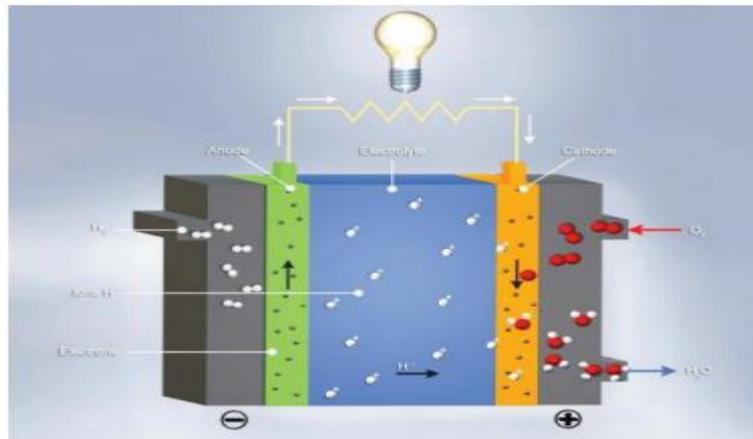
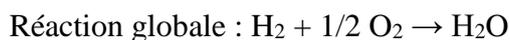
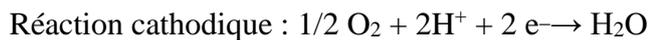
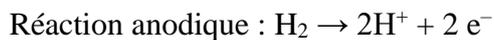


Figure 2-7 : principe de fonctionnement de la pile à combustible [7]

Dans une pile à combustible à hydrogène PEMFC à membrane solide acide, deux réactions électrochimiques se produisent successivement [8] :



2.3.2. Différents types de piles à combustibles

Il existe différentes technologies de pile à combustible (**Figure 2-8**) caractérisées par le type d'électrolyte, la température de fonctionnement et les gaz utilisés.

En 2005, plus de 14 500 unités de PAC ont été produites dans le monde. La technologie dominante est la pile à combustible PAC (**PEMFC** Proton Exchange Membrane Fuel Cell), la technologie la plus flexible et la seule véritablement développée pour le marché automobile. Cependant, d'autres technologies se propagent lentement, créant une industrie plus dynamique et robuste. [7]

Pour des fortes puissances, les piles à combustible à carbonate fondu (**MCFC** Molten Carbonate Fuel Cell) restent la technologie privilégiée. Les piles à combustible à oxyde solide (**SOFC** Solid Oxide Fuel Cell) rencontrent encore des difficultés pour passer des unités de recherche aux démonstrateurs en conditions réelles de fonctionnement, malgré les énormes progrès de ces dernières années. Bien que le nombre de piles à combustible à acide phosphorique (**PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell) soit resté pratiquement inchangé en 2005. [7]

Les piles PEMFC représentent près de 100 % du marché des véhicules à moteur pour les plus petites puissances. Cependant, elles ne sont actuellement pas présentes sur le marché stationnaire majeur au-dessus de 50 kW. Les piles SOFC ont également été introduites sur le marché des transports, mais principalement comme générateurs auxiliaires de puissance (APU) (jusqu'à 3 à 5 kW) [2,7] et piles alcalines. [12]

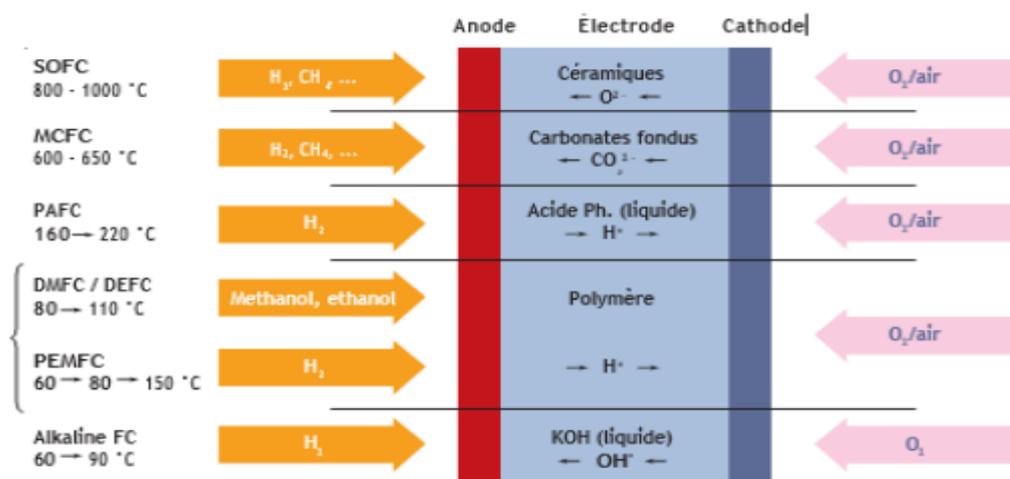


Figure 2-8 : différents types de piles à combustible [7]

Le **tableau 2-1** regroupe les principales caractéristiques des différentes technologies de pile à combustible [12] :

Tableau 2-1 : Les différents types de pile à combustible [12]

	PEMFC	DMFC	PAFC	AFC	SOFC	MCFC
Classe	Basse Température				Haute Température	
Température	70 à 100°C	70 à 90°C	150 à 220C	50 à 250°C	700 à 1050°C	600 à 800°C
Electrolyte	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Potasse (KOH) liquide	Céramique solide	Sel de carbonate fondu liquide
Combustibles possibles	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...
Gamme de puissance	1W à 10MW	1W à plusieurs kW	200kW à 10MW	1W à 100kW	1kW à 100MW	500kW à 10MW
Rendement Electrique	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	55 – 60%	50 – 55% 70% en cogénération	50 – 60%
Applications	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements portable	Transport, Equipements portable	Stationnaire, Cogénération, Transport	Spatial, Défense, Equipements portables	Stationnaire, Cogénération	Stationnaire, Cogénération
Principaux constructeurs	Ballard Nuevera Axane Helion	Siemens Hitachi Sanyo	Siemens Ifc (onsi) Fuji	Siemens Fuji Zevco Ifc	Siemens- Westinghouse Sulzer	IFC Hitachi Fuji

2.3.2.1. Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)

L'utilisation de la pile à combustible La plupart des prototypes ont utilisé le PEM, qui est actuellement la pile la plus prometteuse pour les applications automobiles et stationnaires. Dans ce travail, nous nous concentrons exclusivement sur ce type de pile à combustible. [10]

Dans les années 1980, la technologie a connu une avancée significative grâce à la création des membranes Nafion, produites par Dupont de Nemours. Ces membranes ont ouvert la voie à l'utilisation de la technologie des piles à combustible dans de nombreuses applications. La PEMFC maintient l'eau liquide dans la membrane à une température d'environ 80 °C. La membrane polymère mince de l'électrolyte facilite le passage des protons (H^+). Les électrodes ont été traitées avec un catalyseur à base de platine. S'il n'est pas éliminé pendant le processus de purification, ce catalyseur peut absorber le monoxyde de carbone, ce qui réduit l'efficacité de la pile à combustible. De nombreux laboratoires cherchent des catalyseurs plus durables et moins chers, ainsi que des électrolytes polymères échangeurs d'ions plus efficaces et moins chers. Les plaques de graphite, les matériaux composites ou les métaux à base de carbone peuvent être utilisés pour fabriquer des plaques bipolaires. Une pile à combustible a naturellement une tension très faible. Pour obtenir une tension suffisamment élevée pour les traiter électriquement avec une efficacité satisfaisante, les fabricants connectent plusieurs cellules électrochimiques en série. [10]

La figure 2.9 montre la structure d'une pile à combustible PEM. Les gaz s'échappent dans la direction x des canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). La membrane est humidifiée grâce à l'ajout de vapeur aux gaz. [10]

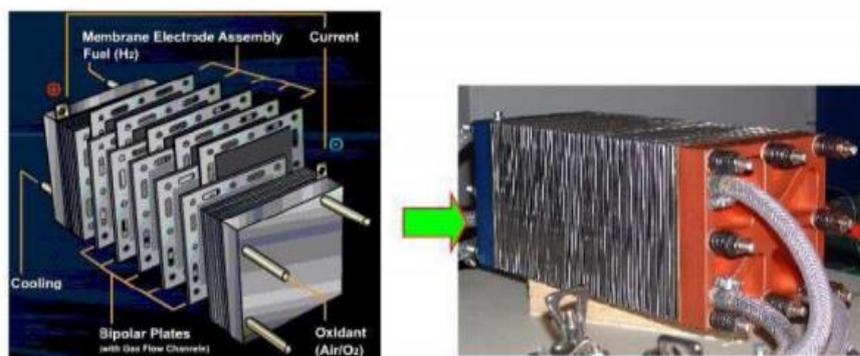


Figure 2-9 : Structure d'une pile de cellules PAC. [10]

Les couches de diffusion (100-500 micromètres) distribuent les gaz uniformément aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches sont les électrodes de la cellule, et les

particules de platine agissent comme catalyseur en étant déposées sur un support en carbone sur la membrane. [10]

2.3.2.2. Architecture du stack PEM

La tension idéale du circuit ouvert d'une pile à combustible est de 1,23 volts dans des conditions standard. La tension d'une vraie pile à combustible dans un circuit ouvert est d'environ 1 volt, mais lorsqu'elle est complètement chargée, elle est d'environ 0,5 à 0,7 volts. Afin d'obtenir une tension élevée, plusieurs cellules doivent être connectées en série pour former un empilement. Actuellement, il existe des piles de 100 à 120 cellules, soit des tensions nominales de 60 à 80 V. Actuellement, le courant produit est d'environ 0,5 A.cm⁻² et est directement lié à la surface active des cellules. [11]

La cellule principale d'une pile à combustible est composée d'un empilement de deux électrodes poreuses séparées par un électrolyte solide. De chaque côté de l'électrode, il y a deux couches de diffusion et deux plaques bipolaires. (figure2-10). [11]

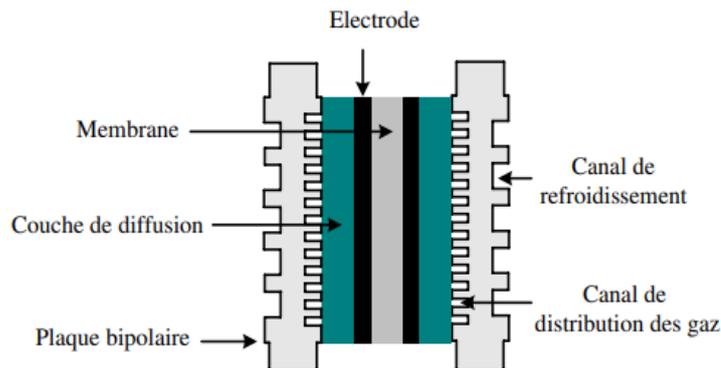


Figure 2-10 : Elément de base d'une cellule de pile à combustible PEM. [11]

A. L'électrolyte

C'est le principal composant de la pile à combustible. Il facilite le passage des espèces ioniques (au lieu des électrons) de l'anode à la cathode. La température de fonctionnement de la pile est déterminée par ces électrolytes. Chaque type de cellule a une conductivité ionique, une étanchéité aux gaz, une résistance aux réactifs chimiques et des caractéristiques mécaniques. De plus, des limites supplémentaires varient selon le type de pile, y compris la température, les composants gazeux, les ions traversant l'électrolyte et les conditions de pression. L'électrolyte se présente sous la forme d'une membrane solide d'une épaisseur typique d'environ cent micromètres (100 μm) dans les PEMFC. Cette membrane doit posséder les caractéristiques suivantes

- ❖ Un bon conducteur ionique, en particulier un conducteur protonique (H⁺) pour les PEM.
- ❖ Un isolant électronique efficace. Il est imperméable à l'oxygène et à l'hydrogène.
- ❖ Une excellente résistance mécanique aux chocs thermiques, de pression et d'hydratation.

Ils contiennent des groupes échangeurs de protons acides dans leurs structures polymérisées (d'où leur nom de membranes d'échange de protons : PEM), généralement avec une terminaison -SO₃H- ou COOH, ce qui permet le transfert des protons de l'anode à la cathode. [10]

B. Plaques bipolaires

La tâche principale des plaques bipolaires est d'assurer que les gaz atteignent la surface de la couche de diffusion. Ils sont à base de graphite et contiennent des canaux qui permettent au gaz de s'écouler le long de la surface. Il y a généralement des canaux à l'arrière de chaque plaque qui drainent le liquide de refroidissement du système (**Figure 2-10**). L'architecture des canaux et des circuits de refroidissement fait encore l'objet de nombreuses études. Les plaques bipolaires servent également à collecter le courant et à assurer la connexion électrique en série des cellules. [11]

C. Electrodes

Les électrodes ont une triple fonction :

- ❖ Supporter le catalyseur finement divisé et permettre son contact avec les gaz.
- ❖ Permettre aux espèces protoniques de se déplacer depuis les sites catalytiques d'oxydation de l'hydrogène vers les sites où l'oxygène est réduit grâce à la présence de polymère ionique.
- ❖ Evacuer les électrons des sites catalytiques anodiques et redistribuer ces électrons sur les sites catalytiques cathodiques. [13]

Ce type de pile utilise du platine pur ou un alliage avec un élément de transition comme Cr, Mn, Ni, Co et Fe. Seul ce métal précieux possède une capacité électro catalytique adéquate pour réduire l'oxygène et oxyder l'hydrogène, et il est capable de résister à la corrosion (dissolution) progressive dans ce milieu chimique très acide. La teneur en platine de l'électrode est comprise entre 0,01 et 1 mg/cm². Ces électrodes sont fabriquées en déplaçant de très petites particules de platine (2 à 3 nanomètres sur de la poudre de carbone), des particules de poly tétra fluoro

éthylène (PTFE) et un électrolyte polymère liquide sur un tissu ou un feutre de carbone conducteur. Ils peuvent être fabriqués à partir de plusieurs couches de laminage. Les électrodes sont assemblées et pressées de part et d'autre de la membrane à l'aide d'une pression à chaud. L'épaisseur de l'unité électrode-membrane-électrode (EME) est inférieure à un millimètre. Ces ensembles EME sont intégrés entre deux plaques bipolaires. [13]

D. Couches de diffusion

Les couches de diffusion assurent une bonne répartition des gaz sur toute la surface de réaction, surface active de l'électrode. Ils doivent avoir une bonne résistance mécanique à la température et à l'eau. [11]

2.3.2.2. Hydrogène

Le plus petit élément est l'hydrogène. C'est l'élément le plus abondant de l'univers, le neuvième le plus abondant sur Terre et le deuxième le plus abondant dans les océans. Il a été initialement identifié par Cavendish en 1776 et a été proposé sous le nom de Lavoisier en 1787. Le nom provient du grec et signifie "produire de l'eau". L'eau est formée par l'hydrogène et l'oxygène. (figure2-11). [13]

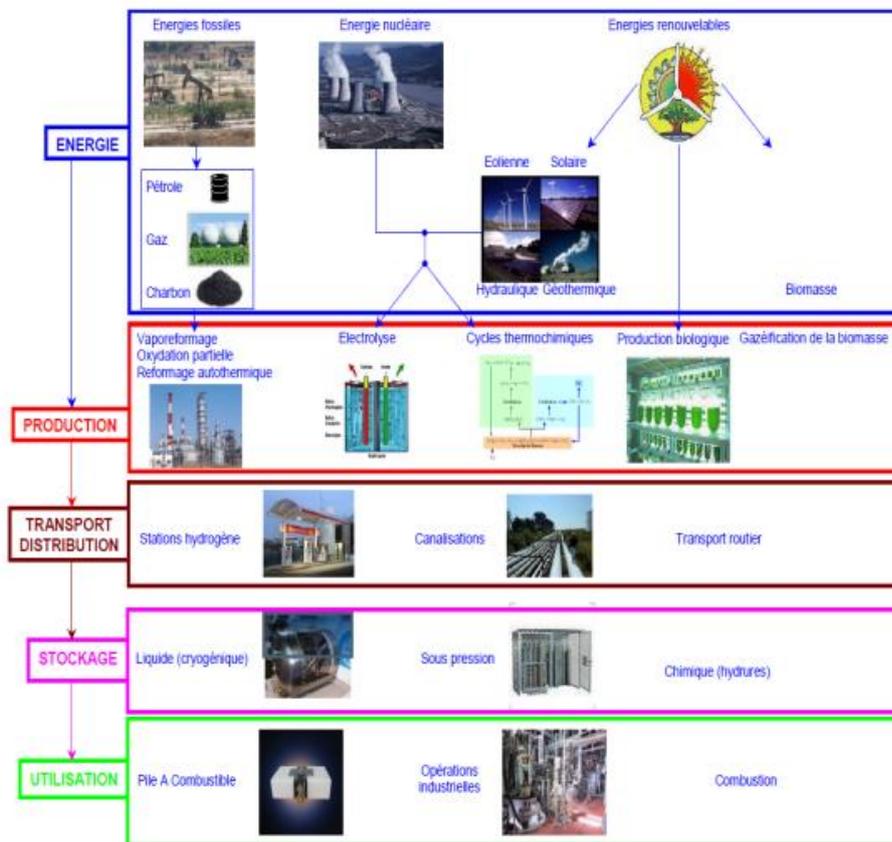


Figure 2-11 : Synthèse de la filière hydrogène. [13]

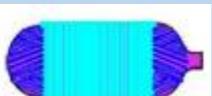
L'hydrogène produit plus d'énergie que tout autre type de combustible. L'hydrogène est 2,4, 2,8 et 4 fois plus élevé que le méthane, l'essence et le charbon en comparant leurs pouvoirs calorifiques. L'avantage de cette consommation d'hydrogène est qu'elle ne produit pas de CO₂. Cependant, de grandes quantités de dioxyde de carbone sont libérées lors de la production, dont 98 % sont actuellement issus du reformage du pétrole ou du gaz naturel. Si l'on peut produire suffisamment d'hydrogène à un coût compétitif et de préférence à partir d'énergies décarbonées (nucléaire et renouvelables), il est possible de le rendre presque inépuisable. Le mot "technologies hydrogène" fait référence à toutes les technologies envisageables pour produire, stocker et traiter l'hydrogène à des fins énergétiques, y compris toute la filière hydrogène. **(Figure 2-11). [13]**

Il y a trois formes de stockage d'hydrogène :

➤ **Stockage de l'hydrogène sous forme gazeux**

La voie gaz est la technologie de stockage la plus simple et la plus largement utilisée. L'hydrogène est dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus l'hydrogène est stocké. Les réservoirs actuellement en développement fonctionnent à des pressions maximales de 300-350 bar (30-35 MPa) voire 480 bar. Des réservoirs de gaz sous 700 bar sont actuellement développés pour améliorer la capacité volumétrique, ce qui est l'un des inconvénients majeurs de cette technologie. [13]. Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types comme montre le **tableau 2-2** :

Tableau 2-2 : Les différents types de réservoirs gazeux [13]

Type	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Avec tout type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est crucial. Avec le Type I, les charges mécaniques sont absorbées directement par le liner ; Nous

préférons donc un matériau à haute limite élastique (acier). Cependant, dans les réservoirs de type III et IV, le liner agit comme une barrière à l'hydrogène. Par conséquent, un matériau à faible perméabilité à l'hydrogène (aluminium pour le type III) est préféré. La largeur de fibre, le motif, l'angle d'enroulement et le nombre de passes sont parmi les critères qui doivent être optimisés dans l'enroulement filamentaire. [13]

➤ **Stockage de l'hydrogène sous forme liquide**

Du fait de la faible densité de ce composé à l'état liquide de $70,8 \text{ kg/m}^3$, le volume correspondant à 5 kg d'hydrogène est d'environ 70 litres. Par conséquent, ce mode de stockage peut sembler attractif, d'autant plus que l'hydrogène liquide est facilement disponible dans les pays développés. [14]. Néanmoins, plusieurs Inconvénients existent :

- ❖ L'énergie nécessaire à la liquéfaction de l'hydrogène représente environ 40% de l'énergie contenue dans le gaz.
- ❖ La manipulation de l'hydrogène liquide exige des stations de remplissage automatique complexes mais cependant tout à fait techniquement réalisables.

Cependant, les problèmes de stockage de l'hydrogène liquide sont aujourd'hui maîtrisés, grâce notamment au développement des activités spatiales. Certes, les coûts et les contraintes associés à ce processus sont très difficiles à transférer sur une voiture. [14]

➤ **Stockage de l'hydrogène sous forme solide**

Les unités de stockage solide fonctionnent dans des conditions de température et de pression standard. Le stockage solide se présente sous de nombreuses formes. [13]

- ✓ **Stockage par l'adsorption** : Carbon actif, nanotube, nanofibre de graphite....
- ✓ **Hydrures réversibles** : nanocristaux, hydrures complexe....
- ✓ **Hydrures chimiques** : hydrures d'ammonium

➤ **Stockage de l'hydrogène dans les hydrures**

Ce type de stockage prometteur repose sur la capacité de certains solides à adsorber de grandes quantités d'hydrogène et à le restituer en abaissant ou en élevant légèrement la température. Le lanthane, le nickel et le magnésium sont des terres rares qui font l'objet de recherches. La proportion d'hydrogène adsorbé pour un atome de métal est de l'ordre d'un atome de gaz. Il s'agit d'une réaction réversible qui est endothermique lors de la libération d'hydrogène

et exothermique lors de l'adsorption. Le principal avantage de cette méthode est qu'il est possible d'adapter la pression de libération d'hydrogène à l'application. Malheureusement, les alliages qui absorbent le plus d'hydrogène par unité de masse sont également ceux qui nécessitent des températures très élevées. Ceci est valable pour tous les composés, par exemple. Le magnésium a une capacité massique de 7 %, ce qui est un avantage important pour les applications mobiles. Cependant, le problème de la réversibilité se pose car il doit être chauffé à 500 ou 600 °C. La fusion de magnésium et de nickel peut augmenter considérablement les températures à °C, mais la capacité volumique est perdue. D'autres alliages, tels que à base de zirconium, de manganèse et de chrome, sont en cours de développement. Il y a une autre difficulté à résoudre : il est nécessaire de conserver de l'hydrogène extrêmement pur car les hydrures ne sont pas compatibles avec le monoxyde de carbone. [14]

2.4. Conclusion

Les capteurs thermiques photovoltaïques et les piles à combustible offrent des solutions innovantes et prometteuses pour la production d'énergie renouvelable. En combinant les avantages des deux technologies, nous obtenons un système multi-sources qui permet une production efficace et durable d'électricité et de chaleur. De plus, cette technologie s'adapte facilement aux besoins des consommateurs, qu'ils soient résidentiels, commerciaux ou industriels. En raison les capteurs photovoltaïques thermiques et les piles à combustible jouent un rôle important dans la transition vers des sources d'énergie plus durables grâce à leur grande flexibilité, leur haute efficacité énergétique et leur potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Bien qu'il reste encore des défis technologiques à relever, ce système offre un avenir prometteur pour la production d'énergie propre et renouvelable.

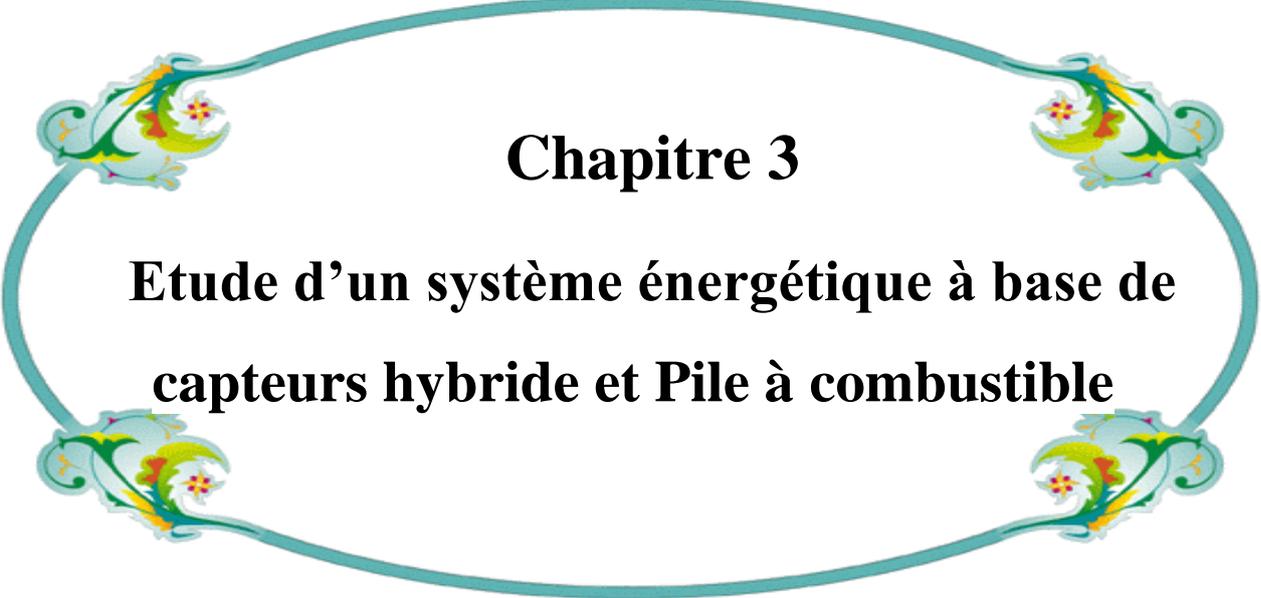
Références

- [1] Sedik, N. M. (2018). Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire. (Mémoire de master, UNIVERSITE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR D'ANNABA BADJI MOKHTAR, ALGERIE).
- [2] Guendouz, A. E. F. (2015). Intégration des réflecteurs dans les capteurs hybrides PVT à eau (Mémoire de Master, UNIVERSITE GHARDAIA).
- [3] Guessabi, A., & Bedhane Y. (2021). Contribution à l'étude de la conversion d'énergie Photovoltaïque -triboélectrique (Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ).
- [4] Khelifa, A.E. (2017). Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT (Thèse de doctorat, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR DE BATNA-1-).
- [5] Belguendouz, M. A, & Brahimi, M. (2022). Optimisation des performances d'un panneau solaire à air-Système Hybride PV/T–Etude expérimental (Mémoire de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA).
- [6] Reteri, A., & Fentrouci, A. (2013). Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP (Mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKRBELKAID – TLEMCEN).
- [7] Abbou, W. & Mezioud D. N. E. H. (2020). Systèmes solaires hybride photovoltaïque et thermique pour le chauffage, la climatisation et l'alimentation en énergie électrique d'une maison (Mémoire de Master, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM).
- [8] Daheur, M., & Taini, S. A. E. (2020). Etude et simulation du système hybride PV/Pile à combustible/Batterie (Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [9] Saker, S. Modélisation et Contrôle du système, Pile à Combustible, Convertisseurs et Supercondensateur (Mémoire de Magister, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER – BISKRA).
- [10] Hadjaji, S.& Mougay M. (2021). Etude et simulation d'un système énergétique à pile à combustible PEMFC (Mémoire de Master, UNIVERSITE AHMED DRAÏA-ADRAR).
- [11] Sadli I. (2006). Modélisation Par Impédance D'une Pile A Combustible PEM Pour Utilisation En Electronique De Puissance (Doctorat de l'INPL, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE).

[12] Kourma, A. & Laiche, F. A. E. (2022). Simulation et gestion du flux énergétique d'un système hybride autonome (photovoltaïque/ pile à combustible (Mémoire de Master, UNIVERSITE IBN KHALDOUN DE TIARET).

[13] Azzi, H. (2016). Etude et modélisation d'une pile à combustible (Mémoire de Magister, UNIVERSITE A. MIRA-BEJAIA).

[14] Jemei, S. (2004). Modélisation d'une pile à combustible de type PEM par réseaux de neurons (thèse de doctorat, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD ET DE L'UNIVERSITE DE FRANCHE COMTE).



Chapitre 3

**Etude d'un système énergétique à base de
capteurs hybride et Pile à combustible**

Chapitre 3

Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybride et Pile à combustible

3.1. Introduction

La modélisation de systèmes hybrides de capteurs photovoltaïques thermiques et de piles à combustible est un domaine de recherche en pleine croissance. Ces systèmes sont complexes, car ils impliquent l'intégration de plusieurs technologies, notamment les panneaux solaires, les échangeurs de chaleur, les piles à combustible et les convertisseurs d'énergie. La modélisation de ces systèmes permet de simuler leur fonctionnement, de comprendre leurs performances et de prédire leurs conditions de fonctionnement. Les convertisseurs boost, qui sont utilisés pour augmenter la tension de sortie des panneaux solaires ou des piles à combustible, jouent un rôle important dans la modélisation de ces systèmes. Une bonne compréhension de la modélisation et de l'optimisation de ces systèmes hybrides est essentielle pour améliorer leur rendement énergétique et réduire leur impact environnemental.

3.2. Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybride et Pile à combustible

Le point commun des capteurs hybrides PVT et les piles à combustibles étant leur dépendance à la température de fonctionnement. La faite d'intégrer des échangeurs de chaleurs permet de refroidir les cellules photovoltaïques et les piles à combustibles d'un côté, et d'utiliser cette énergie calorifique pour satisfaire des charges thermiques d'un autre côté. La combinaison des capteurs PVT et de la pile à combustible dans un système énergétique permettra donc de satisfaire complètement la demande en énergie électrique et thermique d'une charge autonome. La production électrique de ce système énergétique peut aussi être injecté au réseau. Dans ce dernier cas, les deux sources énergétiques (Capteur PVT et PAC) vont fonctionner d'une manière optimale.

Ces systèmes hybrides ou multi sources (Capteurs PVT et PAC) peuvent être utiliser pour produire de l'énergie électrique et thermique d'une charge autonome situé dans un site isolé du réseau ou peuvent être connectés au réseau électrique.

3.2.1. Système autonome

Dans ce cas notre système hybride (PV/T+PAC) sera utilisé dans un site isolé pour alimenter une charge indépendante du réseau électrique. La configuration de ce système est représentée dans la **figure 3-1**.

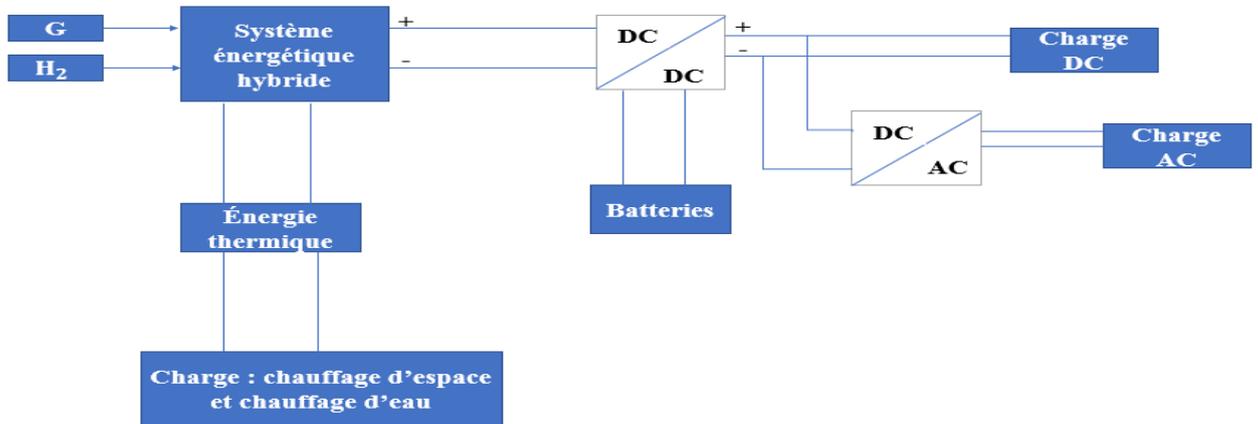


Figure 3-1 : systèmes hybrides autonome.

Le système sera doté d'un parc de batteries pour le stockage.

Le système hybride se compose de capture PVT à eau avec une pile à combustible **figure 3-2** :

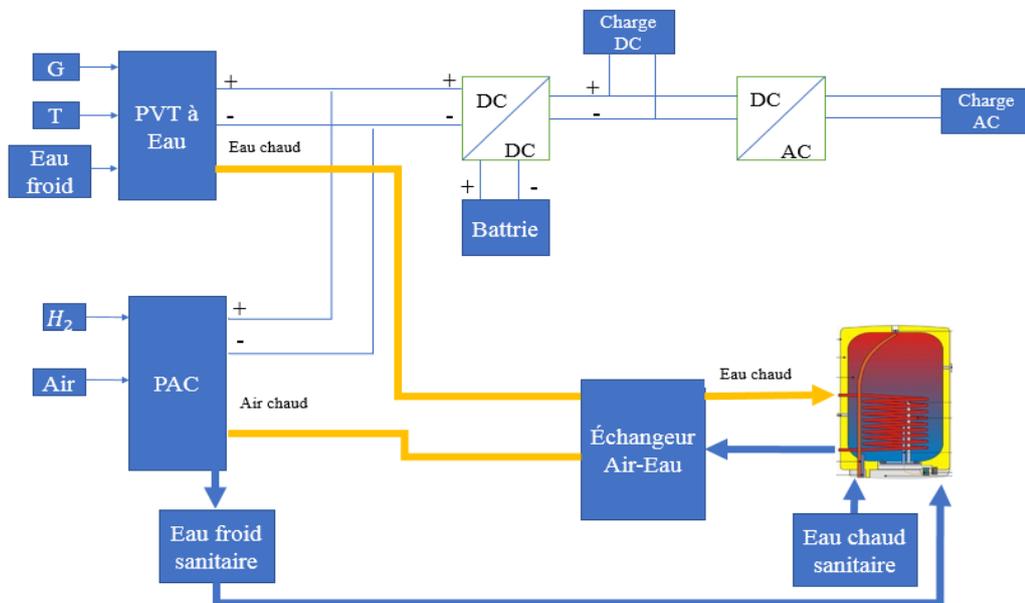


Figure 3-2 : Schéma globale de système hybride avec capture PVT à eau.

La figure ci-dessous représenter un système hybride capture PVT à air avec une pile à combustible **figure 3-3**.

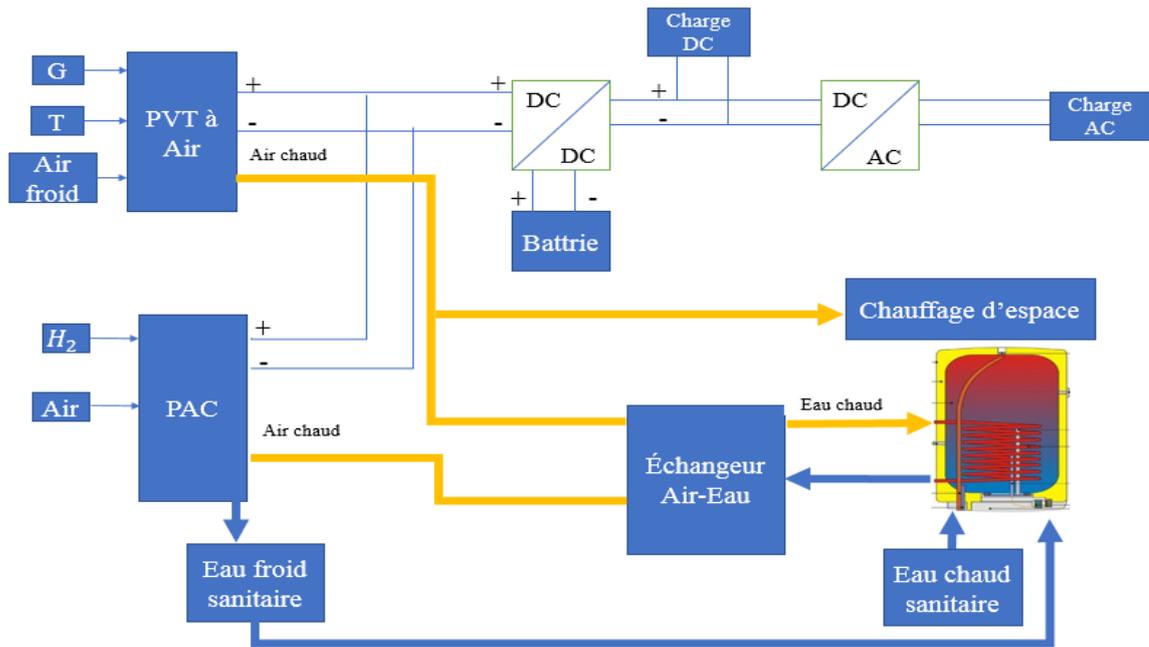


Figure 3-3 : Schéma globale de système hybride avec capture PVT à air.

3.2.2. Système connecté au réseau

Dans ce cas le système qui devait être de grande puissance (quelque MW) toute la puissance produite sera injectée et la chaleur produite sera utilisé pour les salles de commande de la centrale **figure 3-4**.

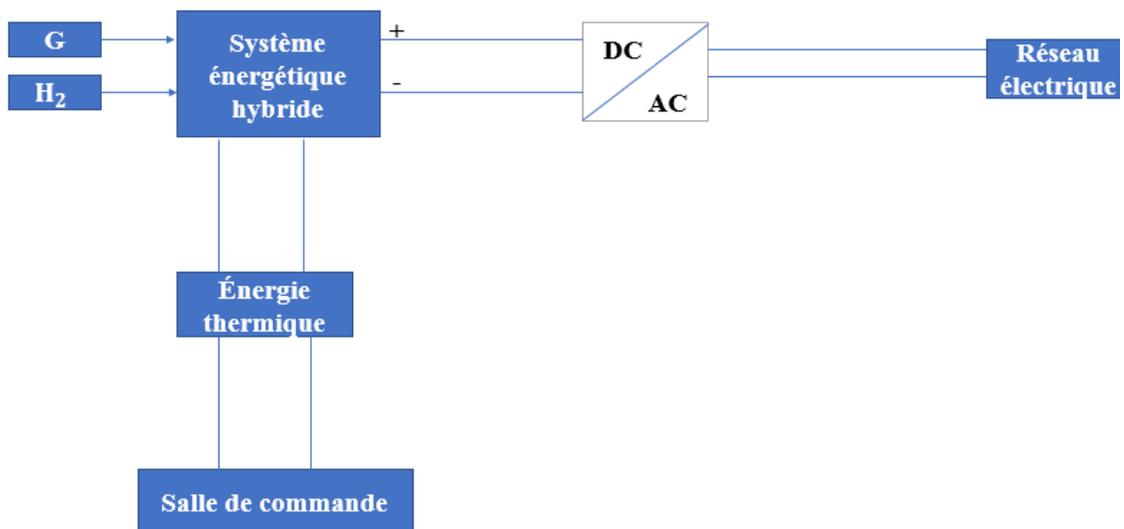


Figure 3-4 : Système hybride connecté au réseau.

Dans ce cas, notre système hybride est connecté directement au réseau électrique pour lui fournir le maximum d'énergie. Les capteurs hybrides PVT vont produire de l'électricité pendant les journées et la pile à combustible produira de l'électricité jour et nuit sauf dans le cas de l'épuisements de l'hydrogène. Pour la chaleur produite par les deux systèmes, en plus de la fonction de refroidissement qui assurent, elle sera utilisée pour le chauffage du local qui sera en général la gestion et commande de la centrale.

3.3. Modélisation du système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

La modélisation du système multi source passe par la modélisation de ces composants. On va commencer par la modélisation des capteurs hybrides PVT et la pile à combustible puis, on enchaînera avec la modélisation des convertisseurs DC/DC puis DC/AC pour le cas de l'utilisation en site isolé pour un système autonome.

3.3.1. Modélisation des capteurs PVT

La partie électrique du capteur hybride ressemble à celle du module photovoltaïque et la partie thermique ressemble à celle du capteur thermique plan avec les cellules solaires comme un corps noir, va servir comme absorbeur.

3.3.1.1. Caractéristique courant tension

Il est difficile de donner à un module photovoltaïque le caractère d'une source de courant ou de tension sur toute la gamme des caractéristiques courant-tension. Un système photovoltaïque est considéré comme une source d'énergie. On constate alors l'existence du point P_m où la puissance est maximale. Sans aucun doute, il est intéressant de se positionner à cet endroit pour profiter au maximum de l'énergie installée au-dessus et donc de la performance. Par conséquent, l'impédance de certains contrôleurs solaires s'ajuste de telle manière que nous nous rapprochons de plus en plus de ce point d'efficacité maximale. [1]

Les propriétés réelles et le schéma de remplacement de la cellule sont illustrés à la **figure 3-5**. Les valeurs correspondantes des différents éléments du schéma équivalent déterminent l'efficacité de la cellule réelle. [1]

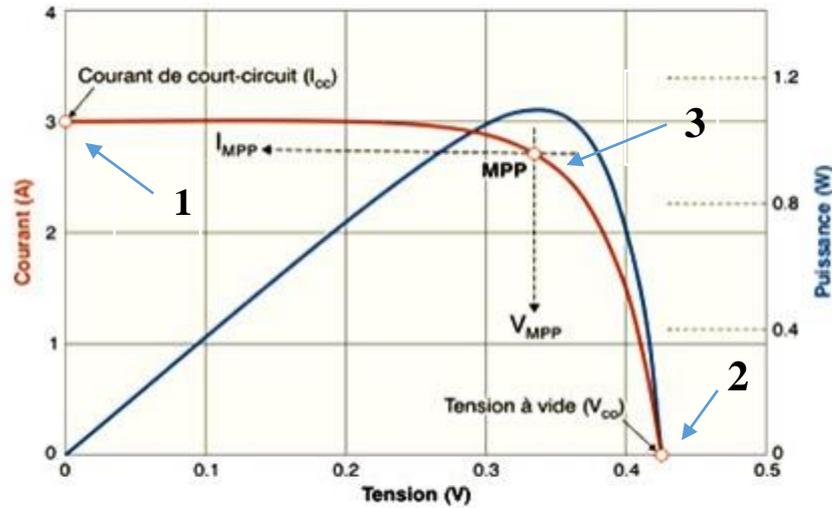


Figure 3-5 : Caractéristique $I = f(V)$ et $P=f(V)$ d'une cellule PV. [2]

En examinant cette caractéristique, on peut distinguer trois points importants :

- ❖ Point (1) où la cellule agit comme un générateur de courant, I_{cc} proportionnel à l'éclairement.
- ❖ Point (2) où la cellule agit comme un générateur de tension V_{oc} .
- ❖ Point (3) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [1]

A. Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant produit en coupant les connexions des cellules (dans le schéma équivalent, $V=0$). Augmente linéairement avec l'intensité de l'éclairement de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [1]. Il définit le nombre de paires électron-trou formées par G qui traversent la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et des trous (L_n et L_p), respectivement. [3]

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (3.1)$$

B. Tension à circuit ouvert V_{oc}

La tension de circuit ouvert est atteinte lorsque le courant traversant la cellule est nul. Cela dépend de la barrière énergétique et de la résistance shunt. Diminue avec la température et varie légèrement avec l'intensité lumineuse [1]. C'est la tension à laquelle la diode délivre un courant dans l'obscurité ($I = 0$) qui correspond au courant de court-circuit I_{cc} [3]. Il résulte de l'équation :

$$V_{\alpha} = \frac{KT}{q} \left(\ln \left(\frac{I_{\alpha}}{I_0} + 1 \right) \right) \quad (3.2)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode.

C. Facteur de forme FF

La puissance que la cellule photovoltaïque délivre au circuit externe lorsqu'elle est éclairée dépend de la résistance de charge (résistance externe aux bornes de la cellule). Cette puissance est le maximum (affiché avec P_{max}) pour le point de fonctionnement P_m ($I_m V_m$) de la courbe courant-tension (courants entre 0 et I_{cc} et tension entre 0 et V_{oc}). Ce point P_m est obtenu en modifiant la valeur de la résistance extérieure lorsque l'aire du rectangle déterminée par les axes O_x, O_y et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par le maximum. Le nom "coefficient de forme" (facteur de puissance) est dérivé de la représentation graphique [1]. Il définit l'efficacité de la cellule solaire [3], il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{P_m}{I_{\alpha} * V_{\alpha}} = \frac{I_m * V_m}{I_{\alpha} * V_{\alpha}} \quad (3.3)$$

Ce qu'il faut savoir, c'est que la puissance maximale délivrée à la charge est représentée par une hachure. [1]

$$P_m = I_m * V_m \quad (3.4)$$

3.3.1.2. Bilans thermiques des différents constituants (modélisation thermique)

Plusieurs couches constituent le capteur PVT (figure 3-6). Nous allons appliquer un bilan énergétique sur les différentes couches du capteur PVT.

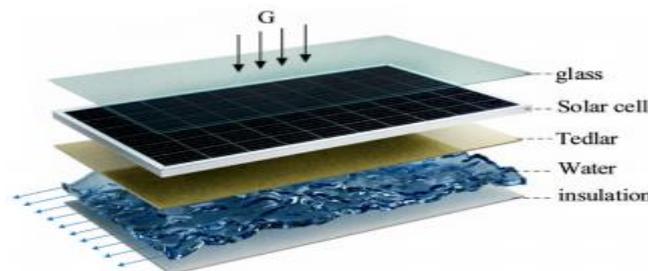


Figure 3-6 : schématisation en coupe du système Photovoltaïque/Thermique. [4]

La figure 3-7 représente un diagramme de résistance thermique pour un capteur PVT.

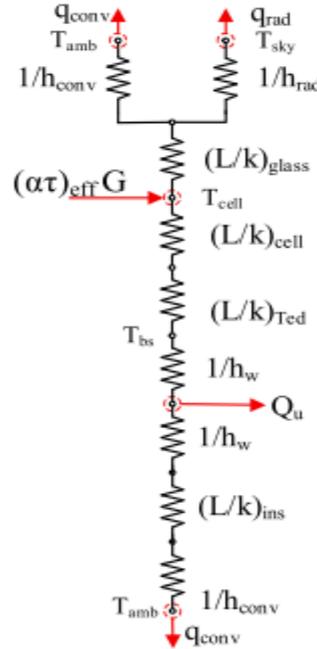


Figure 3-7 : Diagramme de résistance thermique équivalente pour capteur PVT. [4]

A. Couverture en verre externe-air ambiant

$Q_{r,ve-a}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur. [5]

$$Q_{r,ve-a} = \varepsilon_v * \sigma * (T_{ve}^4 - T_{ciel}^4) = h_{r,ve-a} * (T_{ve} - T_{ciel}) \quad (3.5)$$

$$h_{r,ve-a} = \varepsilon_v * \sigma * (T_{ve}^2 + T_{ciel}^2) * (T_{ve} + T_{ciel}) \quad (3.6)$$

$Q_{c,ve-a}$: Le flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur peut être calculé par :

$$Q_{c,ve-a} = h_{cn} * (T_{ve} - T_a) \quad (3.7)$$

$$h_{c,ve-a} = h_{ext} = 5.7 + 8.3T_v \quad (3.8)$$

Le flux solaire absorbé par la couverture transparente :

$$Q_{s,ve} = \alpha_v * G \quad (3.9)$$

Avec :

$h_{r,ve-a}$: Coefficient d'échange par rayonnement verre- ambiance [$W/m^2 K$].

ϵ_v : Emissivité du verre.

σ : Constante Stefan-Boltzmann [$W/m^2 K^4$].

T_{ve} : Température de verre [K].

h_{con} : Coefficient d'échange par convection dû au vent [$W/m^2 K$].

T_a : Température ambiante [K].

α_v : Coefficient d'absorption.

G : Eclairement global [W/m^2].

B. Couverture en verre externe-vitre interne

$Q_{s,vi}$: Flux solaire absorbé par la vitre intérieure. [5]

$$Q_{s,vi} = \alpha_v * \tau_v * G \quad (3.10)$$

$Q_{r,ve-vi}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture en verre extérieure et la vitre intérieure ; il peut être calculé en considérant la couverture en verre extérieur et la vitre intérieure comme deux surfaces parallèles infinies. [5]

$$Q_{r,ve-vi} = \frac{\sigma * (T_{ve}^4 - T_{vi}^4)}{\left(\frac{2}{\epsilon_v} - 1\right)} = h_{r,ve-vi} * (T_{ve} - T_{vi}) \quad (3.11)$$

Avec :

$$h_{r,ve-vi} = \frac{\sigma * (T_{ve}^2 - T_{vi}^2) * (T_{ve} + T_{vi})}{\left(\frac{2}{\epsilon_v} - 1\right)} \quad (3.12)$$

$Q_{c,ve-vi}$: Flux échangé par convection-conduction entre la couverture en verre extérieur et la vitre intérieure. [5]

$$Q_{e,ve-vi} = h_{e,ve-vi} * (T_{ve} - T_{vi}) \quad (3.13)$$

Ou $h_{e,ve-vi}$ est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air, calculable par la corrélation suivante [5] :

$$h_{e,ve-vi} = \frac{Nu * \lambda_{air}}{W_{ve-vi}} \quad (3.14)$$

Le nombre de Nusselt, Nu, pouvant se calculé par le biais de corrélations caractérisant un écoulement entre plaques planes définissant un volume fermé. [5]

$$G_r < 1700 + 47.8\phi \quad Nu = 1.013 \quad (3.15)$$

$$G_r = 80000 \quad Nu = 2.5 + 0.0133(90 - \phi) \quad (3.16)$$

$$\text{Autrement} \quad Nu = [0.06 + 3 \times 10^{-4} \times (90 - \phi) \times G_r^{0.33}] \quad (3.17)$$

G_r : Le nombre de Grashof.

$$G_r = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times b^3}{V^2} \quad (3.18)$$

- β : Le coefficient de dilatation, pour de l'air $\beta \approx T^{-1}$.
- B : Largeur entre les deux plans (canal d'air : W_{air}).
- ΔT : L'écart de température entre les deux plans.
- Nu : Nombre de Nusselt.
- ϕ : Angle d'inclinaison du capteur.
- G : Accélération de la pesanteur [m/s^2].
- λ_{air} : Conductivité thermique [W/mK].
- W_{ve-vi} : Epaisseur du canal [m].
- ϵ_v : Emissivité du verre.
- τ_v : Transmission du verre.

C. Vitre interne – cellule photovoltaïque

- ❖ L'énergie totale absorbée par le module photovoltaïque :

$$E_t = \tau_v \times \alpha_v \times G \quad (3.19)$$

- ❖ L'énergie électrique produite par le module photovoltaïque :

$$E_{te} = \tau_{pv} \times \eta_e \times G \quad (3.20)$$

$Q_{r,vi-cellue}$: Flux échangé par rayonnement entre la vitre intérieure et le module photovoltaïque.

[5]

- ❖ L'énergie électrique produite par le module photovoltaïque :

$$Q_{r,vi-cellue} = \frac{\sigma^*(T_{vi}^4 - T_{cell}^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_{cell}} - 1\right)} = h_{r,vi-cellue} * (T_{vi} - T_{cell}) \quad (3.21)$$

Où

$$Q_{r,vi-cellue} = \frac{\sigma^*(T_{vi}^2 - T_{cell}^2) * (T_{vi} + T_{cell})}{\left(\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_{cell}} - 1\right)} \quad (3.22)$$

Le coefficient d'échange par convection h entre l'eau glycolée et le verre/panneau PV est calculé en utilisant le régime d'écoulement et le nombre de Nusselt.

Q_1 : Flux de chaleur cédé par convection au débit d'eau par la vitre intérieure.

Q_2 : Flux de chaleur cédé par convection au débit d'eau par le module photovoltaïque.

Calculons le flux de chaleur convectif Q_1 échangé entre la vitre intérieure T_{vi} et le débit d'eau à T, et le flux de chaleur convectif Q_2 échangé entre le module PV et T_{cell} et le débit d'eau. La quantité d'énergie utile récupérée par le fluide est déterminée par la somme de ces deux flux.

[5]

- ❖ Les pertes thermiques du fond du capteur vers le bas s'écrivent :

$$Q_b = \frac{(T_b - T_a)}{\frac{e_i}{\lambda} + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (3.23)$$

L'ensemble des équations constituant le bilan de puissance, est présenté de la manière suivante :

$$(\tau_{\alpha_c} - \tau_{pv} \eta_{el}) \times G = U_3(T_{cell} - T_i) + Q + U_3(T_{cell} - T_{\alpha}) \quad (3.24)$$

$$Q_u + Q = Q + (\tau_{\alpha_{eau}}) \times G \quad (3.25)$$

$$Q_{s-i} = U_2(T_i - T_{ve}) + U_3(T_i - T_{cell}) - Q \quad (3.26)$$

$$Q_{s-ve} = U_2(T_{ve} - T_i) + U_1(T_{ve} - T_{\alpha}) \quad (3.27)$$

3.3.1.3. Etude des performances électriques et thermiques des capteurs PVT

Le rendement électrique $\eta_{(e)}$ diminue à mesure que la température du panneau augmente par rapport à une température de référence $T_{réf}$. [5]

$$\eta_e = \eta_0 [1 - \beta(T_{pv} - T_{réf})] \quad (3.28)$$

η_0 : Le rendement nominal sous conditions standards. [5]

$$\eta_0 = \frac{P_{\max}}{A \times G} = \frac{I_{\max} \times V_{\max}}{A \times G} \quad (3.29)$$

I_{\max} et V_{\max} Sont respectivement la tension et le courant maximum du module PV. L'efficacité électrique est liée à l'efficacité de la cellule η_{cell} par surface de cellule sur la surface totale (appelée facteur de remplissage) :

$$\eta_e = \frac{A_{cell} \times \eta_{cell}}{A} = \beta \times \eta_{cell} \quad (3.30)$$

La puissance utile récupérée par l'eau est :

$$Q_u = m \times C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (3.31)$$

Le rendement thermique est exprimé en fonction de la surface totale qui reçoit le rayonnement S et de la surface du collecteur A_c en fonction du débit d'eau et de la chaleur massive, respectivement T_{fs} et T_{fe} . [5]

$$\eta_h = \frac{Q_u}{A_t \int S \times dt} = \frac{m \times C_p \times \int (T_{fs} - T_{fe}) \times dt}{A_t \int S \times dt} \quad (3.32)$$

- α_c : Coefficient d'absorption.
- τ_{pv} : Coefficient de transmission de PV.
- T_{cell} : Température de cellule [K].
- $h_{r,vi-cellue}$: Coefficient d'échange par rayonnement verre int-cell [W/m² K].
- ϵ_{cell} : Emissivité de la cellule PV.
- e_i : Epaisseur de l'isolant [m].
- λ_i : Coefficient thermique de l'isolant [W/mK].
- η_{el} : Rendement électrique.
- $\tau\alpha_{eau}$: Coefficient de transmission et d'adsorption à eau [W/mK].
- β : Coefficient de température des cellules.
- η_{cell} : Rendement de cellule.
- m : Débit massique [Kg/s].
- C_p : Capacité calorifique de l'eau [J/kg. °C]

3.3.2. Modélisation de la pile à combustible

Un système de production d'énergie renouvelable, la pile à combustible (PAC) présente de nombreux avantages. Par exemple, une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ou une pile à combustible à hydrogène utilise de l'hydrogène comme combustible et de l'oxygène comme combustible, les déchets sont de l'eau. (figure 3-8). [9]

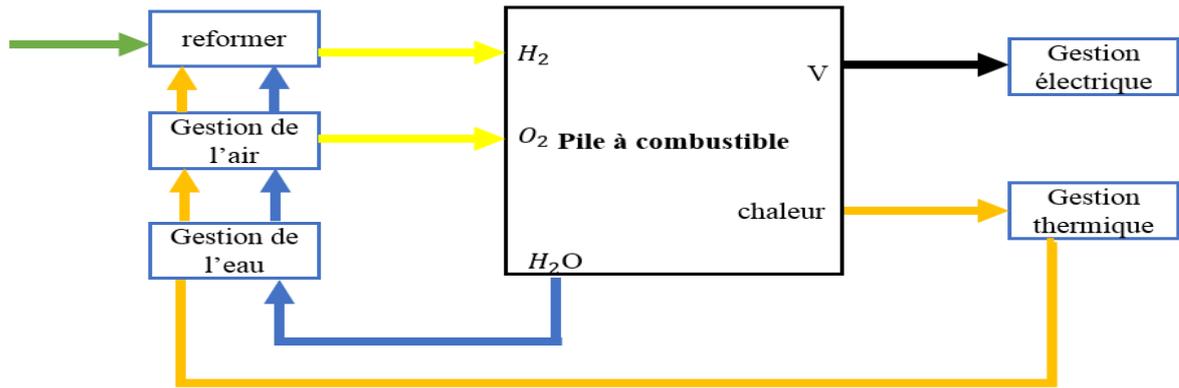


Figure 3-8 : Différents constituants d'un système pile à combustible.

Avec le schéma électrique présenté dans la figure 3-9.

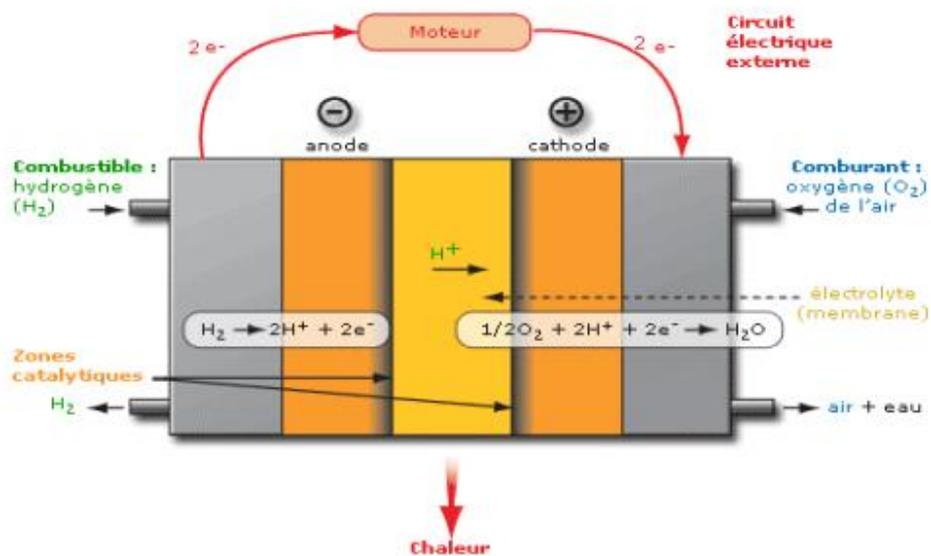


Figure 3-9 : schéma électrique d'une pile à combustible. [11]

Le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 U_{PAC} = & 0,2817 - 0,85 \cdot 10^{-3} (T - 298,15) + 4,308 \cdot 10^{-5} T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{ano} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{cat} \right) \right] \\
 & + \left[2,86 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \ln(A) + 4,3 \cdot 10^{-5} \ln \left[\frac{0,75 P_{ano}}{1,09 \cdot 10^6 \exp(77/T)} \right] \right] \times T + 7,6 \cdot 10^{-5} T \ln \\
 & \left[\frac{0,5 P_{cat}}{5,08 \cdot 10^6 \exp(-498/T)} \right] - 1,93 \cdot 10^{-4} T \ln (I_{PAC}) \quad (3.33) \\
 I_{PAC} = & \frac{181,6 \left[1 + 0,03 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0,062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2,5} \right]}{A \times \left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0,638 - 3 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[4,18 \left[\frac{T-303}{T} \right] \right]} \mathbf{1} + R_C + \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right)
 \end{aligned}$$

Le rendement électrique d'une pile à combustible est défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite W_{elec} et l'énergie chimique apportée par les réactifs, c'est-à-dire l'énergie thermique ΔH qui serait libérée [9] par la réaction :

$$\eta_{elec} = \frac{W_{elec}}{\Delta H} \quad (3.34)$$

Le rapport entre le travail maximal théorique W_{max} fourni par une pile (c'est-à-dire qui fonctionnerait de manière réversible) et la variation d'enthalpie au cours de la réaction est connu sous le nom de rendement énergétique maximal :

$$\eta_{év} = \frac{W_{max}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.35)$$

Les enthalpies de formation de l'eau à 25°C pour une pile à combustible fonctionnant en hydrogène et en oxygène sont de -285 kJ.mol⁻¹ et de -242 kJ.mol⁻¹ respectivement. Ainsi, si l'eau formée est liquide, le rendement théorique maximal est de 83 % à 25°C et de 95 % pour la vapeur d'eau. [9]

En raison de l'irréversibilité des réactions, de la chute ohmique et de la diffusion des réactifs jusqu'aux sites catalytiques, la tension U_{PAC} de la pile est en pratique inférieure à la valeur maximale [9]. La tension peut être utilisée pour écrire le rendement électrique réel η_{elec} :

$$\eta_{elec} = \frac{nF \times U_{PAC}}{\Delta H} \quad (3.36)$$

Cette expression peut se ramener à un rapport de tension [9], par exemple, à 25°C :

$$\eta_{elec} = \frac{U_{PAC}}{1.48V} \quad (\text{Eau liquide}) \quad (3.37)$$

$$\eta_{elec} = \frac{U_{PAC}}{1.23V} \quad (\text{Vapeur d'eau}) \quad (3.38)$$

Où 1,48 V et 1,23 V sont les tensions nécessaires si le système était efficace à 100 %. Par conséquent, plus la tension de la pile est élevée, plus elle produit de l'électricité. [9]

En revanche, plus la tension de la pile est faible, plus la chaleur est produite par la pile. Cela pose de nombreux problèmes pour la conception des piles car il est nécessaire d'évacuer une grande quantité de chaleur dans un système le plus compact possible. [9].

3.3.2.1. Modèle de tension

La réaction chimique est décrite par de nombreux modèles quasi statiques. Contenu dans une pile à combustible. [10]

Une combinaison de lois fondamentales et de modèles empiriques est utilisée pour décrire ce modèle. Les équations de Maxwell sont utilisées pour prendre en compte le transport de matière lors de la création de modèles fondamentaux. L'équation de Nernst est utilisée pour calculer les potentiels d'équilibre thermodynamique. Les équations de Tafel sont utilisées pour calculer les surtensions d'enclenchement. Les équations de Nernst-Planck sont utilisées pour calculer la résistance interne. À l'aide de la loi d'Ohm [10], nous pouvons exprimer la tension de cellule par :

$$V_{cell} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \tag{3.39}$$

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources :

V_{act} : Polarisation d'activation.

V_{ohm} : Polarisation ohmique.

V_{conc} : Polarisation de Concentration.

Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal E_{nerst} , une chute de la tension :

$$V_{cell} = E_{nerst} - pertes \tag{3.40}$$

E_{nerst} Le potentiel d'équilibre thermodynamique défini par l'équation de Nernst est connu sous le nom de dite tension réversible. [3.10]

$$E_{nerst} = \frac{\Delta G}{2F} - \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \tag{3.41}$$

Où :

ΔG : Changement d'énergie libre [J/k.mol].

F : La constante de faraday [96,487 C/K mol].

ΔS : Le changement d'entropie [J/k.mol].

R : La constante universelle du gaz [8,3 14 J/K.mol].

$P_{H_2} \cdot P_{O_2}$: Les pressions partielles d'hydrogène et l'oxygène [atm].

T : La température de fonctionnement de la pile [K].

T_{ref} : La température de référence [K].

Utilisation des valeurs de pression et de température standard [10]. L'équation peut être simplifiée comme suit :

$$E_{rest} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 289.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} T [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (3.42)$$

La courbe caractéristique de la pile PEMFC montre trois domaines distincts. (Figure 3-10). [10]

La puissance P_{PAC} délivrée par la pile, s'exprimant comme le produit de la tension de pile U_{PAC} et du courant de pile I_{PAC} :

$$P_{PAC} = U_{PAC} \times I_{PAC} \quad (3.43)$$

La tension de fonctionnement du système et la valeur maximale de la tension requise déterminent le nombre de cellules dans une pile [9]. La somme élémentaire des potentiels des cellules qui composent une pile est appelée tension totale de la pile :

$$V_{stack} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_i = V_{cell} \times N_{cell} \quad (3.44)$$

3.3.2.2. Caractéristique électrique

La figure 3-10 montre la définition de la caractéristique de tension (V) en fonction de la densité (I) et du rendement énergétique (représenté sur l'échelle de droite), également connue sous le nom de « courbe de polarisation ». La taille de la zone active PAC et le nombre de cellules, avec une tension de cellule série maximale d'environ 1 V, déterminent la génération de la tension PAC. En général, on considère que le point de fonctionnement nominal d'une cellule est d'environ points, notés V_N sur la courbe de polarisation. [2]

En général, la tension est limitée entre 0,4 et 0,5 V (correspond au point de puissance maximum). La tension aux bornes de la cellule unitaire diminue avec le courant fourni en raison des pertes. Les pertes proviennent de trois sources principales : la zone d'activation, la zone ohmique et la zone de concentration. [2], d'après la figure3-10.

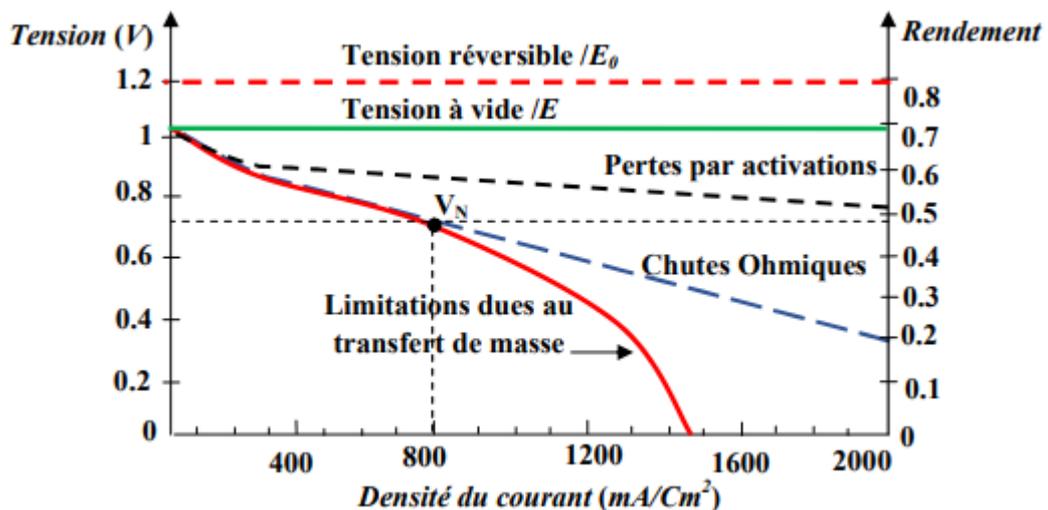


Figure 3-10 : Courbe de polarisation d'une cellule de PAC. [2]

Il est important de noter que la température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant : à mesure que le courant augmente, les pressions d'hydrogène et d'oxygène diminuent. [10].

3.3.3. Modélisation des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques qui contrôlent et adaptent la charge de la batterie.

3.3.3.1. Modélisation d'un convertisseur DC/DC (hacheur Boost)

Il s'agit d'un convertisseur DC/DC parallèle à insérer entre le générateur GPV et la charge, aussi appelé "boost". Il permet d'augmenter la tension d'entrée à un niveau supérieur ; son schéma de principe de base est celui de la **figure3-11**. [6]

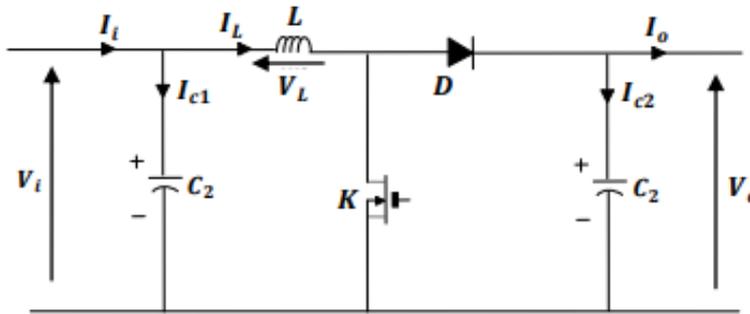


Figure 3-11 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost [6]

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (voir **figure 3-12**) des deux phases de fonctionnement donne [6]

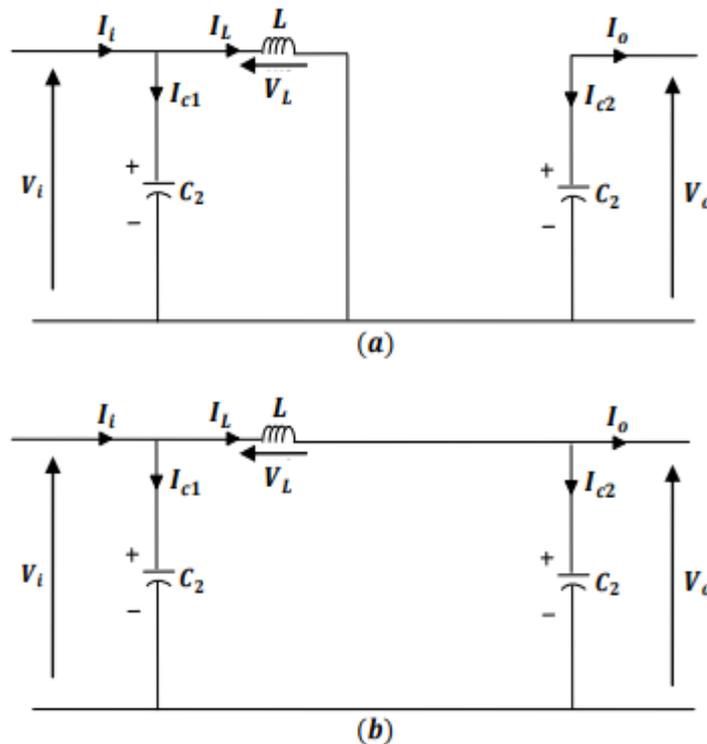


Figure 3-12 : Schémas équivalents de l'hacheur survolteur (a) : fermé, (b) : ouvert. [6]

Pour la première période $D.T_s$:

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C1 \frac{dV_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 i_{C2}(t) &= C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\
 V_L &= L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.45}$$

Pour la deuxième période (1-D)T_s :

$$\begin{aligned}
 i_{C1}(t) &= C1 \frac{dV_1(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\
 V_L &= L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \\
 i_{C2}(t) &= C2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

On utilise généralement l'expression suivante pour trouver une représentation dynamique valide pour toute la période T_s :

$$\frac{dx}{dt} T_s = \frac{dx}{dt} D T_s - \frac{dx}{dt} (1-D) T_s
 \tag{3.47}$$

Les équations qui régissent le système sur une période entière sont obtenues en appliquant la relation (3.47) sur les systèmes d'équations (3.45) et (3.46). [6]

$$\begin{aligned}
 C1 \frac{dV_1(t)}{dt} T_s &= D T_s (i_i - i_L) + (1-D) T_s (i_i - i_L) \\
 C2 \frac{dV_o(t)}{dt} T_s &= -D T_s i_o + (1-D) T_s (i_L - i_o) \\
 L \frac{di_L(t)}{dt} T_s &= -D T_s V_i + (1-D) T_s (V_i - V_o)
 \end{aligned}
 \tag{3.48}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{aligned}
 i_L &= i_i - C1 \frac{dV_1(t)}{dt} \\
 i_o &= (1-D) i_L - C2 \frac{dV_o(t)}{dt} \\
 V_L &= L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-D) V_o
 \end{aligned}
 \tag{3.49}$$

Où le gain de transfert de tension est :

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.50)$$

3.3.3.2. Modélisation par commande MPPT

Un module photovoltaïque avec un rayonnement solaire constant et uniforme a une caractéristique courant-tension (I-V) comme illustré à la **Figure 3-5**. Il y a un point sur la courbe appelé le point de puissance maximale (MPP) où le générateur photovoltaïque fonctionne à la puissance maximale et produit une puissance électrique maximale. Lorsque le générateur photovoltaïque est directement connecté à la charge, le point de fonctionnement du système se situe à l'intersection de la courbe(I-V) du générateur photovoltaïque et de la ligne de charge illustrée à la **figure 3-5**. En général, ce n'est pas le cas à la puissance ponctuelle maximale du générateur photovoltaïque, comme le montre la **figure 3-5**. Par conséquent, dans un système où la charge est directement couplée au générateur photovoltaïque, elle doit être surdimensionnée pour pouvoir alimenter la charge électrique. [7]

MPPT (Maximum Power Point Tracker) peut être utilisé pour maintenir le point de fonctionnement du panneau solaire au point de puissance maximum. MPPT permet de réaliser cela en contrôlant le courant et la tension du panneau solaire indépendamment des courants et des tensions de charge.

L'algorithme de contrôle MPPT peut localiser et suivre le point de puissance maximale du panneau solaire. Cependant, la position du MPP sur la courbe (I-V) n'est pas connue a priori, elle doit être identifiée par un modèle mathématique ou un algorithme de recherche. Pour aggraver les choses, le MPP dépend des propriétés non linéaires du rayonnement solaire et de la température. [7]

Près d'une trentaine d'algorithme de contrôle MPPT ont été proposé, un seul algorithme appelé P&O **figure 3-13** (Perturbe and Observe) est de loin le plus communément utilisé pour la recherche du point de puissance maximum. Cependant, il n'y a pas encore de consensus sur le meilleur algorithme de recherche. [7]

L'efficacité de l'MPPT est définie comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_{MPPT}(t) dt}{\int_0^t P_{\max}(t) dt} \quad (3.51)$$

Où P_{MPPT} est la puissance actuelle produite par le champ photovoltaïque sous contrôle du point de puissance maximal (MPPT), et P_{\max} est la véritable puissance maximale que le champ photovoltaïque doit produire dans des conditions de rayonnement solaire et de températures spécifiques. [7]

3.3.3.3. Description de l'Algorithme P&O

Grâce à sa simplicité de mise en œuvre, l'algorithme "Perturb and Observe" est le plus utilisé en pratique. La forme la plus simple de l'algorithme P&O est basée sur la perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de référence V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC associé, puis en observant l'impact sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance du panneau $P(k)$ est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, soit la perturbation du cycle précédent est inversée, soit la même direction de perturbation est maintenue. La (figure 3-13) donne organigramme de l'algorithme P&O. [7]

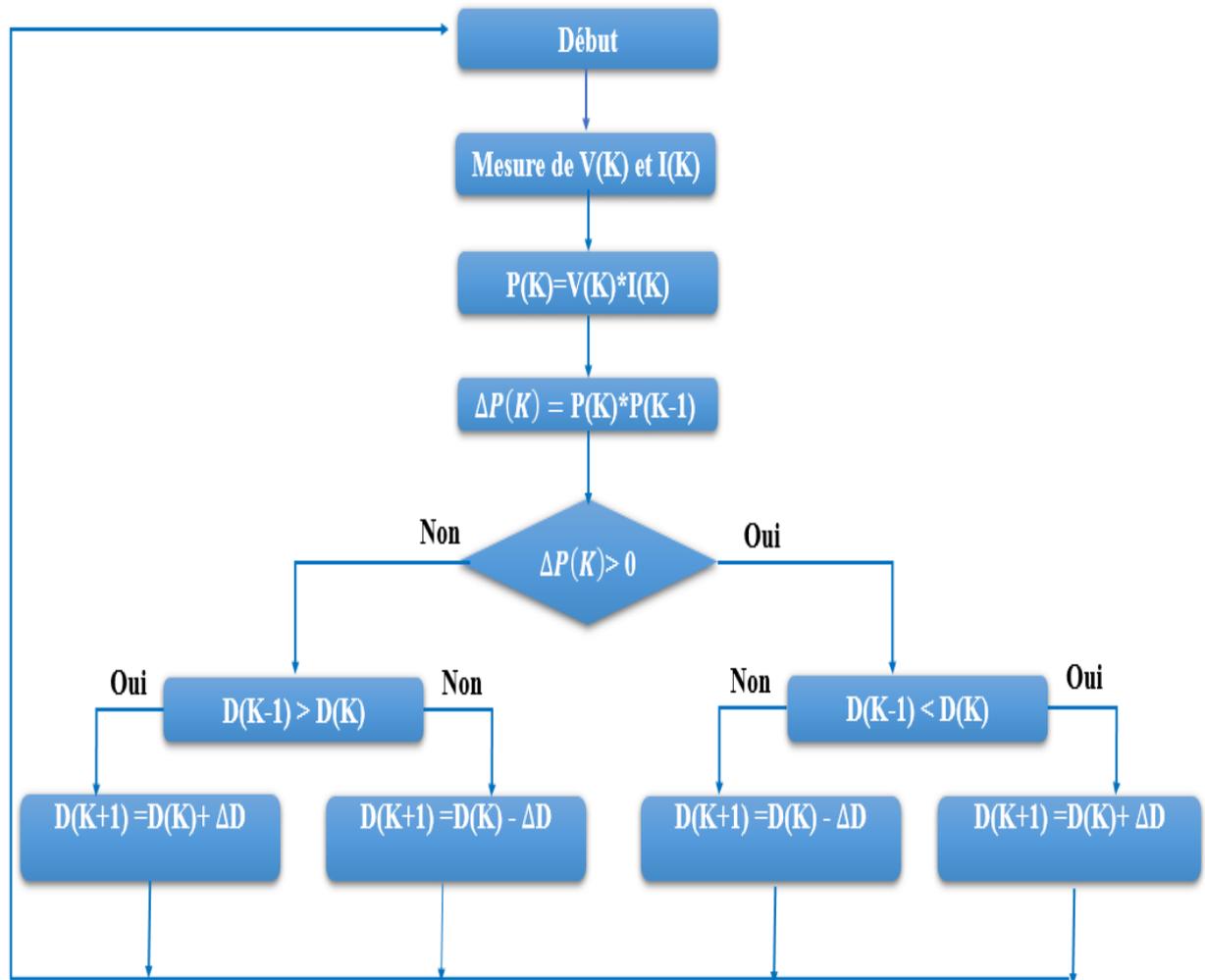


Figure 3-13 : Organigramme de l'algorithme de P&O.

Le fonctionnement de l'algorithme de P&O est comme suit :

Premièrement Les mesures de la tension V et du courant I sont effectuées afin de déterminer la puissance $P(k)$. La valeur de la puissance obtenue lors de la dernière mesure, $P(k-1)$, est comparée à cette valeur $P(k)$. Cet algorithme perturbe la tension de fonctionnement V à chaque cycle. V oscillera autour du point de fonctionnement idéal (V_{mp}) dès que MPP est atteint. Cependant, cela entraîne des pertes de puissance qui varient selon la largeur du pas d'une perturbation ΔD simple.

L'algorithme P&O répond rapidement aux changements soudains et rapides des conditions de fonctionnement lorsque l'amplitude du pas est grande, mais subit des pertes dans les conditions à changement lent et constant. [7]

Les pertes en régime permanent ou changeant diminuent lentement lorsque la taille du pas est très petite, mais le système réagit lentement aux changements rapides de température ou d'intensité de la lumière du soleil.

L'amplitude de pas idéale du système ne peut être déterminée que par expérimentation ou simulation, et offre ainsi un compromis entre une réponse rapide et une perte de puissance en régime permanent. [7]

3.3.3.4. Modélisation des convertisseurs (DC/AC)

Les convertisseurs multiniveaux ont été intégrés dans les installations industrielles en raison de leurs avantages énergétiques, notamment la réduction des pertes de puissance et la réduction du volume du filtre. Réduction très significative de la distorsion harmonique du courant, suivie d'une amélioration du facteur de puissance et d'une réduction des contraintes électriques sur les bornes de l'interrupteur statique. Cependant, il y a des inconvénients, tels que la présence d'un grand nombre de composants électriques et la nécessité de rétablir l'équilibre des tensions sur les condensateurs du bus continu. Il existe de nombreuses formes d'onduleurs multi-niveaux disponibles. [2]

- Onduleur monophasé

L'onduleur est un convertisseur électronique de puissance statique utilisé pour générer une tension alternative à partir d'une source de tension continue. La structure simplifiée du convertisseur de tension illustrée à la **figure 3-14** se compose de quatre interrupteurs à semi-conducteurs avec des diodes antiparallèles. [8]

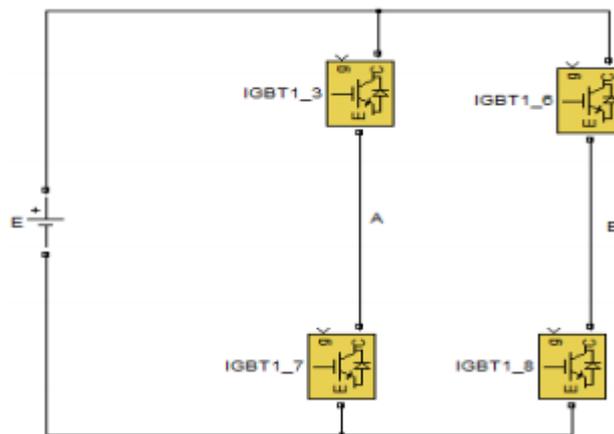


Figure 3-14 : Structure d'un onduleur monophasé sous Matlab. [8]

Sous Matlab/Simulink on utilise l'onduleur ci-dessus pour simuler les différentes techniques de commandes.

- **La command MLI triangulo-sinusoidale**

Le principe du la MLI triangulo-sinusoidale est basé sur l'utilisation des intersections d'une onde de référence sinusoidale, qui est l'image de la tension désirée, avec la porteuse. La forme du support est triangulaire, d'où la désignation triangulaire-sinusoidale. [8]

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

Indice de modulation m : égal au rapport de la fréquence de la porteuse f_p à la fréquence de la référence f_r [8] :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (3.52)$$

Taux de modulation r : égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence V_{ref} à la valeur maximale V_{pm} de la porteuse [8] :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_{pm}} \quad (3.53)$$

3.4. Fonctionnement du système hybride PVT-PAC

Pour voir la combinaison des composants du système hybride, on va étudier son application a un site isolé. Le système va alimenter une charge autonome avec différents scénarios de fonctionnement.

Les composants du système hybride étant :

- Le générateur PVT qui produit de l'électricité et de la chaleur
- La pile PEMFC pour la production de l'électricité et de la chaleur et de l'eau
- Les batteries pour le stockage électrique.

Plusieurs scénarios de fonctionnement de ce système multi source sont possible afin de satisfaire les besoins énergétiques de la charge. On va les étudier sommairement et à la fin on va identifier le meilleur scénario qui permettra l'optimisation de toute la chaine de production.

S_1 : Les capteurs PVT produiront toute la journée de l'électricité et de la chaleur

La pile PEMFC produit de l'électricité et de la chaleur pendant la nuit.

S₂: Les capteurs PVT produiront toute la journée de l'électricité et de la chaleur

La pile PEMFC produit de la chaleur et charge les batteries pendant la nuit.

S₃: Les capteurs PVT et la pile PEMFC produiront toute la journée de l'électricité et de la chaleur et le surplus de l'électricité sera utilisé pour produire de l'hydrogène.

S₄: Les capteurs PVT produiront de la chaleur et de l'électricité. Une partie sera exploitée et une autre sera stockée dans les batteries toute la journée. Pendant la nuit, on utilise l'électricité des batteries pour satisfaire la charge et en cas de besoins on utilise la pile comme appoint.

Dans notre étude, nous nous appuyons sur le scénario **4**.

3.5. Conclusion

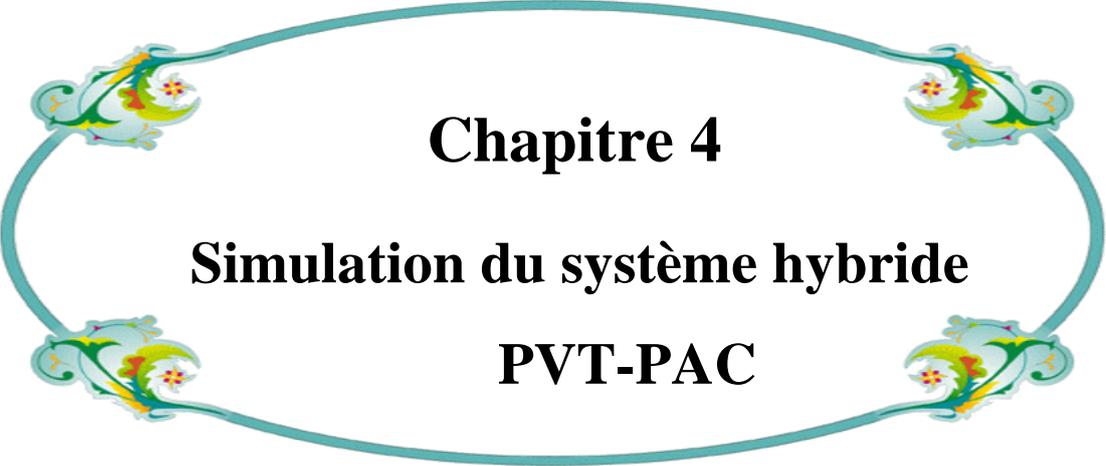
Dans ce chapitre nous avons étudié en détail le système énergétique multi sources constitué de capteurs hybrides PVT et de la pile à combustible PEMFC. Ce système énergétique est appliqué à un site isolé ou il va alimenter une charge électrique et thermique autonome. Les capteurs PVT produiront de la chaleur et de l'électricité. Une partie sera exploitée et une autre sera stockée dans les batteries toute la journée. Pendant la nuit, on utilise l'électricité des batteries pour satisfaire la charge et en cas de besoins on utilise la pile à combustible comme appoint.

Nous avons modélisé toutes les parties du système hybride (capteurs PVT, pile à combustible ainsi que les convertisseurs pour la régulation des batteries ainsi que pour la conversion continue alternatif).

Référence

- [1] Mohammed, O., & Dhalsi, A.E.H. (2021). Etude et simulation d'un système hybride photovoltaïque et pile à combustible (Memoire de master, UNIVERSITEAHMED DRAIA - ADRAR).
- [2] Khoudiri, S. (2018). Commande et Optimisation d'un Système Energétique Hybride (SEH) : Application à l'Énergie Renouvelable (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA).
- [3] Benmoussa, W. C., Amara, S., & Zerga, A. (2007). Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin. *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen*, (301-306).
- [4] Zarei, A., Liravi, M., Rabiee, M. B., & Ghodrat, M. (2020). A Novel, eco-friendly combined solar cooling and heating system, powered by hybrid Photovoltaic thermal (PVT) collector for domestic application. *Energy Conversion and Management*, 222, 113198., journal homepage <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113198>, 2020.
- [5] El Hocine, H. B. C., & Marir-Benabbas, M. (2013). Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT. *Journal of Renewable Energies*, 16(2), 257-268.
- [6] Abouchabana, N. (2009). Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT (mémoire de magistère, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE).
- [7] Hatti, M. (2010). Contribution à l'Étude des Systèmes Hybrides Photovoltaïque/Pile à Combustible (Thèse Doctorat Es Science, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN" MOHAMED BOUDIAF).
- [8] Imarazene, K. (2005). Application des réseaux de neurones à la commande par élimination d'harmoniques des onduleurs multiniveaux (mémoire de magister, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE ALGER).
- [9] Belatel, M., Benchikh, F., Simohamed, Z., Ferhat, F., & Aissous, F. Z. (2011). Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte. *Journal of Renewable Energies*, 14(1), 145-162.
- [10] Hadjaji, S., Mougay, M., & Laribi, S. (2021). Etude et simulation d'un système énergétique à pile à combustible PEMFC (Mémoire de master, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).

[11] Amrouche, F. (2004). Caractérisation Expérimentale d'un Assemblage-Stacks-de Piles à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons (Mémoire de PFE, USTHB).



Chapitre 4

Simulation du système hybride

PVT-PAC

Chapitre 4

Simulation du système hybride PVT–PAC

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler le fonctionnement de notre système énergétique basé sur les capteurs photovoltaïques thermiques (PVT) et la pile à combustible. La partie électrique du système sera liée à des convertisseurs booste avec commande MPPT

La simulation de ce système hybride, réalisée sous MATLAB Simulink, permet de prédire les performances du système et d'optimiser son fonctionnement. Il est possible de tester différents scénarios et conditions météorologiques pour déterminer comment le système réagirait dans différentes situations.

4.2. Simulation par MATLAB / SIMULINK

Dans ce travail, le modèle de système hybride proposé dans le chapitre précédent est simulé à l'aide de Matlab/Simulink.

MATLAB vous aide à faire progresser vos idées au-delà des murs de la salle de travail. Vous pouvez évoluer vers des clusters et des nuages et effectuer des analyses sur des ensembles de données plus volumineux. L'intégration du code MATLAB dans d'autres langages permet l'implémentation d'algorithmes et d'applications dans des systèmes Web, d'entreprise et de production. [1]

La (**figure 4-1**) montre les principaux éléments de l'interface MATLAB. Le haut de la figure est le menu, qui regroupe les commandes de base de MATLAB, telles que l'affichage, l'enregistrement, les préférences, etc. ", toute à gauche il y a La fenêtre "current folder" qui nous permet de voir dans quel dossier nous travaillons, à côté se trouve la fenêtre centrale "command Window", qui nous permet de taper directement des codes et des commandes, elle présente un double sont de le supérieure à ">>", nous pouvons également démarrer un script, dans cette fenêtre Vous pouvez voir les messages d'erreur et les résultats. Il y a une petite fenêtre au-dessous de "current folder" sous le "workspace" qui nous permet de voir les valeurs de toutes les variables du programme, tout comme la mémoire.

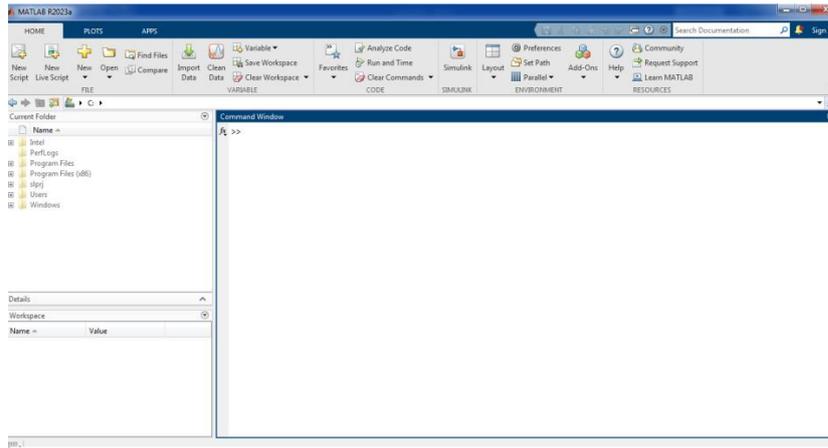


Figure 4-1 : L’interface de MATLAB R2023a

Le Simulink Start Page est la bibliothèque dans laquelle nous pouvons trouver tous les blocs que nous pouvons utiliser dans Simulink. Le logiciel Simulink comprend une vaste bibliothèque de fonctions couramment utilisées dans la modélisation de systèmes **figure 4-2**. [2]

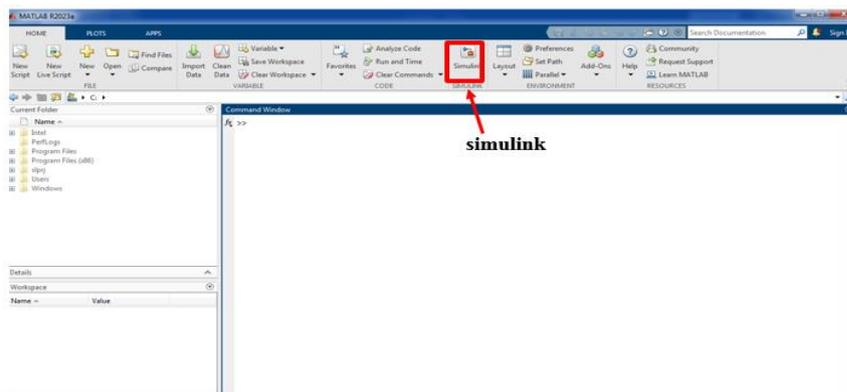


Figure 4-2 : Ouvrir de l’interface de SIMULINK

L’interface de simulink Library browser contient plusieurs blocks tel que :

- ❖ Simulink contient continous construit de dérivative, integrator et blocs mathématiques, tels que Sum, Product, Add, etc...
- ❖ Sources, telles que Ramp, Random Generator, Step, etc...
- ❖ Simscape, tel que utilities, electrical et battery, ect...

4.3. Construction d’une simulation par MATLAB/SIMULINK

La simulation du système hybride PVT- PAC passe par la simulation du capteur PVT et la simulation de la pile PEMFC.

4.3.1. Modèle Simulink du capteur solaire photovoltaïque

Nous allons commencer par la modélisation du module photovoltaïque puisque sa partie production électrique est la même que celle du capteur hybride PVT.

A. Etapes de simulation

Pour ouvrir une nouvelle simulation MATLAB, on démarre le logiciel depuis le bureau. Pour conserver notre travail on a créé un nouveau dossier par New Folder dans Current Folder. Par la suite, nous aurons alors à choisir l'option Simulink Library dans la bande d'outils. On clique sur Library Browser pour ajouter les outils nécessaire.

La **figure 4-3** représente les différents paramètres du module PV utilisé pour la simulation.

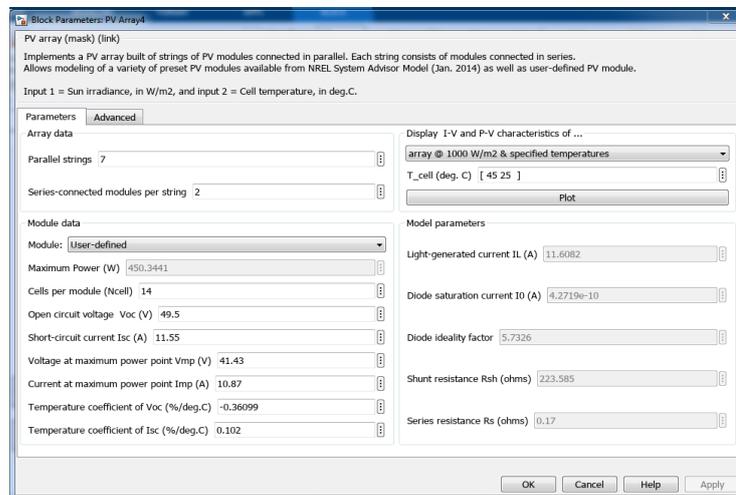


Figure 4-3 : Bloc de paramètre de PV Array.

La **figure 4-4** représente le bloc de paramètre de bus selector.

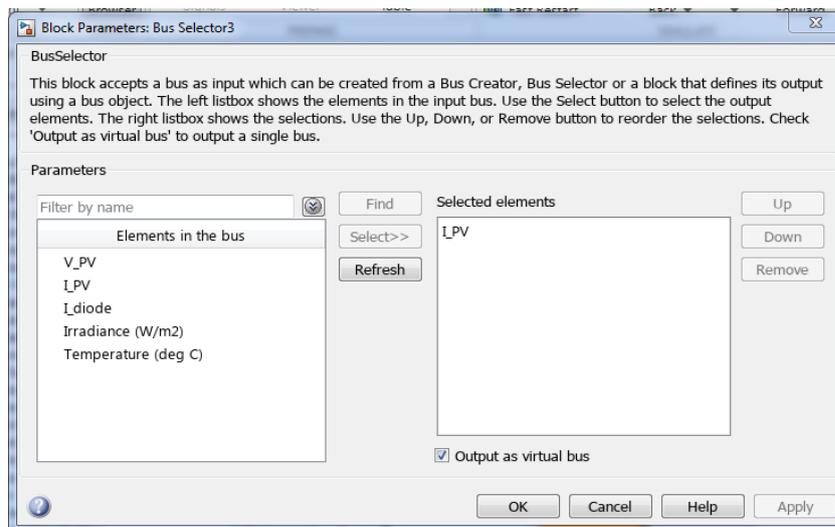


Figure 4-4 : Bloc de paramètre de Bus selector.

La **figure 4-5** représente bloc de paramètre de constant qui nous introduisons les valeurs de température et l'éclairement.

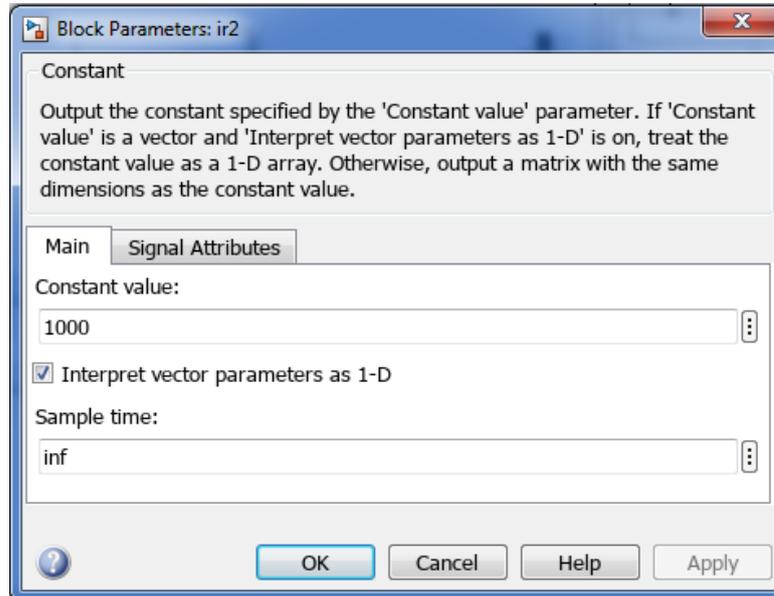


Figure 4-5 : Bloc de paramètre de Constant.

Le bloc to Workspace nous choisissons la variable qui utiliser dans le plot t par exemple et nous choisissons Array pour le save format (**figure 4-6**).

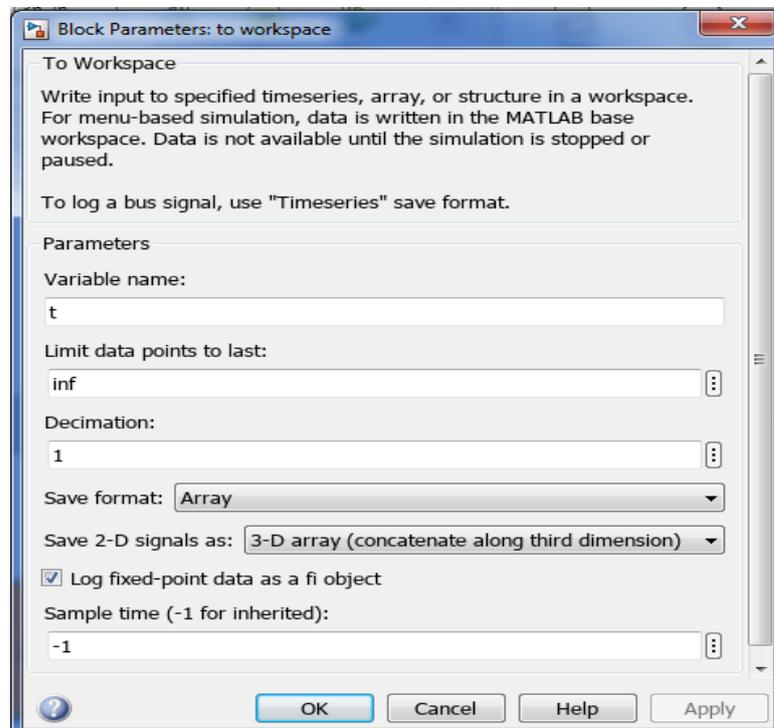


Figure 4-6 : Bloc de paramètre de To Workspace.

La **figure 4-7** représente le bloc de contrôle de la source de tension.

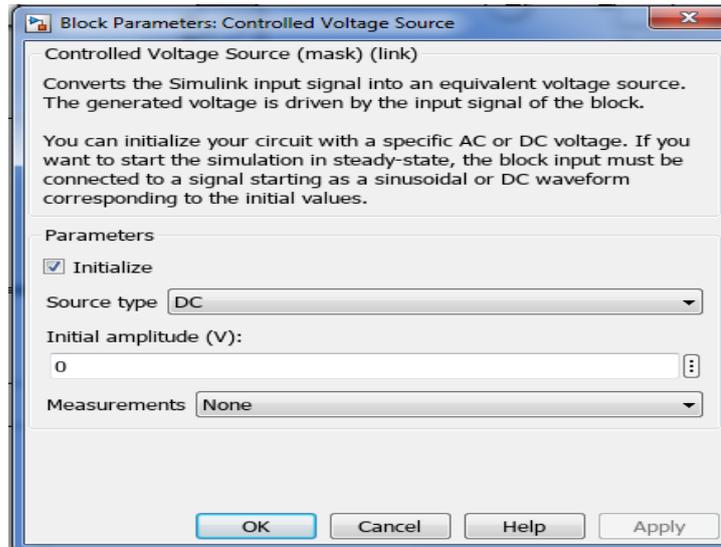


Figure 4-7 : Bloc de paramètre de Controlled Voltage Source.

Le modèle de capture PV est montré dans la **figure 4-8**.

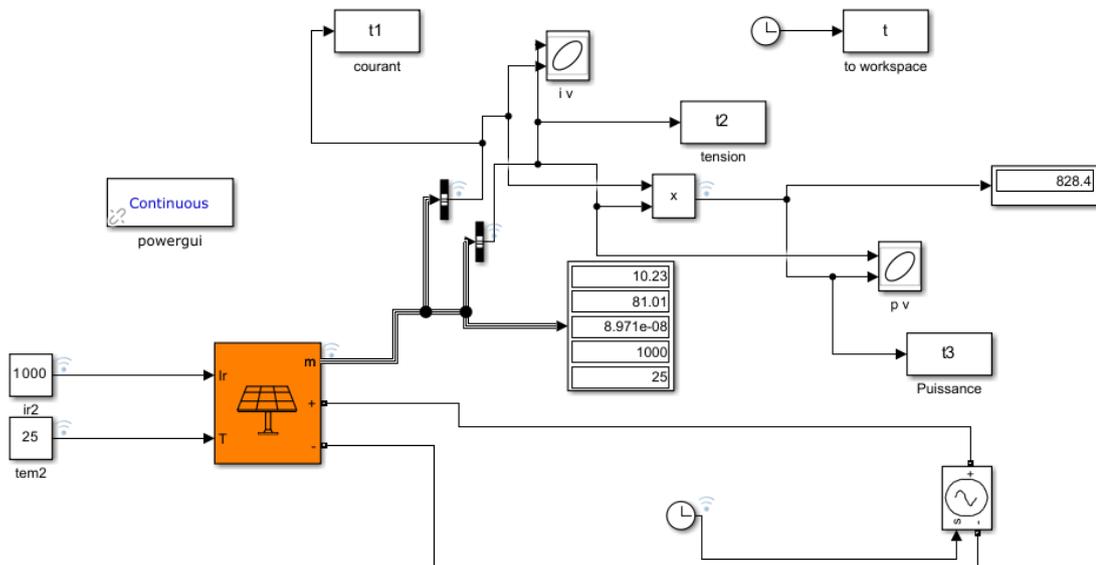


Figure 4-8 : Modèle de capture solaire photovoltaïque sous Matlab Simulink.

La simulation du capteur PV sous Matlab permis d'obtenir les caractéristiques I(V) et P(V). L'étude des performances du module photovoltaïque est possible en tenant en compte la variation de l'éclairement solaire globale reçu sur le plan du module et la température ambiante du site d'implantation du module.

B. Caractéristiques I(V) et P(V) du capteur solaire photovoltaïque

Dans des conditions de fonctionnement standard, le capteur photovoltaïque a des caractéristiques de courant-tension et de puissance-tension telles que $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ C}^\circ$, comme indiqué dans la (figure 4-9).

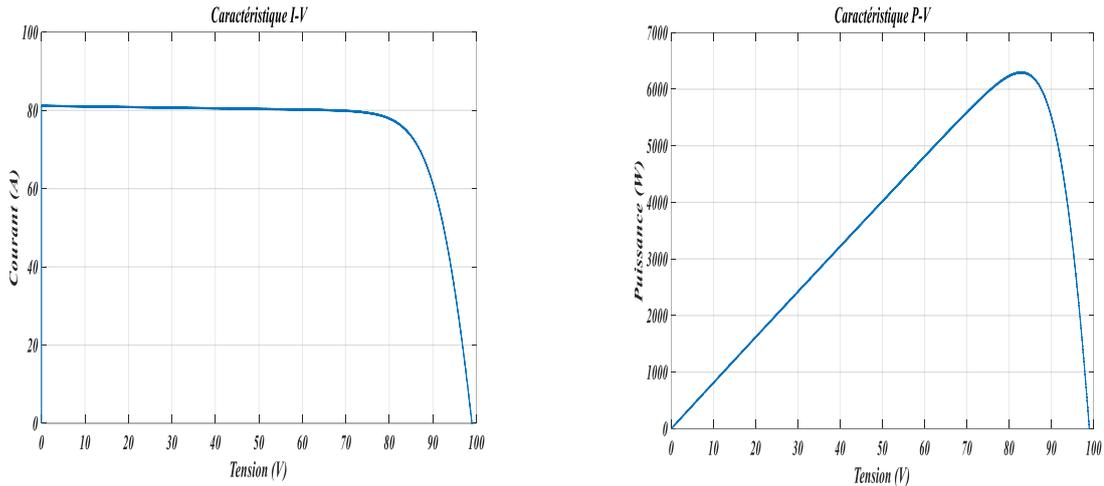


Figure 4-9 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un capteur solaire photovoltaïque.

On peut voir que lorsque le courant est constant, la tension et la puissance augmentent de 0 à la puissance maximale. Lorsque le courant est interrompu, la tension et la puissance diminuent. Il est nécessaire d'utiliser des méthodes pour atteindre le point de puissance maximale. Ces méthodes sont généralement utilisées pour contrôler les convertisseurs.

C. L'influence des conceptions métrologiques

Les conditions métrologiques influent grandement sur la production journalière des modules photovoltaïques comme il est montré sur la (figure 4-10) et (figure 4-11).

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique courant tension est montrée sur la (figure 4-10).

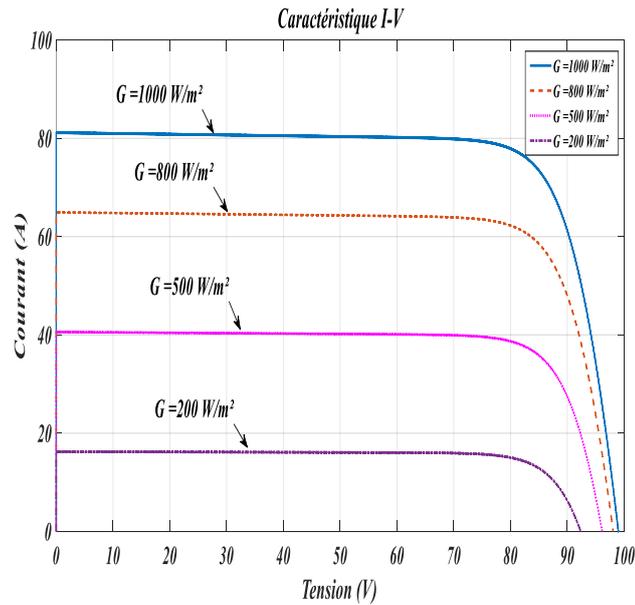


Figure 4-10 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique sur la puissance est montrée sur la **figure 4-11**.

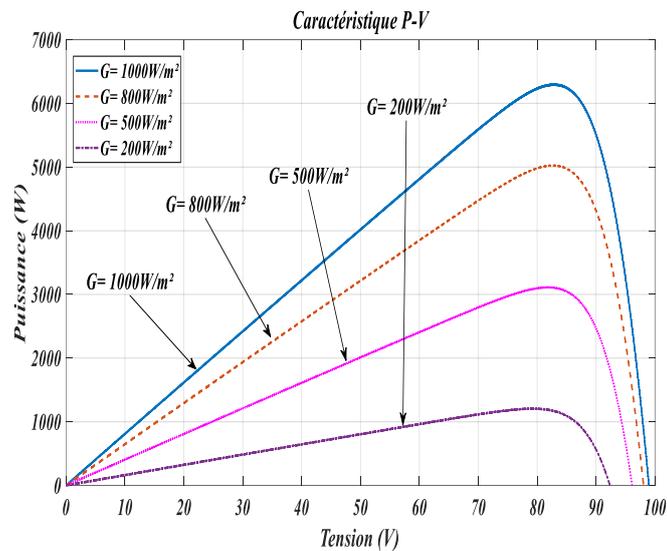


Figure 4-11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

L'augmentation du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement solaire et est contraire à la tension, ce qui démontre que l'intensité du rayonnement affecte le courant.

L'influence de la température sur les performances électriques du module photovoltaïque est montrée sur la **figure 4-12**.

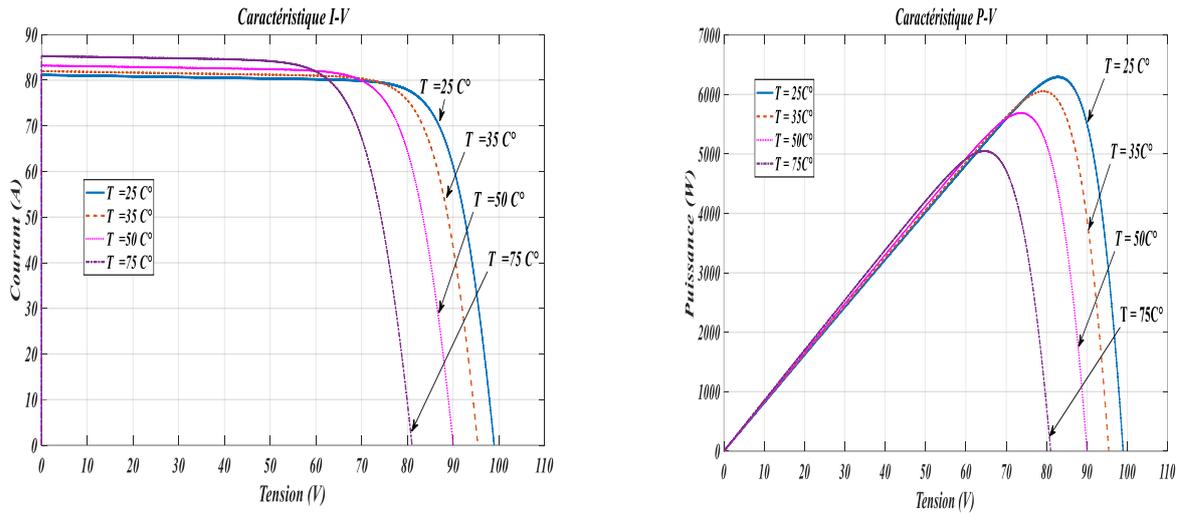


Figure 4-12 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V).

Dans la **figure 4-12** on a observé que plus la température diminue, plus la tension augmente avec une légère variation de courant, ce qui nous permet de conclure que la température affecte la tension.

Cela prouve que le rendement électrique d’un module photovoltaïque qui est le ratio de la puissance de sortie (le produit de la tension fois le courant) sur la puissance absorbée diminue avec l’augmentation de la température. D’où vient l’idée du refroidissement des cellules par un dispositif thermique pour concevoir ce qu’on appelle le capteur hybride PVT.

4.3.2. Modèle de capteur photovoltaïque thermique PVT

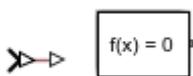
Le capteur hybride PVT est une Co génératrice d’énergie, il produit de l’électricité et de la chaleur. Son modèle Simulink est proche dans sa partie électrique de celui du module photovoltaïque. Pour la partie thermique on ajoute des composants de la librairie Simulink comme suit :



Trouver dans **Simscape / Foundation Library / Thermal / Thermal Sources.**



Trouver dans **Simscape / Foundation Library / Thermal / Thermal Elements.**



Trouver dans **Simscape / Utilities.**



Trouver dans **Simscape / Fluids / Thermal Liquid / Tanks & Accumulators.**



Trouver dans **Simscape / Utilities** où **Powertrain Blockset / Utilities / Simscape** où **RF Blockset / Equivalent Baseband / Input/Output Port** où **Vehicle Dynamics Blockset / Utilities / Simscape.**



Trouver dans **Simscape / Electrical / Sources.**



Trouver dans **Simscape / Foundation Library / Thermal Liquid / Utilities.**



Trouver dans **Simscape / Foundation Library / Thermal Liquid / Elements.**



Trouver dans **Simscape / Foundation Library / Thermal Liquid / Sensors.**

Les figures en dessous représente les paramètres de block Solar inputs (**figure 4-13 à 4-17**).

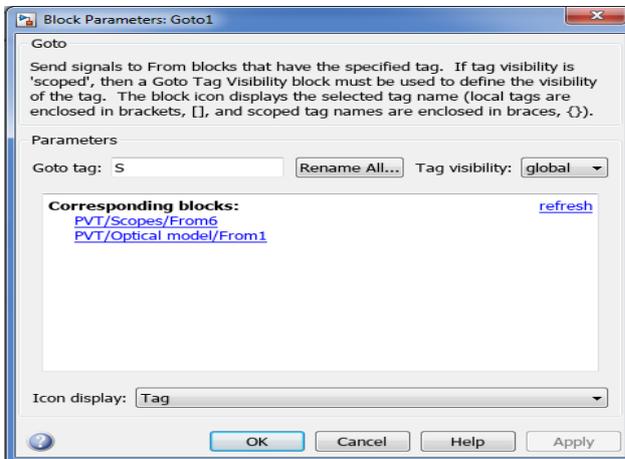


Figure 4-13 : Block paramètre de Goto S.

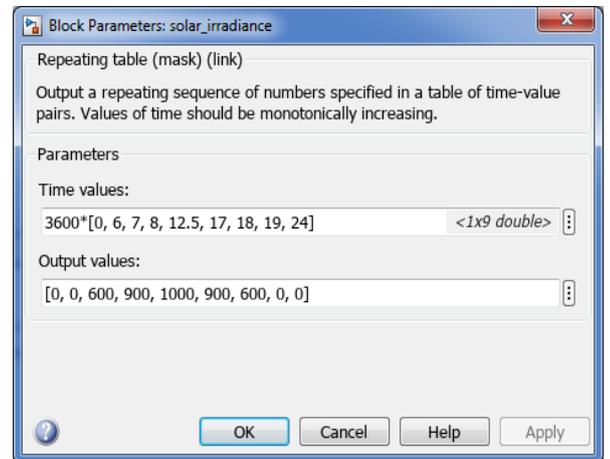


Figure 4-14 : Block de paramètre repeating table " solar_irradiance ".

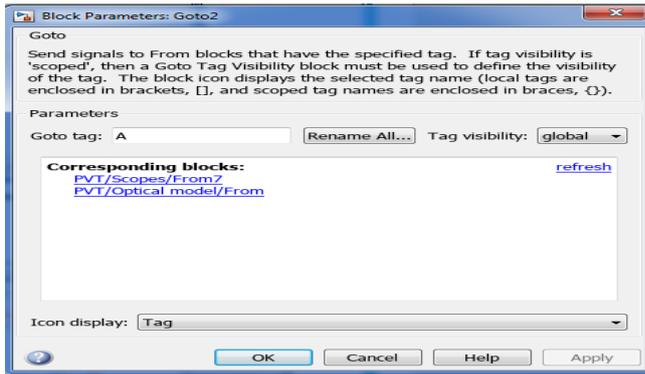


Figure 4-15 : Block de paramètre Goto A.

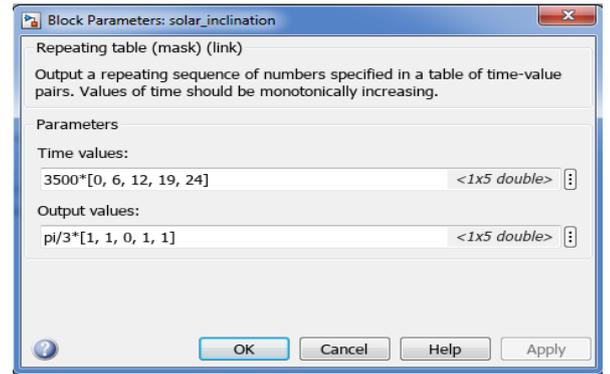


Figure 4-16 : Block de paramètre de repeating table " solar_inclination ".

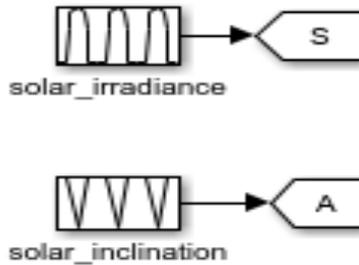


Figure 4-17 : Block Solar inputs.

La figure suivante représente les paramètres de block de pump flow inputs (**figure 4-18**).

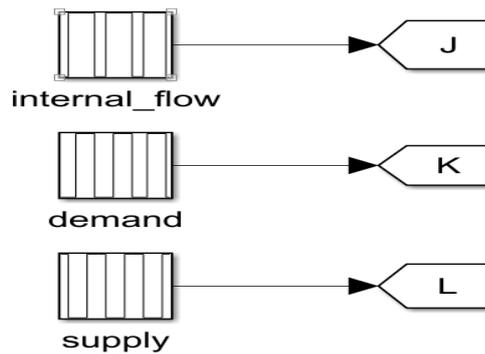


Figure 4-18: Block de Pump flow inputs.

La **figure 4-19** représente les paramètres électriques interne du capteur PVT. Ces des paramètres que nous avons utiliser pour la simulation.

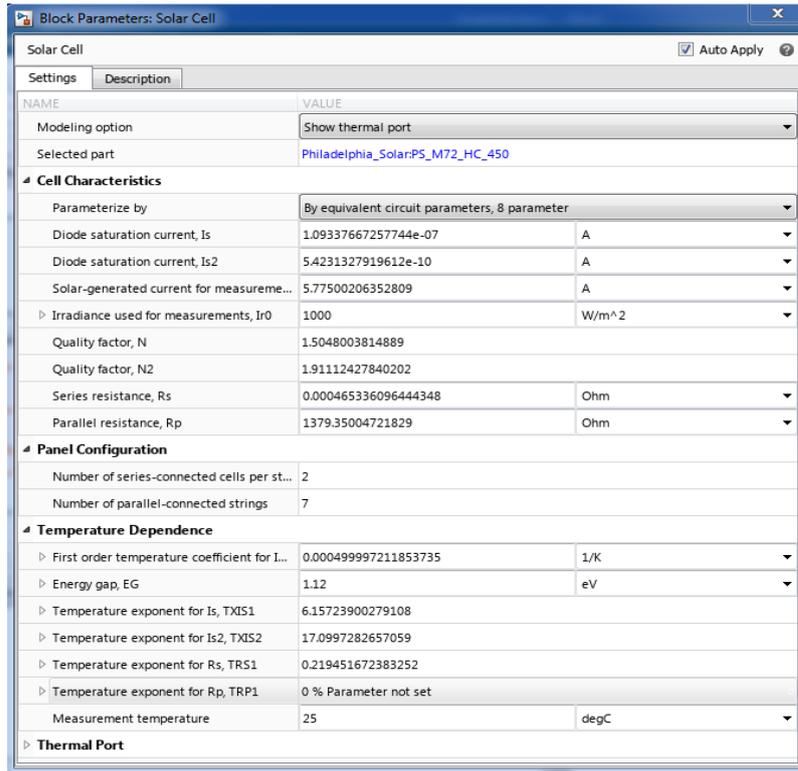


Figure 4-19 : paramètre de solar cell.

Dans la figure 4-20 le modèle de capteur photovoltaïque thermique PVT sous Matlab simulink.

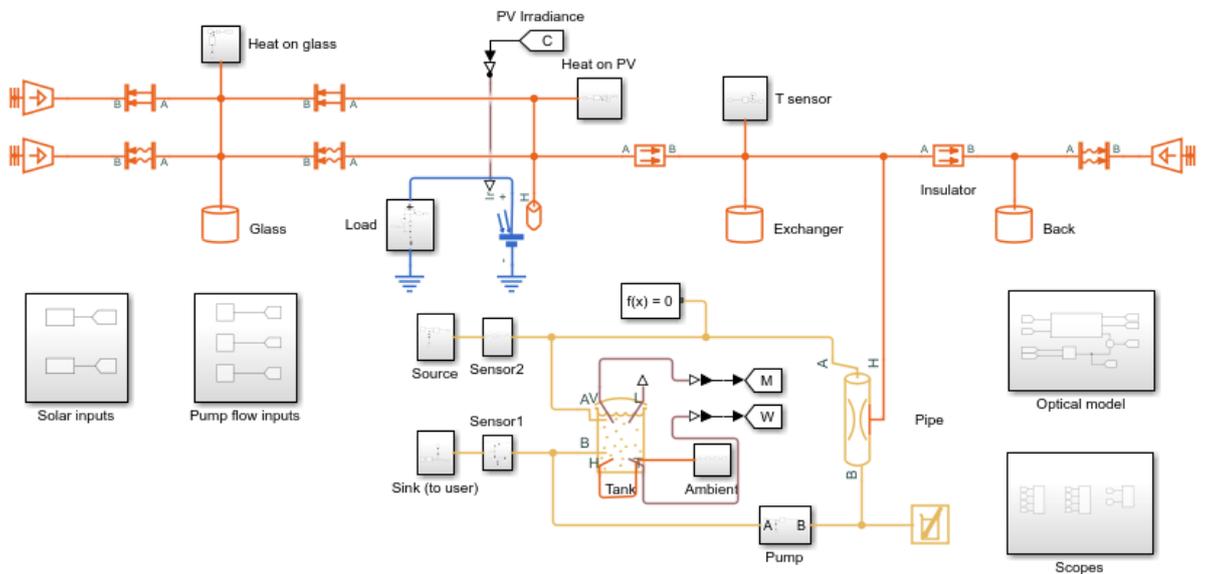


Figure 4-20 : Modèle de capteur photovoltaïque thermique PVT sous Matlab Simulink.

Les résultats de simulation sont montrés sur la figure si dessous.

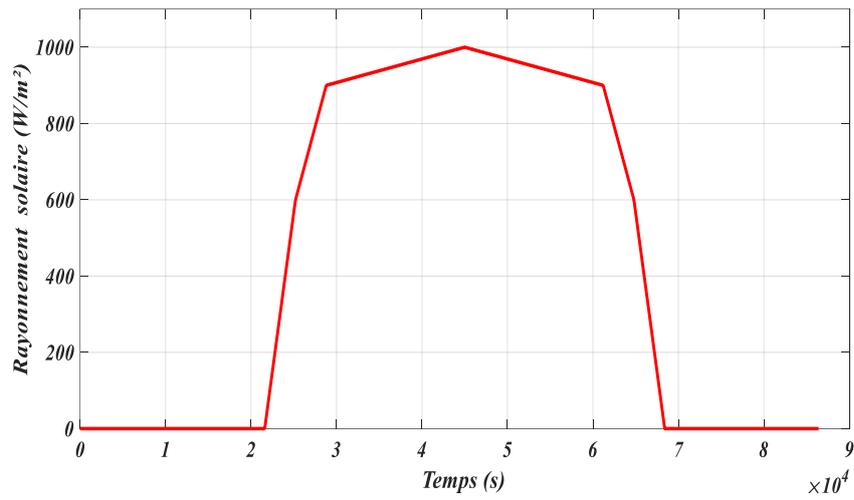


Figure 4-21 : rayonnement solaire globale

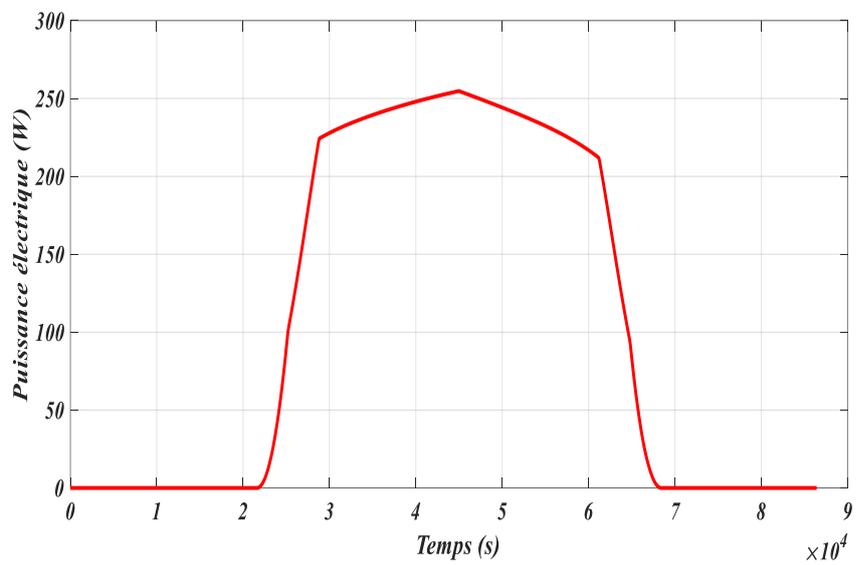


Figure 4-22 : Puissance électrique de sortie.

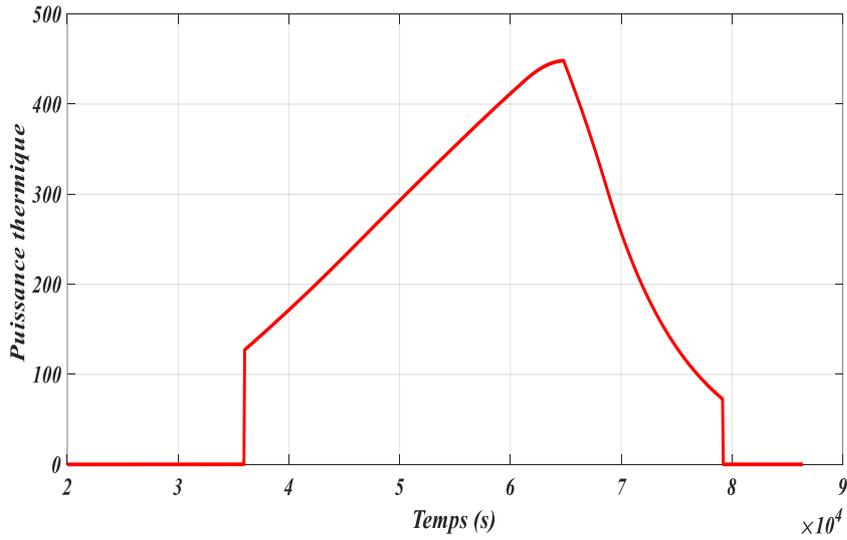


Figure 4-23 : Puissance thermique.

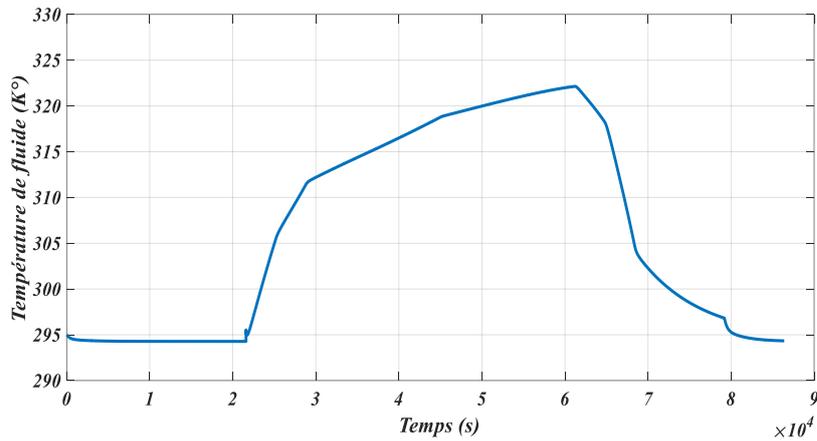
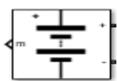


Figure 4-24 : La température de l'eau.

4.3.3. Modèle de convertisseur DC/DC (Boost)

Le convertisseur DC/DC est essentiel pour le cas où on a besoin de stocker l'énergie électrique de surplus produite par les capteurs PVT pendant les journées dans des batteries.

Pour la simulation du convertisseur boost, on a besoin des composants suivants :



Trouver dans **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources**.



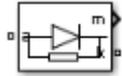
Trouver dans **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sensors and Measurements**.



Trouver dans **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Passives.**



Trouver dans **Simulink / Sources.**



Trouver dans **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Power Electronics.**



Trouver dans **Simulink / Commonly Used Blocks où Simulink / Sinks où HDL Coder / Sinks.**

Dans la **figure 4-25** nous avons montré les paramètres de la batterie.

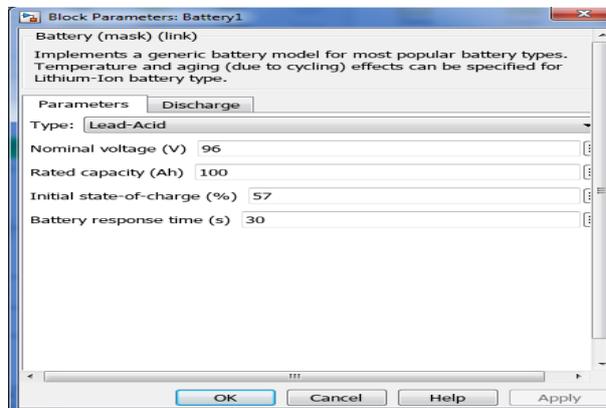


Figure 4-25 : Bloc de paramètre de Battery.

La **figure 4-26** montre le bloc de paramètre de IGBT.

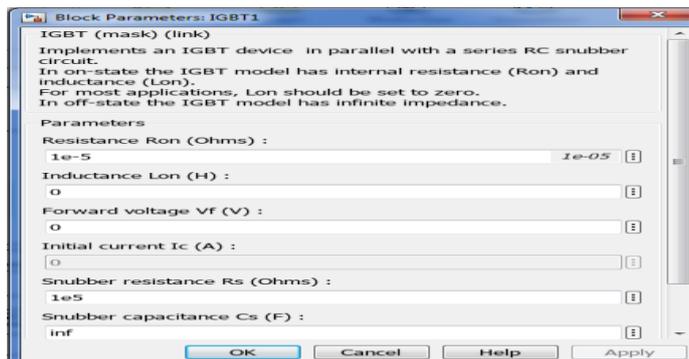


Figure 4-26 : Bloc de paramètre de IGBT.

La **figure 4-27** montre le schéma de simulation du convertisseur BOOST sans MPPT.

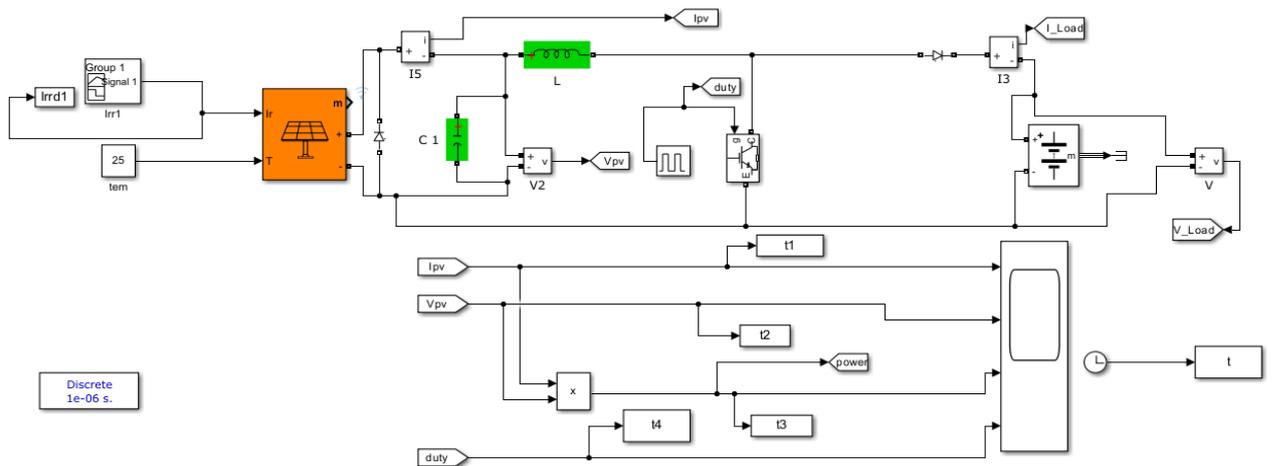


Figure 4-27 : Modèle de convertisseur DC/DC (Boost) sans commande MPPT sous Matlab simulink.

Le modèle de convertisseur DC/DC avec commande MPPT est montré sur la **figure 4-28**. Nous devons ajouter les composants suivants :



Trouver dans **Simulink / Discrete ou HDL Coder / Discrete**.



Trouver dans **Simulink / Signal Routing ou HDL Coder / Signal Routing**.

Dans la **figure 4-28** on trouve le modèle du convertisseur boost avec commande MPPT.

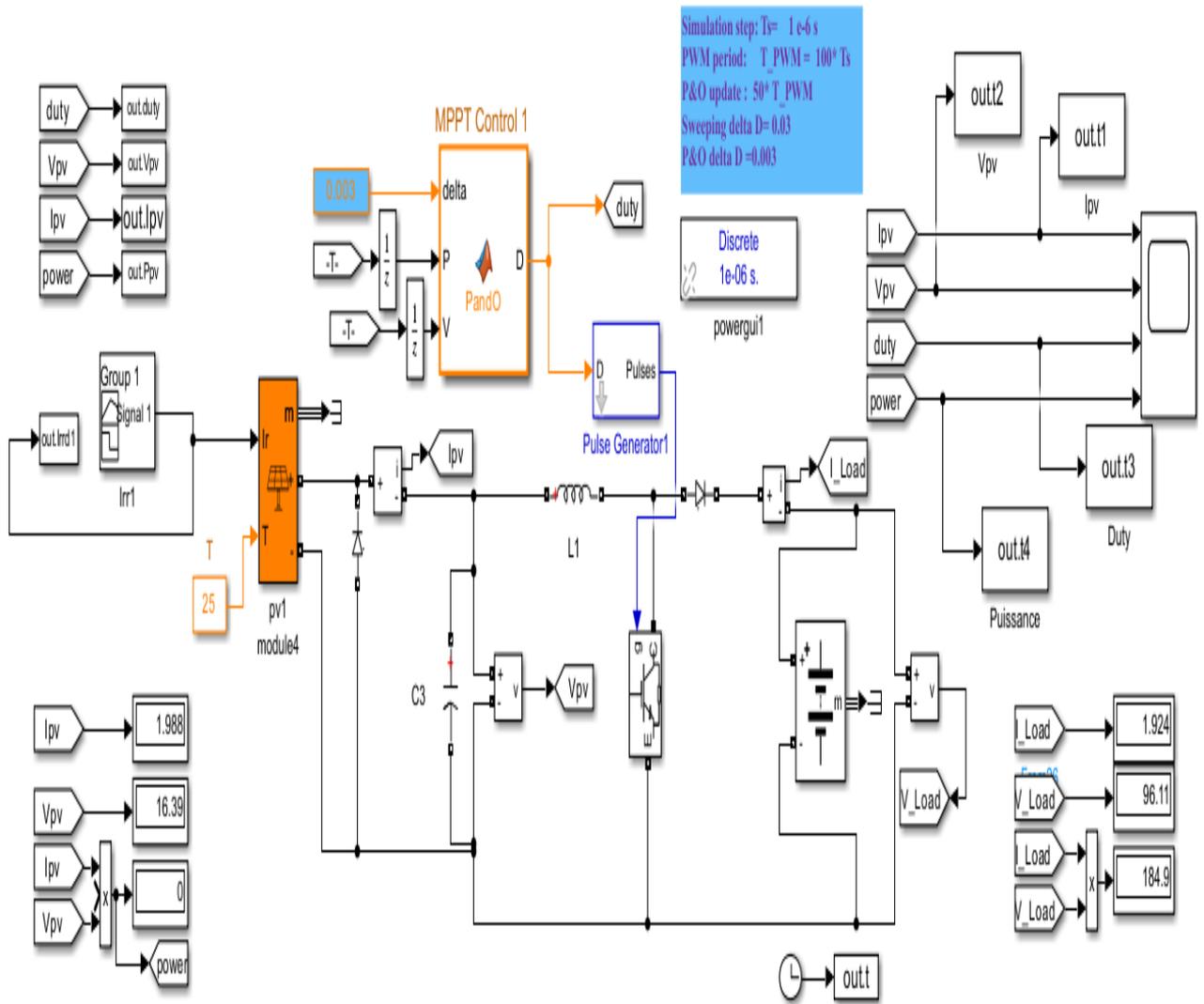
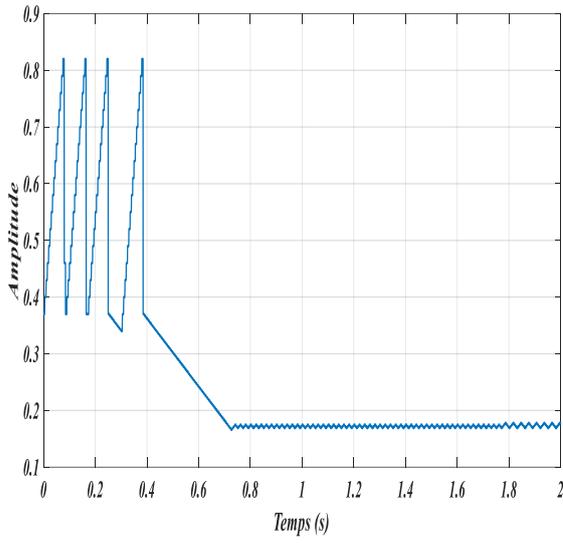


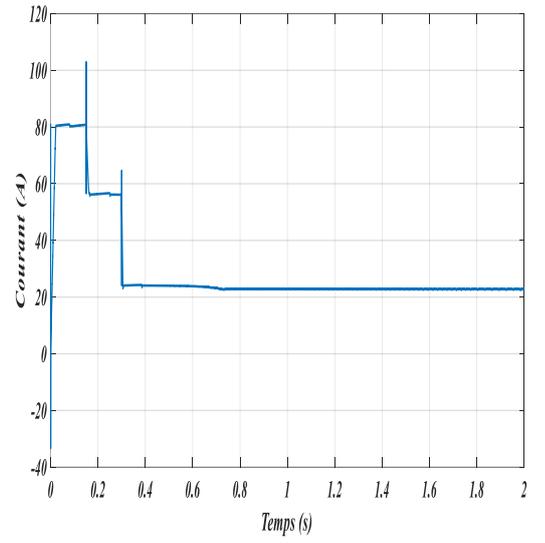
Figure 4-28 : Modèle de convertisseur DC/DC (Boost) avec command MPPT sous Matlab Simulink.

La commande utilisée dans notre étude est la technique P&O. C'est une technique simple et efficace. Les résultats de simulation du convertisseur Boost sont montrés sur la **figure 4-29**.

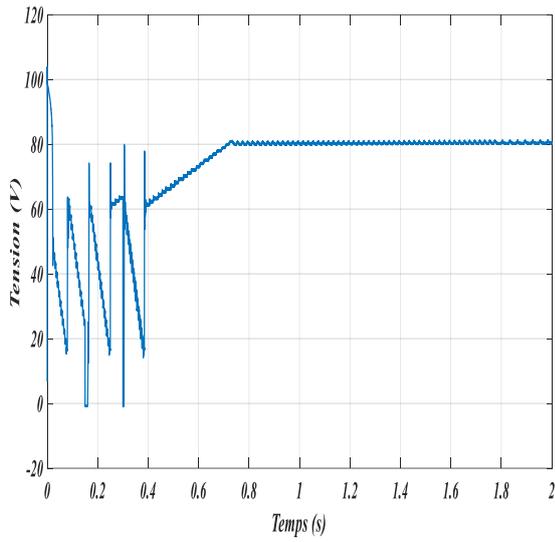
❖ Rapport cyclique



❖ Courant d'entrée I_{pv}



❖ Tension d'entrée V_{pv}



❖ Puissance d'entrée

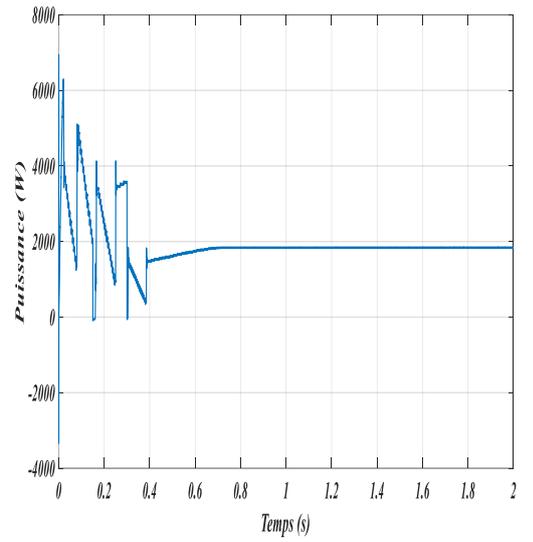
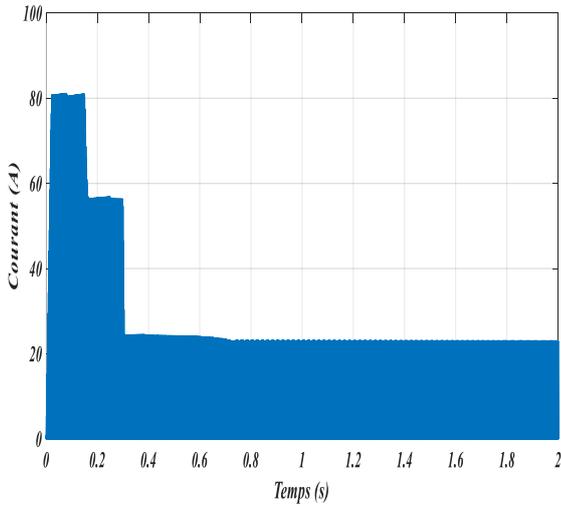
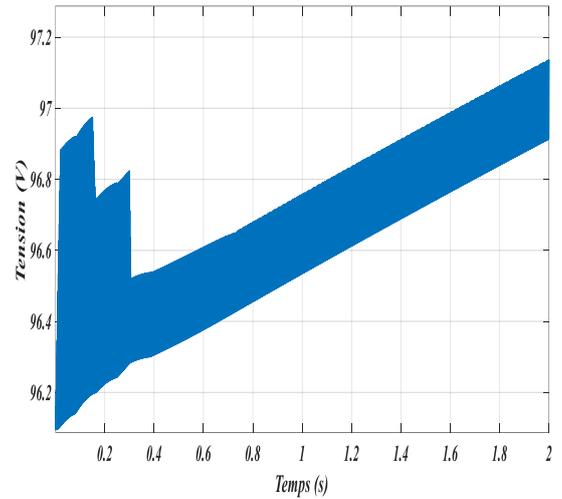


Figure 4-29 : caractéristiques d'entrée de convertisseur boost avec la commande MPPT

❖ **Curant de sortie**



❖ **Tension de sortie**



❖ **Puissance de sortie**

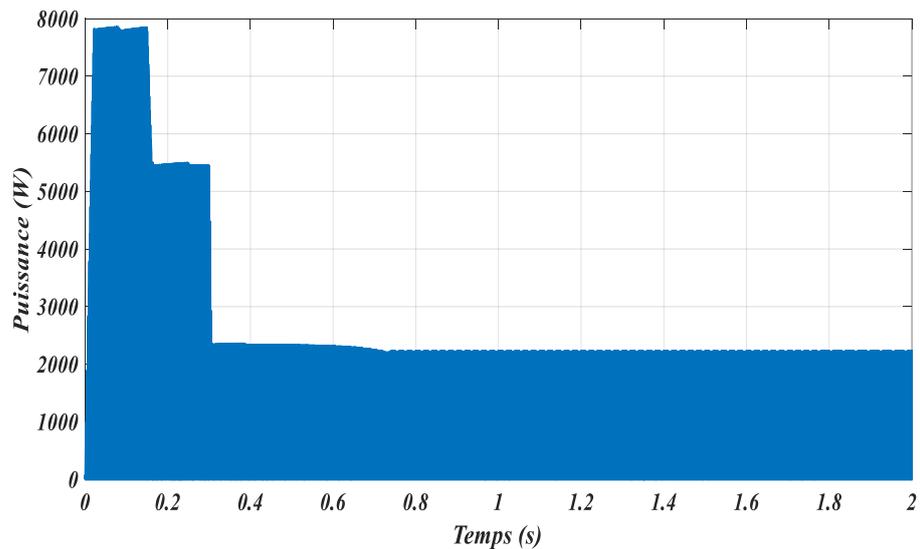
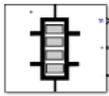


Figure 4-30 : caractéristiques de sortie de convertisseur boost avec le command MPPT.

La commande MPPT et le convertisseur DC/DC remplissent leurs fonctions correctement. Dans les meilleures conditions, le convertisseur produit une tension à sa sortie supérieure à celle produite par le générateur photovoltaïque. La commande MPPT adapte le générateur photovoltaïque à la charge en transférant sa puissance maximale.

4.3.4. Modèle de pile à combustible (PEMFC)

Pour la simulation on a besoin des composants suivants :



Trouver dans **Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources.**



Trouver dans **Simulink / Math Operations** où **HDL Coder / Math Operations.**



Trouver dans **Simulink / User-Defined Functions.**

Les paramètres de la pile à combustible donner dans la **figure 4-31.**

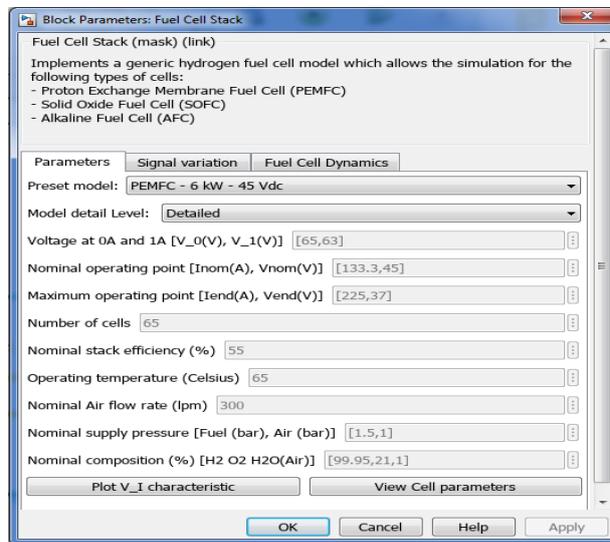


Figure 4-31 : Block paramètre de fuel cell stack.

Le bloc de paramètre de min/max représente dans la **figure 4-32.**

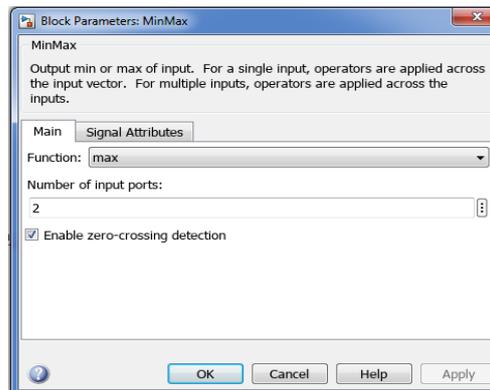


Figure 4-32 : Block paramètre de MinMax.

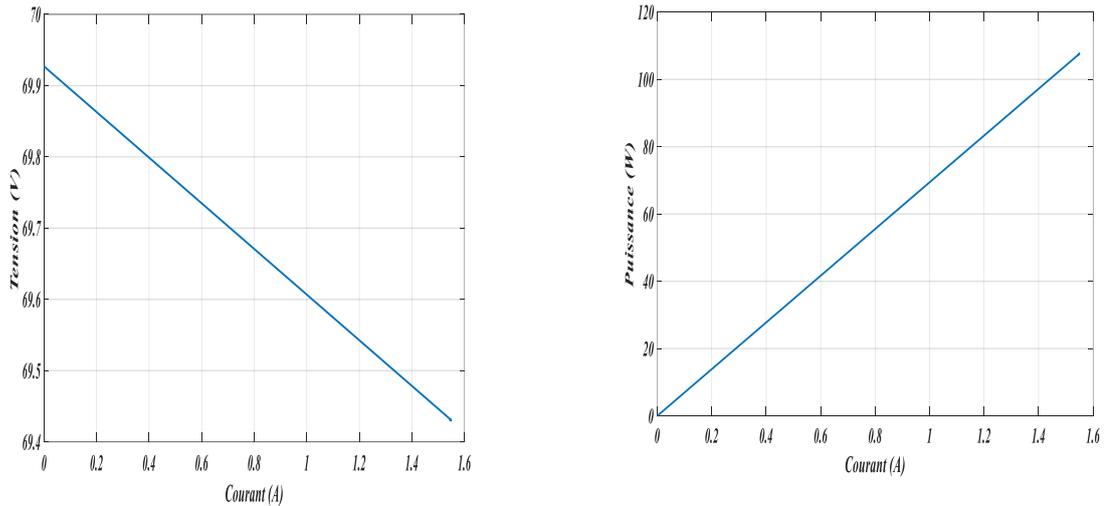


Figure 4-35 : Caractéristiques $V(I)$ et $P(I)$ d'une pile à combustible.

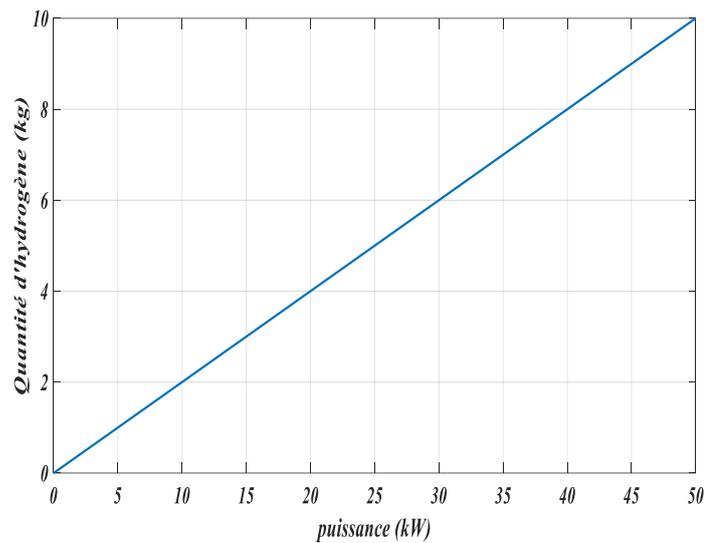


Figure 4-36 : la quantité d'hydrogène.

La quantité d'hydrogène consommé est linéairement proportionnelle à la puissance de la pile à combustible. Pour 10 kW de puissance on a besoin de 2 kg d'hydrogène.

4.4. Conclusion

En conclusion, la simulation de système hybride de capteurs photovoltaïques thermiques PVT avec convertisseurs boost et commande MPPT raccordés à une pile à combustible sous MATLAB Simulink est un outil essentiel pour prédire les performances et optimiser le fonctionnement du système.

Les résultats de la simulation ont montré que ce système hybride est capable de produire une énergie propre et renouvelable, avec une efficacité accrue grâce à l'utilisation combinée de l'énergie solaire photovoltaïque et thermique, ainsi qu'à la pile à combustible pour stocker l'énergie produite.

De plus, en ajustant les paramètres de la commande MPPT, il est possible d'optimiser la production d'énergie solaire, ce qui augmente l'efficacité énergétique globale du système.

Cependant, il convient de noter que la performance de ce système hybride est fortement tributaire des conditions météorologiques, car la production d'énergie solaire dépend de la quantité de lumière disponible. Par conséquent, une étude plus approfondie est nécessaire pour déterminer l'impact de diverses conditions météorologiques sur le fonctionnement du système.

En fin de compte, la simulation de système hybride de capteurs photovoltaïques thermiques PVT avec convertisseurs boost et commande MPPT raccordés à une pile à combustible sous MATLAB Simulink est une approche prometteuse pour la production d'énergie propre et renouvelable, qui mérite d'être poursuivie et développée davantage pour répondre aux besoins énergétiques croissants de la communauté mondiale tout en minimisant notre impact environnemental.

Référence

[1] Mathworks, cherché pour trouver « MATLAB The Language of Technical Computing »

Sur : https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, [en ligne], [consulté le 05 mai 2023].

[2] Hans-Petter Halvorsen; Introduction to Simulink, pdf.

[3] Mohammed, O. & Dhalsi, A.E.L. (2021). Etude et simulation d'un système hybride photovoltaïque et pile à combustible (Mémoire de master, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).



Conclusion Générale

Conclusion Générale

La conception et l'étude d'un système hybride piles à combustible et capteurs solaires PVT sont une étape importante pour développer une solution de production d'énergie propre et efficace. Les piles à combustible sont des dispositifs étonnants qui utilisent une réaction électrochimique pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir de combustibles tels que l'hydrogène. Ces dispositifs sont des alternatives durables et propres aux combustibles fossiles, qui présentent de nombreux avantages en termes de faibles émissions de gaz à effet de serre et de production d'énergie stable.

Cependant, en raison de leur coût élevé et de leur complexité, les piles à combustible ne sont pas encore largement utilisées dans l'industrie. C'est pourquoi il est important de rechercher des moyens de les rendre plus abordables et plus accessibles. C'est là que les capteurs solaires PVT entrent en jeu. Ils sont conçus pour capturer la lumière du soleil toute l'année, à la fois pour produire de l'électricité et pour chauffer l'eau. En intégrant ces deux systèmes de production d'énergie, nous pourrions concevoir un système hybride qui fonctionne plus efficacement et plus économiquement.

En travaillant en étroite collaboration avec des ingénieurs et des scientifiques, nous pouvons explorer les avantages de cette configuration et concevoir un prototype fonctionnel qui répond aux besoins de la communauté. Les systèmes hybrides piles à combustible et capteurs solaires PVT peuvent être utilisés pour fournir de l'énergie aux foyers, aux entreprises et aux communautés. Ils peuvent également être utilisés pour des projets de développement urbain durable, en particulier là où l'électricité n'est pas disponible 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

Le système hybride piles à combustible et capteurs solaires PVT offre également une solution à de nombreux problèmes environnementaux. Parce que les émissions de gaz à effet de serre sont une préoccupation environnementale majeure, ces systèmes offrent une solution pour réduire ces émissions, améliorant ainsi la qualité de l'air et la santé publique.

Cependant, pour que ces systèmes soient efficaces et rentables, il est important de poursuivre les recherches dans ce domaine. En effet, la conception de systèmes hybrides piles à combustible et capteurs solaires PVT nécessite des compétences et une expertise en matière de technologie de pointe. Cela nécessite également des investissements en R&D, des investissements que les gouvernements et les entreprises doivent envisager si nous voulons avancer vers une économie énergétique plus propre et durable.

Conclusion Générale

En fin de compte, la conception et l'étude d'un système hybride piles à combustible et capteurs solaires PVT s'inscrivent dans un contexte plus large de recherche de solutions durables pour répondre à nos besoins énergétiques. Alors que nous sommes confrontés à la crise climatique et à la raréfaction des combustibles fossiles, les systèmes hybrides piles à combustible et capteurs solaires PVT offrent une solution avancée et potentiellement viable pour produire de l'énergie propre et durable. Par conséquent, il est important de continuer à soutenir la recherche et le développement dans ce domaine et de prévaloir sur les avantages à long terme de l'utilisation des énergies renouvelables.

