

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
Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهرباء وmekanik
Département d'automatique et électromécanique
Mémoire de fin d'études, en vue de l'obtention du diplôme
Master

Domaine : Science et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie Renouvelable en Electrotechnique

Thème

Etude d'un système énergétique pour application mobile

Présenté Par : Zohra HAMMOUDA et Bahria BOUTAROUK

Soutenu publiquement le 15/06/2025

Devant le jury composé de :

MOSBAH Charaf Abelkrim
TOUAFEK Khaled
BOUCHAKOUR Abdelhak
ALLALI Mohammed

Maitre de Conférences A	Univ-de Ghardaïa	Président
Directeur de recherche	URAER de Ghar	Encadreur
Directeur de recherche	URAER de Ghar	Examinateur
Maitre de Conférences A	Univ de Ghardaïa	Examinateur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Avant tout, nous remercions ALLAH, le 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 l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER).

Nous tenons à remercier notre encadreur, Dr TOUAFEK Khaled pour avoir proposé et encadrer ce mémoire. Nous lui sommes extrêmement Reconnaissantes. Ce travail doit beaucoup à l'aide précieuse de plusieurs personnes de l'URAER et en particulier Dr. ABDELKRIM Thameur. Nous le remercions 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 d'examiner ce travail.

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 pour nous une Source motivante.

DEDICACE

Avec toute ma gratitude et ma sincérité, je dédie cette humble œuvre à :

**À l'âme de ma mère pure au Paradis et à mon cher père, que Dieu prolonge sa vie, du plus profond de mon cœur. Qu'ils trouvent ici mes remerciements et ma gratitude, qui, si grands soient-ils, n'égaleront jamais leur éloquence et leur sincérité. Rien ne saurait exprimer la profondeur de mes sentiments.*

**À mes frères :*

**À mes sœurs :*

**À mes amis :*

**À tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de cette œuvre.*

Zohra Hammouda

DEDICACE

Je dédie ce succès à moi-même ; abord, puis à tous ceux qui m'ont accompagné dans ce cheminement.

Je dédie ma remise de diplôme à celui dont je porte fièrement le nom. À celui qui a débarrassé les épines de mon chemin pour m'ouvrir la voie de l'apprentissage. Après la grâce de Dieu, je dois ce que je suis à mon père, l'homme qui a lutté toute sa vie pour que nous soyons meilleurs que lui : « Mon cher père ».

À la main invisible qui a dégagé les épines de mon chemin, et à celle qui a enduré chaque instant de douleur et ma soutenue dans mes moments de faiblesse : « Ma mère Fatima bien-aimée ».

À ma collègue Zahra, pour tous les précieux conseils et informations que nous avons partagés et qui ont enrichi notre étude à divers égards.

À mes frères et compagnons de route au fil des ans, et à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu sur ce chemin. Je vous suis reconnaissant à tous. Je ne serais pas arrivé jusqu' ici sans votre grâce, après celle de Dieu.

BOUTAROUK Bahria

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى نبذة نظام هجين والتحكم فيه. يجمع هذا النظام بين الألواح الكهروضوئية، خلية الوقود، ووحدة تخزين تعتمد على البطارية، وذلك لضمان تغذية كهربائية مستقرة ومستدامة. يتمثل الهدف الرئيسي في استخدام الاستطاعة القصوى من الألواح الكهروضوئية وخليه الوقود، مع الاستعانة بالبطارية عند الحاجة لتشغيل محرك كهربائي (ثنائي أو ثلاثي الطور) يغذي السيارات الكهربائية والمركبات البحرية. يعتمد النظام على مصادر الطاقة المتعددة (الشمس والحرارة) لتوليد الكهرباء التي تخزن لاحقًا في البطارية. يتم التحكم في جهد ناقل التيار المستمر باستخدام محولات لضمان تكامل فعال بين المصادر وتلبية المتطلبات والأحمال المتغيرة. كما تم اعتماد استراتيجية ذكية لإدارة الإنتاج والتخزين بهدف تحسين أداء النظام ككل والتقليل من نسبة التلوث البيئي.

الكلمات المفتاحية : لوحة كهروضوئية حرارية PV/T Hybride النظام الهجين، خلية الوقود،

Abstract

This memo aims to model and control a hybrid system. This system combines photovoltaic panels, a fuel cell, and a battery-based storage unit to ensure a stable and sustainable electricity supply. The main objective is to extract maximum power from the photovoltaic panels and the fuel cell, leveraging the battery when needed to operate a two- or three-phase electric motor that powers electric cars and marine vehicles. The system relies on renewable energy sources (solar and thermal) to generate electricity, which is then stored in the battery. The DC bus voltage had controlled using converters to ensure effective integration between the sources and meet varying requirements and loads. A smart strategy for managing production and storage been adopted to optimize overall system performance and reduce environmental pollution. Matlab/Simulink software has used to carry out the modeling and simulation work.

Keywords: photovoltaic thermal panel PV/Hybrid system, Fuel cell;

Résumé

Ce mémoire vise à modéliser et contrôler un système hybride. Ce système combine des panneaux photovoltaïques, une pile à combustible et une unité de stockage à base de batterie afin d'assurer une alimentation électrique stable et durable. L'objectif principal est d'extraire la puissance maximale des panneaux photovoltaïques et de la pile à combustible, en utilisant la batterie si nécessaire pour faire fonctionner un moteur électrique biphasé ou triphasé alimentant les voitures électriques et les véhicules marins.

Le système s'appuie sur des sources d'énergie renouvelables (solaire et thermique) pour générer de l'électricité, qui est ensuite stockée dans la batterie. La tension du bus CC est contrôlée à l'aide de convertisseurs pour assurer une intégration efficace entre les sources et répondre aux exigences et aux charges variables. Une stratégie intelligente de gestion de la production et du stockage a également été adoptée pour optimiser les performances globales du système et réduire la pollution environnementale. Le logiciel Matlab/Simulink a été utilisé pour effectuer les travaux de modélisation et de simulation.

Mots clés : panneau photovoltaïque thermique PV/T. Système hybride, Pile à combustible

Sommaire.

Liste des symboles	
List des tableaux.	
List des figures	
<i>Introduction Générale</i>	2
<i>Chapitre I Les énergies renouvelables dans le domaine mobile</i>	
1. Introduction	3
2. Les sources d'énergie renouvelable	3
2.1. Énergie solaire	3
2.1.1. Définition.....	3
2.1.2. Les panneaux solaires	4
2.1.3. Énergie solaire photovoltaïque	4
2.1.4 Thermodynamique solaire	6
2.1.5. Panneau solaire thermique.....	6
2.2. L'énergie éolienne	7
2.2.1. Définition.....	7
2.2.2. Fonctionnement une éolienne.....	7
2.2.3. Principe de fonctionnement.....	8
2.2.4. Différents types d'éoliennes.....	8
2.3. Énergie hydraulique ou marine	9
2.3.1. Définition.....	9
2.3.2. Fonctionnement.....	9
2.4. L'énergie géothermique	10
2.4.1. Définition.....	10
2.4.2. Fonctionnement.....	10
2.4.3. Les types des installations géothermiques	11
2.5. Energie Biomasse.....	11
2.5.1. Définition.....	11
2.5.2. Fonctionnement.....	11
3. Applications des énergies renouvelables.....	12
3.1. Application dans le domaine résidentiel.....	12
3.1.1. La photovoltaïque solaire dans le domaine résidentiel	13
3.1.2. Solaire thermique dans le domaine résidentiel	13
3.1.3. L'éolienne résidentielle dans le domaine résidentiel	13
3.2. Chauffe-eau solaire résidentiel	14
3.2.1. L'installation de chauffe-eau solaire	15
3.2.2. Le chauffe-eau-thermodynamique	15
3.3. Les tours solaires	16
3.3.1. Principe de fonctionnement	16
3.3.2. Systèmes de focalisation linéaire.....	16
3.3.3. Systèmes de mise au point.....	17
3.4. Les concentrateurs solaires	19
3.4.1. Définition.....	19

3.4.2. Types et éléments des complexes concentrés	19
4. Les applications dans le domaine mobile	20
4.1. Le véhicule électrique.....	20
4.1.1. Définition.....	20
4.1.2. Historique	20
4.1.3. Les types de voitures électriques	21
4.1.4. Les différents types de voiture électriques	21
4.1.5. Fonctionnement	21
4.1.6. L'avenir peut-on imaginer pour les voitures électriques ...	22
4.2. Le véhicule solaire.....	23
4.2.1. Fonctionne une voiture solaire	23
4.2.2. Les difficultés imposées par un tel véhicule.....	23
4.2.3. Les véhicules solaires existants	23
4.3. Le système PV et Thermique et pile à combustible pour les navires.....	24
Conclusion	25
<i>Chapitre II Etude d'un système énergétique à base de capteur hybrides PVT et pile à combustible</i>	27
Introduction	28
2. Capteur Hybride PVT	28
2.3. Principes de fonctionnements	29
3. Différents type de capteurs hybrides PVT	29
3.1 Capteur hybride à eau.....	29
3.2 Capteurs hybrides à AIR.....	30
3.3 Capteur hybride bi fluides	31
4. Application des capteurs PVT	31
4.1 Applications résidentielles.....	31
5. Les Avantages et inconvénients des capteurs Hybride PVT	32
5.1. Avantage des capteurs Hybride PVT.....	32
5.2. Inconvénients des capteurs Hybride PVT.....	32
6. Pile à combustible.....	33
6.1. Définition de pile à combustible	33
6.2. Différents types de pile à combustible.....	34
6.3. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	37
7. Différentes applications	38
7.1. Application Transport.....	39
7.2. Applications portables	39
7.3. Applications stationnaires.....	40
7.4. Innovations et applications futures	41
8. Les Avantages et inconvénients des piles à combustible.....	41
8.1. Les Avantages des piles à combustible.....	41
8.2. Inconvénients des piles à combustible.....	42
Conclusion	42

<i>Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible</i>	45
1. Introduction.....	46
2. Etude du système énergétique à base des capteurs PVT et PAC	46
2.1. Système hybride autonome (PV/T+PAC)	46
2.2. Système connecté au réseau	47
3. Éléments du Système.....	48
4. Modélisation du moteur électrique	48
4.1. Moteur électrique.....	48
4.2. Moteurs à courant continu	49
4.3. Moteurs à courant alternatif (AC).....	50
4.4. Moteurs asynchrones	51
4.4.1. Les hypothèses simplificatrices	51
4.4.2. Représentation du moteur dans l'espace électrique.....	52
4.4.3. Equation électrique	52
4.4.4. Équations magnétiques	52
4.4.5. Equation mécanique	53
4.5. Onduleur	54
4.5.1. Onduleur de tension triphasé	54
5. Modélisation du capteur PVT.....	54
5.1. Exemple de caractéristiques électriques	57
5.2. Les caractéristiques d'un module PVT.....	58
5.3. Modèle thermique du capteur PVT	59
5.4. Equations de transfert de chaleur dans le capteur.....	60
6. Technologie d'hydrogène	61
7. Modélisation de la pile à combustible	62
8. Les équations de Sankey typique et équation thermique pour une PEMFC.....	64
9. Application à l'alimentation énergétique d'un véhicule électrique....	65
Conclusion	65
<i>Chapitre IV Simulation du système hybride- Application à un véhicule électrique</i>	69
Introduction	70
2. Le système hybride PVT– PAC pour véhicule électrique.....	70
3. Simulation du système hybride PVT– PAC	71
3.1. La Simulation du PV	71
3.2. La commande globale de système Hybride.....	72
4. La Simulation du System globale	73
4.1. Le Résultats et commentaire	74
4.2. Résume	75
4.3. Le Résultats et commentaire de PV-V(v) /Ppv(w)/D/Ipv(A)	76
Conclusion Générale.....	78

Liste des Tableaux

List des tableaux

Tableau 01 : Les différents types des cellules PV	06
Tableau 02 : Les avantages et Les inconvénients de Chauffe-eau solaire résidentiel	18
Tableau 03 : Les différents types de voiture électriques.....	28
Tableau 04 : Types de piles à combustible.....	44

List des figures

Figure 1.1 : Application de l'énergie solaire	5
Figure 1.2 : Des utilisations des cellules photovoltaïques.....	5
Figure 1.3 : L'effet de PV.....	6
Figure 1.6 : Les capteurs d'une centrale solaire thermodynamique.....	9
Figure 1.7 : l'éolienne énergie.....	10
Figure 1.8 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	10
Figure 1.9 : les énergies hydrauliques.....	12
Figure 1.10 : Energie Géothermie.....	12
Figure 1.11 : les énergies hydrauliques.....	12
Figure 1.12 : Energie Géothermie	13
Figure 1.13 : Trois types de géothermie : de faible, moyenne et grande profondeur	14
Figure 1 . 14 : Arborescence de distribution de la biomasse d'origines végétales à usages énergétiques	15
Figure 1.15 : l'utilisation de cellule PV solaire résidentiel.....	16
Figure 1.16 : L'énergie solaire thermique.....	17
Figure 1.17 : L'éolienne résidentielle.....	17
Figure 1.18 : Schéma fonctionnement des panneaux solaire thermique.....	18
Figure 1.19 : Les chauffe-eau eau solaire.....	19
Figure 1.20 : Schéma des centrales solaires thermiques	20
Figure 1.21 : Schéma d'une centrale cylindre-parabolique avec stockage thermique	21
Figure 1.22 : Schéma Centrale à collecteur de Fresnel linéaire	22
Figure 1.23 : Schéma Centrale électrique à tour.....	22
Figure 1.24 : Fonctionnement de Centrale électrique à tour	23
Figure 1.25 : Schéma Centrale électrique à miroir parabolique	23
Figure 1.26 : Photo d'un héliostat de la centrale solaire de Thémis.....	24
Figure 1.27 : Types de capteurs solaires à concentration.....	25
Figure 1.28 : Schéma de représentation du processus de concentration de la lumière.....	26
Figure 1.29 : les voitures électriques.....	28
Figure 1.30 : la batterie de véhicule électrique.....	30
Figure 1.31 : la Freinage de véhicule électrique	30

Liste des figures

Figure 1.32 : Les véhicules solaires existants.....	32
Figure 2.1 : Composants d'un capteur hybride PVT	36
Figure 2.2 : le capteur hybride solaire PVT à eau.....	38
Figure 2.3 : Prototype de modèle PVT à air réalisée à l'URAER.....	38
Figure 2.4 : Prototype de modèle PVT à air réalisée à l'URAER	39
Figure 2.5 : Exemples d'installations PVIB.....	40
Figure 2.6 : Les dernières applications mobiles hybrides.....	41
Figure 2.7 : pile à combustible.....	42
Figure 2.8 : schéma de fonctionnement d'une pile à combustible	46
Figure 2.9 : Quelques exemples d'applications des PAC dans les domaines transports.....	47
Figure 2.10 : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable.....	48
Figure 2.11 : Pile à combustible au méthanol.....	48
Figure 2.12 : L'avenir des piles à combustible.....	49
Figure 3.2 : Système photovoltaïque hybrides autonomes.....	56
Figure 3.3 : Figure 3.5. Système connectée au réseau.....	57
Figure 3.4 : Schéma d'une machine asynchrone.....	60
Figure 3.5 : Représentation spatiale des enroulements de la machine asynchrone [6].....	61
Figure 3.6 : Schéma de Circuit d'une cellule photovoltaïque idéal.....	64
Figure 3.7 : Schéma de Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	64
Figure 3.8 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	65
Figure 3.9 : les caractéristique un panneau.....	67
Figure 3.10 : le capteur-solaire-PV / T a air.....	68
Figure 3.11 : Schématisation du collecteur plan à air.....	69
Figure 3.12 : Schéma électrique équivalente au capteur a air.....	69
Figure 3.13 : voiture à hydrogène, la Honda FCX,.....	71
Figure 3.14 : schéma de fonctionnement de PAC.....	72
Figure 3.15 : Schéma électrique dynamique équivalent d'une pile.....	72
Figure 4.1 : systèmes hybrides.....	79
Figure 4.2 : l'interface de SIMULINK.....	80
Figure 4.3 : Modèle de PV sous Matlab Simulink.....	81
Figure 4.4 : Modèle de Batterie.....	81
Figure 4.5 : Modèle de pile à combustible (PEMFC) sous Matlab Simulink.....	82
Figure 4.6 : Modèle d'onduler sous Matlab Simulink.....	82
Figure 4.7 : Modèle moteur asynchrone sous Matlab Simulink.....	83

Liste des figures

Figure 4.8 : Modèle système globale de Matlab Simulink.....	83
Figure 4.9 : Résultats de simulation de MATLEB de système global.....	84
Figure 4.10 : Résultats de simulation de MATLEB de moteur.....	85
Figure 4.11 : Résultats de simulation de MATLEB de PV-V(v) /Ppv(w)/D/Ipv(A)	85

List d'abréviations

PV : Photovoltaïque.

PVT : Photovoltaïque thermique.

MPPT: Maximum Power Point

Tracking. FF : Facteur de
forme.

Icc : Le courant de court-
circuit (A). Vco : La tension
de circuit ouvert (V) DC :
Courant Continu (Direct
Current).

AC : Courant Alternatif (Alternatif
Current) 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 chercheurs et spécialistes de l'énergie explorent des solutions novatrices pour satisfaire les besoins énergétiques croissants. Les énergies renouvelables se présentent comme une option plus propre et plus efficace que les combustibles fossiles. Les systèmes hybrides à piles à combustible et à énergie solaire photovoltaïque font partie de ces énergies renouvelables.

Un système hybride, alliant capteurs solaires et piles combustibles (PAC), exploite deux sources distinctes : les PAC génèrent du courant électrique grâce à l'hydrogène, alors que les capteurs solaires PV tirent leur énergie du rayonnement solaire. [1.12]

Les systèmes combinant PV/T et des PAC présentent de multiples atouts. En effet, ce type de dispositif génère de l'électricité et de la chaleur à partir de deux sources distinctes, ce qui accroît l'énergie disponible. Ces systèmes peuvent aussi aider à diminuer la pollution de l'air lorsqu'ils sont utilisés en milieu urbain. [1.21]

Il est nécessaire de procéder à une analyse approfondie afin de concevoir et d'étudier un système hybride combinant des PV/T et des PAC. Il est nécessaire de considérer leurs points positifs et négatifs, ainsi que les conditions opérationnelles pour garantir une efficacité maximale. En outre, il est essentiel de choisir avec soin les dimensions des composants afin d'assurer une performance et une fiabilité sur le long terme [2.3] [2.11].

Ce mémoire a pour but d'étudier un système énergétique reposant sur des PAC et des capteurs solaires hybrides PV/T. Il s'agit d'accroître la productivité de ces systèmes. Ce document se divise en quatre parties distinctes :

- ❖ Le premier chapitre a porté sur l'énergie renouvelable dans le secteur mobile.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, nous avons traité de l'état de l'art concernant les capteurs hybrides PVT et les piles à combustible.
- ❖ Dans le troisième chapitre, nous avons examiné un système énergétique reposant sur des capteurs hybrides et une pile à combustible.
- ❖ Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la simulation du système hybride dans le cadre d'une application à un véhicule électrique.

Chapitre I

Les énergies renouvelables

dans le domaine mobile

1. Introduction

On appelle énergies renouvelables l'ensemble de sources d'énergies qui sont produites à partir de sources naturelles qui sont constamment renouvelées à un rythme supérieur à leur consommation. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur, par exemple la lumière du soleil, le vent et la géothermie.

Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et présentes partout autour de nous. Les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) sont également des ressources non renouvelables qui mettent des centaines de millions d'années à se former. Les combustibles fossiles, lorsqu'ils sont brûlés pour la production d'énergie, provoquent des émissions de gaz à effet de serre nocifs, tels que le dioxyde de carbone [1.1].

Les énergies renouvelables sont désormais moins chères dans la plupart des pays et créent trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles [1.2].

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique
- L'énergie hydraulique est une utilisation d'énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants d'eau
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestre ou de sources chaudes.
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).

2. Les sources d'énergie renouvelable

La définition des principales énergies renouvelables

2.1. Énergie solaire

2.1.1. Définition

L'énergie solaire, ou le rayonnement solaire, est l'énergie émise par les rayons du soleil, principalement sous forme de chaleur et de lumière, et est le résultat de réactions nucléaires à l'intérieur de l'étoile la plus proche de nous, qui est le soleil. Cette énergie est d'une grande importance pour la Terre et les organismes vivants à sa surface, Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production

Électrique, et si elle est maîtrisée et exploitée de manière appropriée, elle pourrait répondre à tous les besoins énergétiques futurs. [1][2]

Il existe deux types d'énergie solaire : le PV et le solaire thermique.

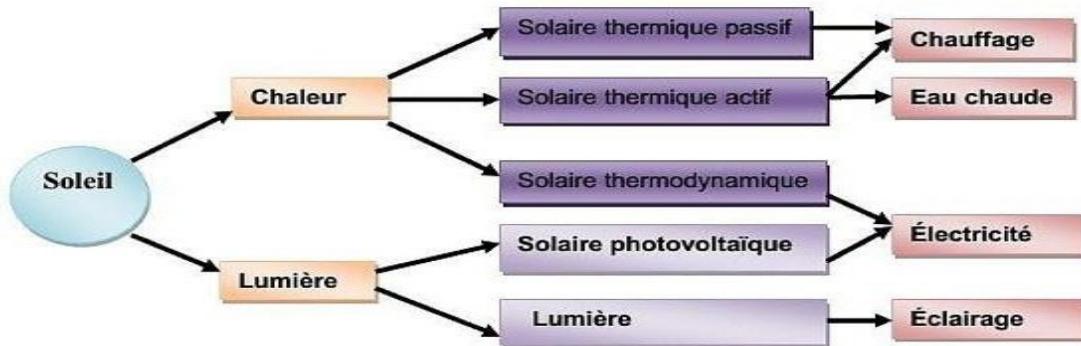


Figure 1.1 : Application de l'énergie solaire [1]

2.1.2. Les panneaux solaires

Les PV solaires sont constitués de cellules PV en silicium, un matériau semi-conducteur contenant des électrons. Sous l'influence de la lumière du soleil, les cellules PV produisent du courant continu. Le courant continu est converti par l'onduleur solaire en courant alternatif ; ce courant alternatif est injecté dans le réseau et fournit de l'électricité aux appareils électriques (box internet, appareils électroménagers, ampoules, etc.)

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la production et l'utilisation de l'énergie solaire (figue ci-dessus), de l'énergie solaire thermique, de la thermodynamique solaire, de l'énergie solaire, du PV et de l'éclairage naturel [3].



Figure 1.2 : Les utilisations des cellules PV [4]

2.1.3. Énergie solaire PV

Un PV solaire est un appareil qui convertit une partie du rayonnement solaire en Énergie thermique ou électrique, utilisant des capteurs solaires thermiques ou PV [4].

a- Le principe :

Le silicium a la capacité de générer de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil. C'est ce qu'on appelle l'effet PV et il est appliqué dans les cellules PV. L'énergie des photons de la lumière solaire est transférée aux électrons du matériau semi-conducteur. Ensuite, les électrons (couche n) commencent à se déplacer et génèrent un courant électrique qui se propage à travers une grille métallique très fine. Chaque cellule produit une petite quantité d'électricité. Elle sera convertie en courant alternatif à l'aide d'un onduleur et cette électricité produite pourra être utilisée immédiatement pour faire fonctionner des appareils ou pour l'éclairage. [5]

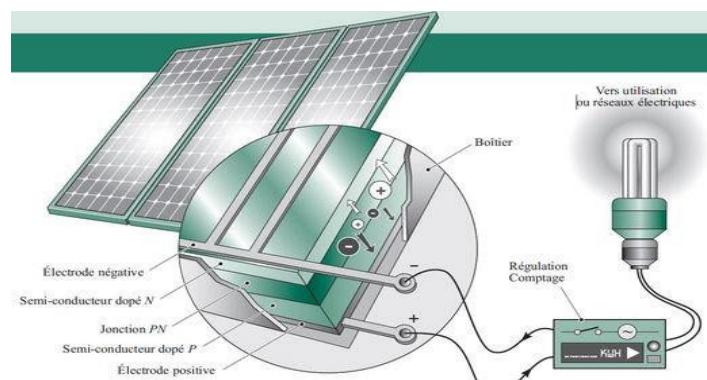
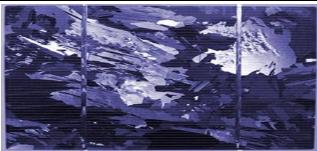
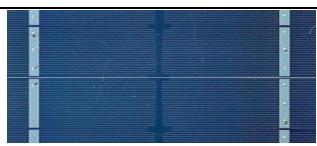
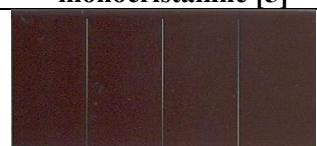


Figure 1.3 : l'effet de PV [5]

b- Les différents types des cellules PV : Il existe trois principaux types de cellules, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules [5] [6], les types sont donnés par le tableau suivant :

Types des cellules PV	Avantages	Inconvénients
 PV poly crystalline [5]	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement (environ 100 WC/m²) - Durée de vie (+/- 30 ans) - Moins cher 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendement faible sous un faible éclairement
 Cellule de silicium monocristalline [5]	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleur rendement (environ 150 WC/m²) - Durée de vie (+/- 30 ans) 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus cher Rendement - Faible sous un faible éclairement
 Cellule silicium amorphe (couche mince) [5]	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleurs rendements - La cellule peut être construite sur un substrat flexible 	<ul style="list-style-type: none"> - Les cellules en couche mince - Un rendement plus faible

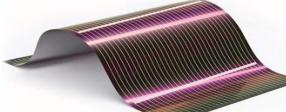
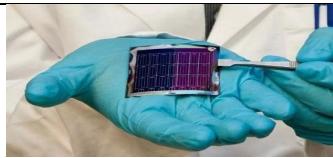
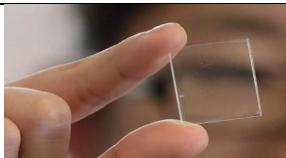
	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnent avec un éclairement faible - Bon marché et Souple - Moins sensible aux températures élevées 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible en plein soleil - Nécessite une surface plus grande - Durée de vie courte (+/- 10 ans), - Performances qui diminuent avec le temps
	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement inégalé 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas ou un peu applications
Cellule transparent [6]	 <p>Cellule solaire CZTS (cuivre zinc étain soufre)</p>	 <p>Cellule transparent</p>

Tableau 01 : Les différents types des cellules PV

2.1.4 Thermodynamique solaire

L'énergie solaire thermodynamique est une méthode de production d'électricité qui permet le stockage de l'énergie thermique pendant plusieurs heures après le coucher du soleil dans des centrales solaires à concentration. Le procédé consiste à focaliser la lumière du soleil à l'aide de miroirs pour chauffer un liquide à haute température (plusieurs centaines de degrés), produisant ainsi de la vapeur par échange de chaleur. Cette vapeur alimente ensuite une turbine qui produit de l'électricité. Le liquide utilisé peut maintenir sa température pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, ce qui permet de produire de l'électricité en début de soirée, lorsque la consommation est plus élevée. [7]



Figure 1.4 : Les capteurs d'une centrale solaire thermodynamique [7]

2.1.5 Panneau solaire thermique

Pour utiliser l'énergie solaire thermique, des panneaux solaires doivent être installés sur le

toit des maisons. Ces panneaux pourront réarranger la chaleur des rayons du soleil afin de permettre le réchauffement du liquide transportant l'information. L'information est ensuite transmise à un ballon tampon qui permet d'échanger des appareils de chauffage domestiques ou de l'eau chaude.

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement : - Directement au chauffage ou à l'eau domestique (serres, génie biologique, PV de chauffage solaire, chauffe-eau solaires) ou à la nourriture (cuisson solaire). -- Indirectement pour produire de la vapeur à partir du liquide de refroidissement pour actionner les turbines et ainsi obtenir de l'électricité (solaire thermique : centrales à tour, systèmes de miroirs Fresneletc.) [7]

2.2. L'énergie éolienne

2.2.1. Définition

Les premières éoliennes utilisées pour produire de l'électricité remontent aux années 1970. Cette énergie a été exploitée de diverses manières, d'abord avec les moulins à vent, dès l'Antiquité, puis en Europe du milieu du Moyen Âge au début du XXe siècle, avec les éoliennes pour pomper l'eau, pour les petites puissances, avec les éoliennes pour produire de l'électricité.

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est à son tour convertie en électricité. Pour produire plus d'énergie, plusieurs éoliennes sont installées au même endroit, appelé « parc éolien » ou « ferme éolienne ».

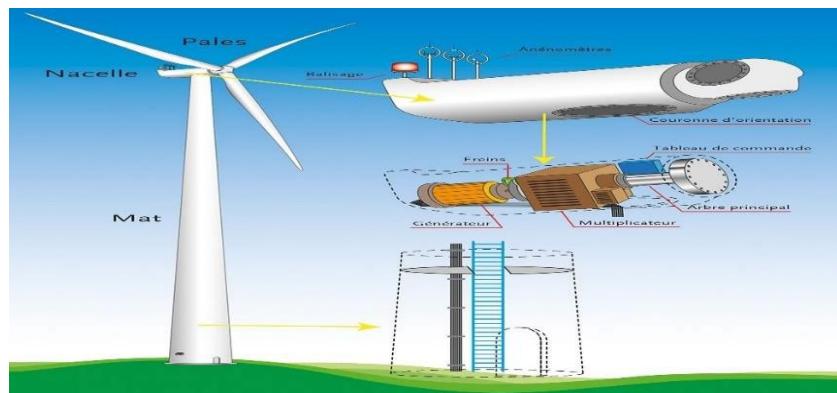


Figure 1.5 : l'éolienne énergie [8]

2.2.2. Fonctionnement une éolienne

L'énergie éolienne est produite grâce à la force exercée par le vent sur les pales reliées au rotor, qui se compose de trois pales tournant autour d'un axe horizontal, dont le diamètre de balayage varie de 80 à plus de 200 mètres. Plus les pales sont longues, plus la capacité de production d'énergie est grande. Pendant la rotation, la torsion entraîne un générateur qui produit de l'énergie électrique dont la vitesse de rotation varie entre 1000 et 2000 tr / min,

lorsqu'en tournant plus lentement (entre 5 et 25 tr / min), dans de telles éoliennes, un multiplicateur (ou réducteur) est installé entre le rotor et le générateur pour augmenter la vitesse de rotation.

La hauteur de la canopée varie entre 50 et plus de 200 mètres. Pour que le rotor et les pales soient toujours confrontés au vent. L'énergie électrique produite par le générateur est acheminée le long du mât à travers des câbles jusqu'à un transformateur, être injectée dans le réseau électrique par des câbles souterrains. Les coûts de fabrication sont élevés. Le Danemark est le pays qui a installé les premières éoliennes offshore en 1991. [9]

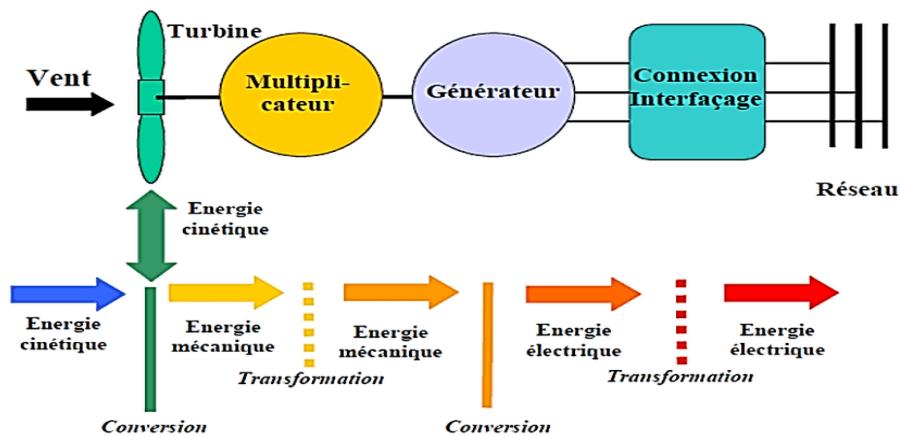


Figure 1.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

2.2.3. Principe de fonctionnement

Les éoliennes convertissent l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion s'effectue en deux étapes : la première se situe dans la turbine (rotor), qui extrait « l'énergie cinétique du vent » en énergie mécanique, en utilisant des sections d'air. Le flux d'air crée une direction autour de la section qui entraîne le rotor, et la force de traînée crée une force au niveau du générateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, qui est ensuite transmise au réseau électrique.

2.2.4. Différents types d'éoliennes

Les éoliennes sont divisées en deux types :

a-Eolienne à axe horizontal : Ce sont les machines les plus courantes disponibles aujourd'hui en raison de leur efficacité. On les appelle éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent. Ils sont généralement constitués de ventilateurs multiples à deux ou trois pales pour pomper l'eau et sont très efficaces et de conception simple. [8]

b-Éoliennes à axe vertical : Le "rotor" se trouve dans le nez de l'éolienne, ainsi que l'hélice. Lorsque le vent souffle, le ventilateur tourne et produit de l'électricité. [13]

Les petites éoliennes, également appelées éoliennes domestiques, sont de plus petite taille que ces dernières. [13]

2.3. Énergie hydraulique ou marine

Depuis le 19ème siècle, l'énergie hydroélectrique est exploitée grâce à des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. L'eau est renouvelée grâce au cycle de l'évaporation et des précipitations pendant des milliers d'années.

2.3.1. Définition

L'énergie hydraulique est la technologie utilisée pour produire et exploiter l'énergie résultant de la chute ou du mouvement de l'eau. Les turbines peuvent être converties directement en énergie mécanique (comme dans un moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs la convertissent en électricité. [13]

2.3.2. Fonctionnement

Il existe deux manières de produire de l'électricité en exploitant le phénomène des marées :

Méthode de construction d'un barrage pour contrôler les courants générés par les marées et diriger ces courants de manière à ce qu'ils passent à travers les ouvertures des turbines ou des hélices. Ces ventilateurs sont installés sous l'eau dans des buses. Les courants d'eau font tourner ces turbines et une transmission multiplie le couple. Ce couple entraîne ensuite un générateur électrique, qui fonctionne sur un champ magnétique et génère de l'énergie électrique.

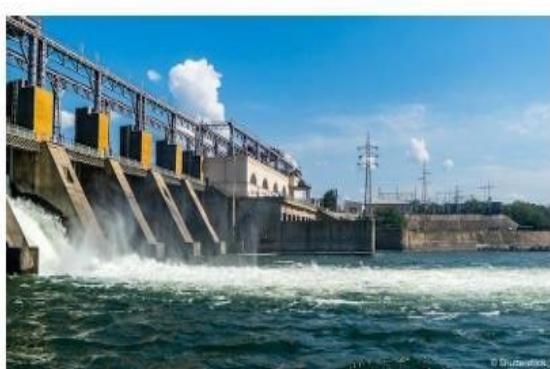
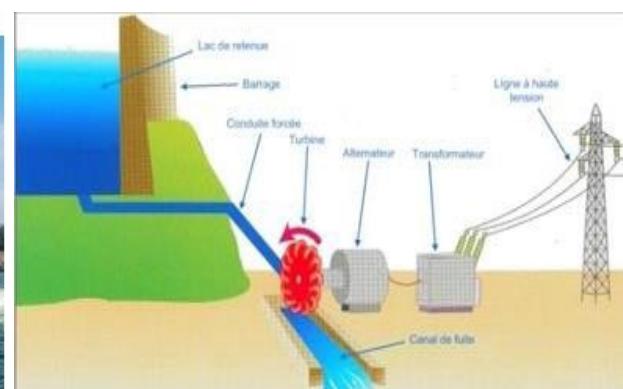


Schéma d'un barrage hydroélectrique



Energie hydraulique

Figure 1.7 : les énergies hydrauliques [14]

La deuxième méthode est la méthode de la tour, qui consiste à installer une ou deux hélices

sur une tour robuste de sorte que ces hélices soient sous la surface de l'eau et que l'énergie cinétique de l'hélice soit convertie en électricité par un générateur électrique.

Les tours ne forment pas une barrière maritime comme c'est le cas des barrages, et plus pratique de l'environnement.

2.4. L'énergie géothermique

L'une des sources d'énergies les plus importantes de notre planète est la chaleur naturelle. Plus nous creusons profondément, plus les températures que nous atteignons sont élevées. La géothermie utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité [15].

2.4.1. Définition

La géothermie est une forme d'énergie propre et renouvelable. C'est une énergie à haute température d'origine naturelle qui est stockée dans le magma profondément sous terre. Ils sont constitués de roches avec des températures supérieures à 1000 degrés Celsius. La température augmente à mesure que nous pénétrons plus profondément à l'intérieur de la Terre, à un taux d'environ 2,7 degrés Celsius par 100 mètres de profondeur.

2.4.2. Fonctionnement

Les centrales géothermiques utilisent l'eau qui se trouve naturellement dans les couches profondes de la Terre et est soumise à une pression et une température élevée. Il est extrait en forant des puits profonds et sort sous forme de vapeur d'eau en raison de la différence de température et de pression élevée. Cette vapeur traverse les tuyaux et est ensuite exposée à des turbines qui font tourner des générateurs électriques qui produisent de l'énergie électrique. L'eau condensée est pompée dans le sol par un autre puits, appelé puits d'injection.

Parfois de l'eau chaude est utilisée pour le chauffage lorsque la température est proche de la surface de la terre, et nous la trouvons à une profondeur de 150 mètres ou parfois dans certaines zones sous la forme de sources chaudes qui atteignent la surface de la Terre.

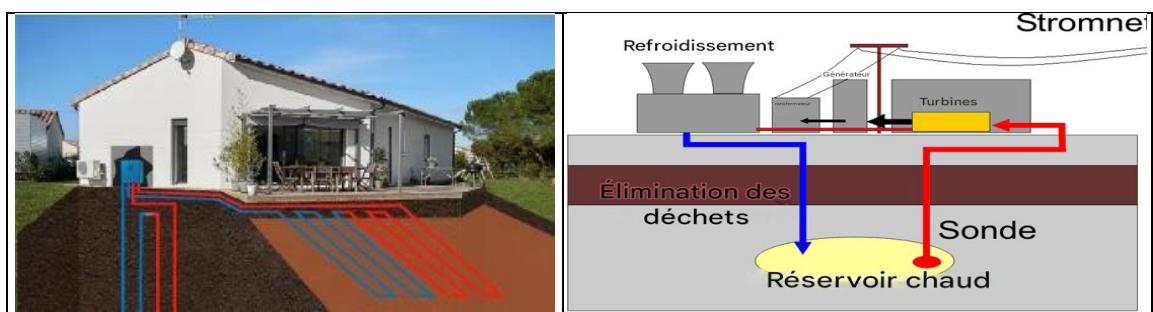


Figure 1.8 : Energie Géothermie [15]

2.4.3. Les types des installations géothermiques

- **Pompes à chaleur :** Ces pompes utilisent l'énergie géothermique de surface pour le chauffage.
- **Installations hydrothermales :** Ces installations exploitent des sources d'eau chaude naturelles et sont utilisées pour le chauffage ou la production d'électricité (pour les sources profondes).
- **Installations thermiques pétrolières :** Elles peuvent être utilisées lorsqu'il n'y a pas de source de chaleur. Il s'agit d'énergie géothermique profonde.

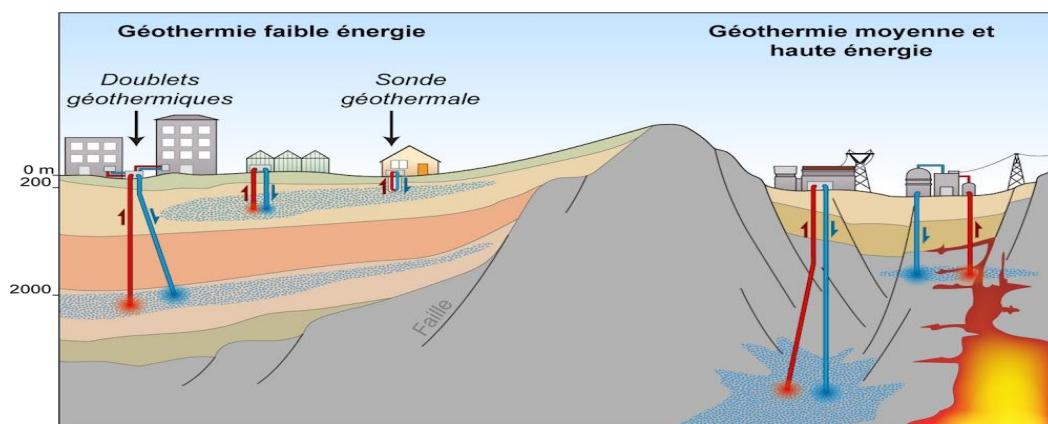


Figure 1.9 : Trois types de géothermie (de faible, moyenne et grande profondeur) [16]

2.5. Energie Biomasse

La première utilisation de la biomasse est le moment où l'homme a découvert le feu et a commencé à utiliser le bois comme source de chaleur et à cuire les aliments.

2.5.1. Définition

La biomasse est l'énergie contenue dans les plantes et la matière organique. Les plantes absorbent l'énergie solaire par photosynthèse, qui est ensuite transmise aux animaux lorsque ces plantes sont consommées.

La biomasse peut être obtenue à partir de divers secteurs et matériaux, tels que le bois, les cultures cultivées spécifiquement pour la production d'énergie, les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et organiques des déchets municipaux et industriels. [17]

2.5.2. Fonctionnement

On peut être utilisé de **trois manières différentes** : en la brûlant, en la pourrisant ou en la transformant chimiquement.

- **Combustion :** Utilisation du bois, des déchets agricoles et de certains déchets, tels que les déchets ménagers, les déchets industriels ordinaires ou déchets agricoles, comme combustible pour les chaudières.

- Décomposition : Sous l'action des bactéries, certains déchets (comme ceux de certaines stations d'épuration ou la partie organique des déchets ménagers) produisent du biogaz. Ce mélange gazeux est principalement composé de gaz méthane, qui, après purification, peut être utilisé pour alimenter des chaudières ou des véhicules fonctionnant au gaz naturel comprimé (GNC).

- Biocarburant : Certaines cultures, comme le colza et la betterave, ou certaines céréales, comme le blé, peuvent être transformées en biocarburant. L'huile de colza transformée est une excellente alternative au carburant diesel. Si le traitement chimique des céréales ou des betteraves peut fournir de l'ETPE, il est ajouté à l'essence pour réduire certaines des émissions polluantes de nos voitures. [17]

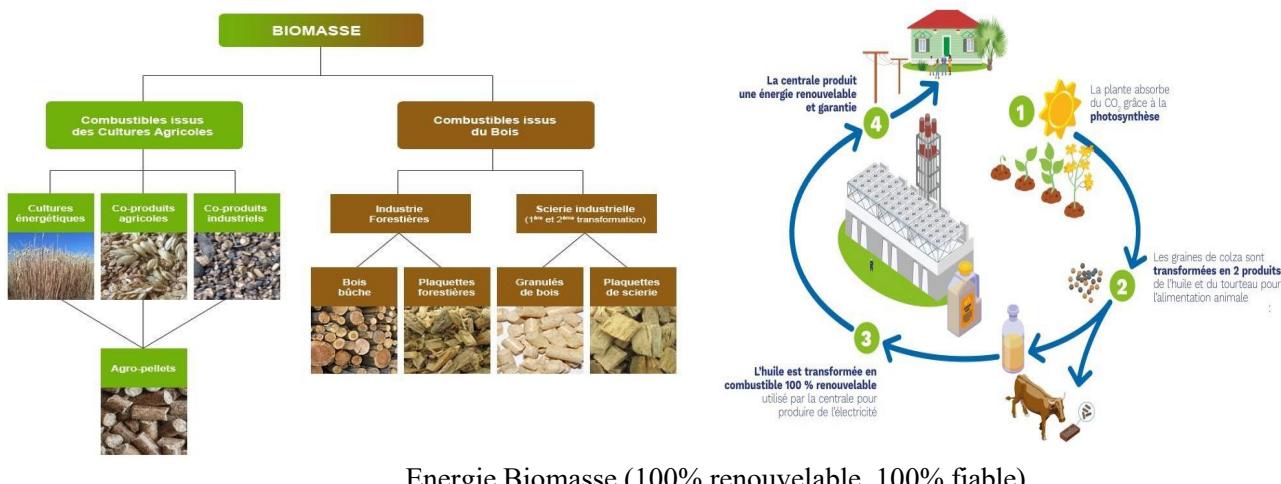


Figure 1.10 : Arborescence de distribution de la biomasse d'origines végétales à usages énergétiques [17]

3. Les applications des énergies renouvelables

3.1. Application dans le domaine résidentiel

Les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments résidentiels augmentent et le secteur de la construction se tourne de plus en plus vers les énergies renouvelables pour réduire les émissions de carbone des bâtiments et améliorer l'efficacité énergétique. Par exemple, les énergies renouvelables couvrent 30 % de la consommation d'électricité dans les pays européens, et le secteur de la construction couvre 27 % de sa consommation avec des énergies renouvelables.

Les solutions innovantes en matière d'énergie solaire, éolienne et géothermique sont désormais à l'avant-garde de la conception de bâtiments durables.

3.1.1. La photovoltaïque solaire dans le domaine résidentiel

L'énergie solaire est la ressource naturelle la plus abondante et la plus répandue au monde ; Il peut être utilisé dans l'éclairage résidentiel, l'électricité, la climatisation, le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire ... etc.

Pour installés les PV sur un bâtiment ou au sol et nécessitent trois éléments :

- Panneaux photovoltaïques ;
- L'onduleur convertit l'électricité reçue en courant alternatif ;
- Un appareil utilisé pour enregistrer la quantité de courant produite et distribuée. [18]



Figure 1.11 : l'utilisation de cellule PV solaire résidentiel [18]

3.1.2. Les PV/ thermique dans le domaine résidentiel

Un PV solaire thermique est une surface qui capte la lumière du soleil pour chauffer un fluide caloporteur placé sous les PV. Ce fluide chaud rejoint ensuite un ballon de stockage où il chauffe l'eau chaude sanitaire utilisée dans les robinets, les éviers, les douches, etc. La produisant indirectement de la vapeur à partir du fluide caloporteur, se tourner les turbines et ainsi produire de l'électricité, un foyer peut couvrir ses besoins en eau chaude jusqu'à 60% à 80%. [18]

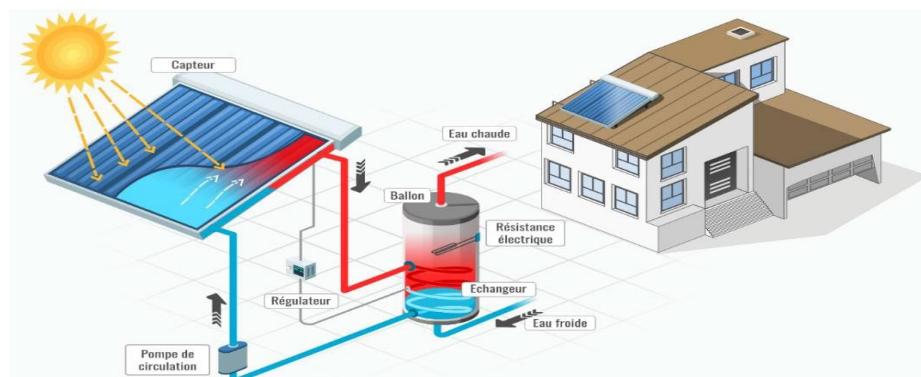


Figure 1.12 : L'énergie solaire thermique [18]

3.1.3. L'éolienne résidentielle dans le domaine résidentiel

Une résidentielle, est un dispositif conçu pour capter l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique dans l'environnement d'une maison ou d'une propriété résidentielle, par une génératrice électromagnétique située sur le même axe que le rotor.

L'installation peut être réalisée sur un terrain à proximité de la maison, sur le toit. L'emplacement est important pour l'efficacité de la production d'électricité. [19]

Il est conseillé de consulter des experts avant l'installation. Les ménages peuvent contribuer efficacement à construire un avenir plus propre, plus durable et plus autonome grâce à ces technologies.

3.2. Chauffe-eau solaire résidentiel avec PV/T

On Utiliser l'énergie solaire pour produire de l'eau chaude sanitaire, deux éléments principaux :

- Capteurs solaires thermiques.
- Réservoir de stockage d'eau.

L'énergie captée est absorbée par un fluide caloporteur qui transfère la chaleur au réservoir d'eau chaude de la maison. Le réservoir stocke l'eau chaude et la restitue au fur et à mesure que vous la consommez, peut couvrir au moins 50 % des besoins en eau chaude et réduisant votre facture. [19]

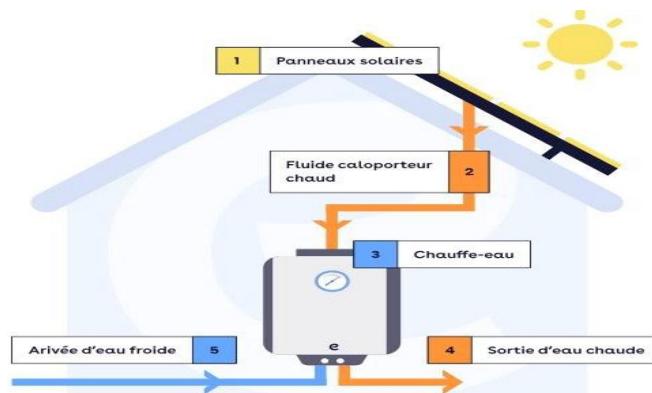


Figure 1.15 : Schéma fonctionnement des PV/T

Le tableau suivant donne Les avantages et Les inconvénients :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Production d'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie solaire renouvelable et illimitée -Économie d'énergie -Un écosystème qui n'affecte pas l'environnement -Plus-values immobilières, 75 % de facture d'eau chaude -Durabilité et fiabilité -maintenance rapide et facile 	<ul style="list-style-type: none"> -L'investissement initial est coûteux -Fonctionnement de jour uniquement -Diminution des performances dans des conditions météorologiques défavorables -Besoin de chauffage supplémentaire -Les tubes sont très fragiles -Les points d'étanchéité présentent des fuites très rapidement -Dans les zones chaudes, l'eau chauffe trop ce qui peut bruler l'utilisateur au bout du robinet

Tableaux 02 : Les avantages et Les inconvénients de chauffe-eau solaire résidentiel

3.2.1. L'installation de chauffe-eau solaire

Pour une installation optimale du radiateur, la pente du toit doit être orientée vers le sud à un angle d'environ 45 degrés et éviter que les panneaux ne soient bloqués par l'ombre d'un autre bâtiment ou de plantes.

La superficie moyenne varie de 3 à 5 mètres carrés. Des PV/T sont reliés au ballon d'eau chaude. L'installation ne prend que quelques jours

Pour assurer le fonctionnement, il faut vérifier (état du capteur, pression du fluide caloporteur, fonctionnement de la pompe, isolation thermique des tuyaux, etc.) peut fonctionner parfaitement pendant 20 ans et éviter la surchauffe .En hiver, il contient un antigel (glycol) qui l'empêche de geler, et l'appareil doit être légèrement incliné pour améliorer ses performances.

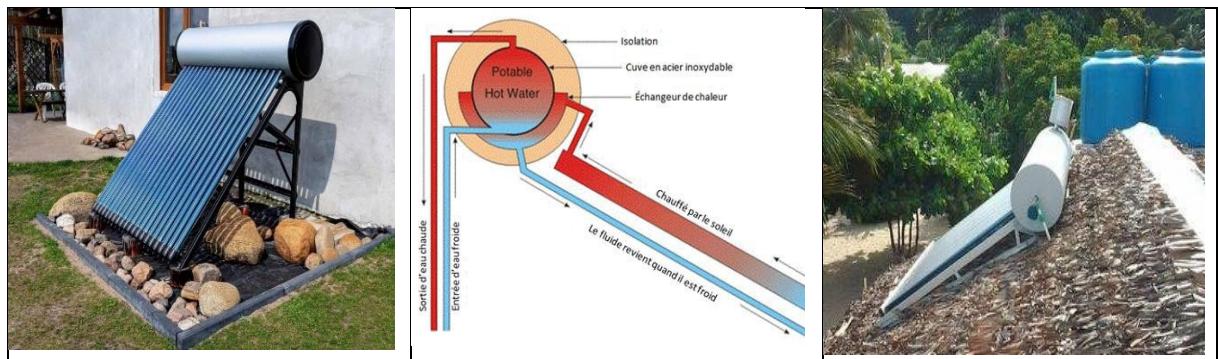


Figure 1.16 : Les chauffe-eau eau solaire

Le chauffe-eau-thermodynamique

Un chauffe-eau thermoélectrique dynamique (ou CETI) est composé d'un ballon de stockage et d'une pompe à chaleur air-air. Un chauffe-eau solaire simple fonctionne à l'énergie solaire, tandis qu'un CETI tire son énergie de l'air extérieur. Le réservoir d'eau est relié à des panneaux solaires thermiques qui captent la chaleur du soleil et la restituent au réseau d'eau domestique. Il est donc conseillé de s'adresser à un professionnel.

3.3. Les tours solaires

Les tours solaires thermiques ou tours solaires (en anglais CSP pour Concentration Solar Power Plant) sont des installations qui utilisent l'énergie solaire pour produire de l'électricité. Ils fonctionnent en utilisant des miroirs ou des lentilles pour concentrer les rayons du soleil sur un point focal, généralement situé au sommet de la tour. Ce procédé permet de chauffer un liquide (le plus souvent de l'eau ou un fluide caloporteur) qui, à son tour, produit de la vapeur pour alimenter la turbine et générer de l'électricité.

3.3.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des centrales solaires thermiques reposent sur la technique suivante :

- 1/ Des miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C).
- 2/ La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière.
- 3/ La vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur.
- 4/ L'alternateur produit un courant électrique alternatif.

Il existe 3 types de centrales solaires, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

- La centrale solaire à tour
- Le collecteur cylindre-parabolique
- Le collecteur Fresnel linéaire

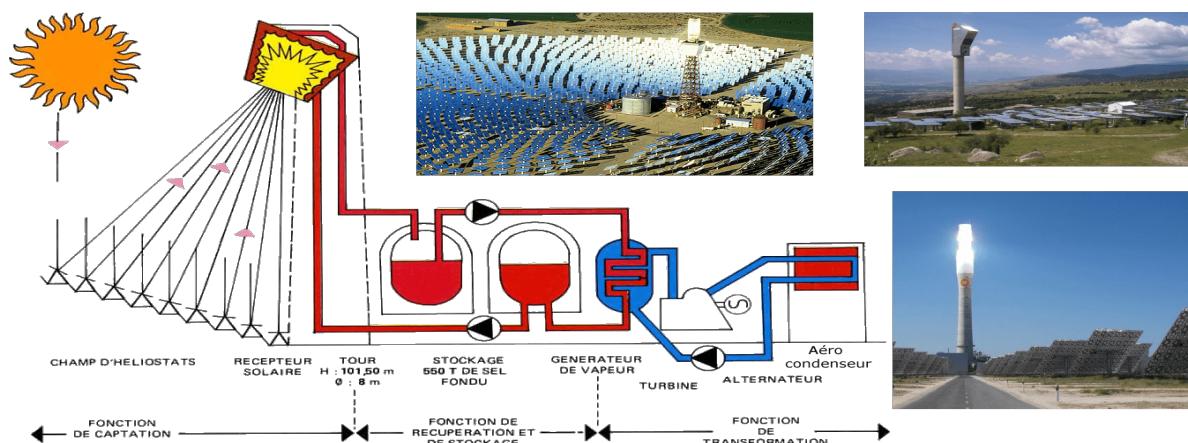
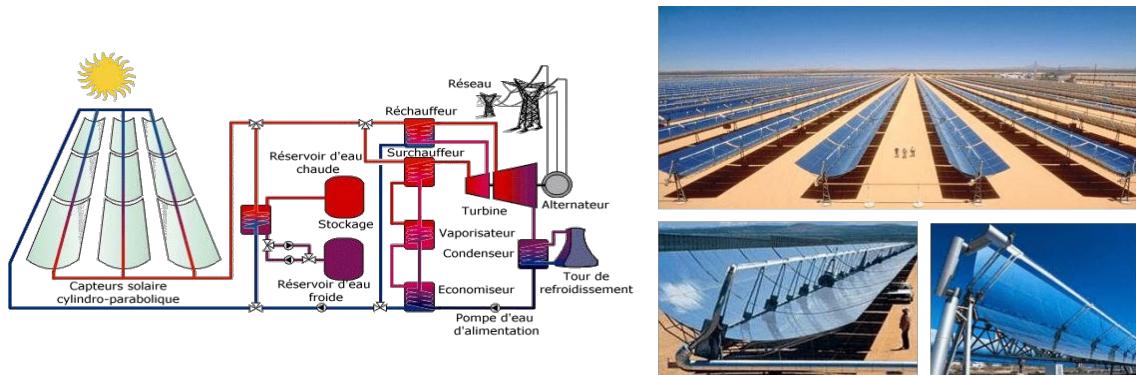


Figure 1.17 : Schéma des centrales solaires thermiques

3.3.2. Systèmes de focalisation linéaire

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tubes d'absorption installés le long de la ligne focale des miroirs. Ce tube contient un liquide dans lequel le fluide caloporteur est chauffé à une température de 250 ° à 500 degrés Celsius.

A. Centrale à miroirs cylindre-paraboliques : se compose d'un réflecteur parabolique (miroir), d'une structure métallique, d'un tube récepteur et d'un de suivi du soleil. Le mécanisme de suivi ajuste l'inclinaison du capteur de sorte que le rayonnement solaire incident soit toujours perpendiculaire au réflecteur.



La nuit ou par mauvais temps, un poêle à combustible fossile peut produire de la vapeur. Grâce au stockage thermique, la station peut également produire de l'électricité même lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible.

Figure 1.18 : Schéma d'une centrale cylindre-parabolique avec stockage thermique

B. Centrale à collecteur de Fresnel linéaire : Les réflecteurs, qui réfléchissent et concentrent les rayons du soleil, sont complètement plats et disposés de manière linéaire. Ils sont disposés en longues rangées de miroirs mobiles. Les miroirs, disposés en parallèle, focalisent l'énergie du rayonnement solaire vers un système absorbeur d'environ 8 mètres de haut.



Figure 1.19 : Schéma Centrale à collecteur de Fresnel linéaire

3.3.3. Systèmes de mise au point

Le rayonnement solaire est concentré dans un foyer environ 1000 fois sa taille. La température peut atteindre 500 à 1000 degrés Celsius.

A. Centrale électrique à tour : Un grand nombre de miroirs qui suivent la course du soleil, les « Miroirs solaires », réfléchissent et focalisent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au

sommet de la tour

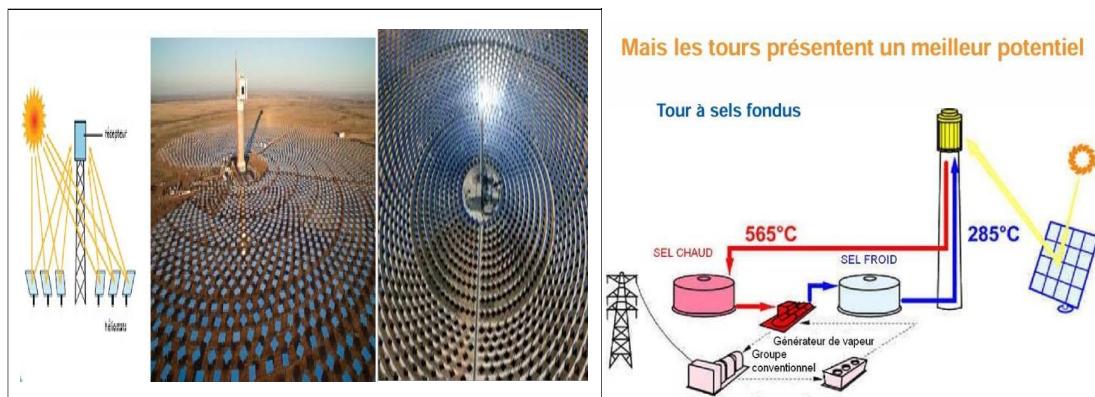


Figure 1.20 : Schéma Centrale électrique à tour - Figure 1.21 : Fonctionnement de Centrale électrique à tour

B. Centrale électrique à miroir parabolique Plat Stirling :

La parabole concentre le rayonnement vers un foyer sur son axe, afin d'entraîner ce qu'on appelle un moteur Desch- Stirling. C'est la seule technologie qui peut être mise en œuvre dans des espaces isolés et confinés. [2]



Figure 1.22 : Schéma Centrale électrique à miroir parabolique

C. Les héliostats : Les héliostats sont constitués d'un ou plusieurs miroirs réfléchissants plans ou légèrement concaves dont les surfaces sont comprises entre 50 m² et 150 m². Ils sont utilisés dans la technologie des tours solaires. Les miroirs sont montés sur une structure mécanique asservie à la trajectoire du soleil.



Les rayons réfléchis par un champ d'héliostats doivent être dirigés vers le récepteur (tour centrale). Les angles de suivi et d'incidence de l'héliostat peuvent être déterminés à partir de la méthode des vecteurs.

3.4. Les concentrateurs solaires

3.4.1. Définition

Un concentrateur solaire est un appareil qui concentre la lumière du soleil pour fournir l'intensité et la longueur d'onde nécessaires aux réactions photo catalytiques. Les températures élevées sont obtenues en concentrant l'énergie solaire et en la dirigeant vers une zone spécifique.

3.4.2. Types et éléments des complexes concentrés

Un récepteur solaire est un dispositif présent dans toute installation de conversion d'énergie solaire et capable de convertir le rayonnement solaire en plusieurs formes d'énergie.

Il peut s'agir :

La centrale électrique endothermique (récupération d'énergie thermique) :

Le rayonnement thermique est absorbé pour chauffer le fluide, qui transfère cette énergie absorbée à un générateur.

La centrale photovoltaïque (convertir la lumière en énergie électrique) : la lumière provoque un effet photo courant dans le matériau de la cellule solaire, générant un courant électrique. Pour augmenter la force :

- Augmentant le nombre de récepteurs
- Consiste à concentrer le flux de rayonnement, le dispositif de focalisation (généralement un dispositif optique) est placé entre la source lumineuse (le soleil) et le récepteur.

Les concentrateurs d'imagerie sont appelés concentrateurs d'imagerie car ils produisent une image optique du soleil sur le récepteur.

Les focalisateurs non imageurs ont un rapport de mise au point relativement faible (<10) par rapport aux focalisateurs imageurs.

Rapport Focus :

Le processus de focalisation de la lumière est généralement affecté par le rapport de concentration (C). En termes physiques, le rapport de concentration est le fait que le flux d'énergie (I_o) est augmenté à la surface du récepteur (I_r).

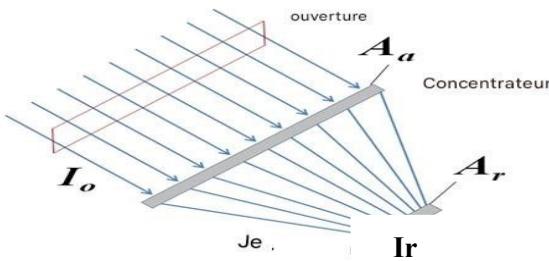


Figure 1.25 : Schéma de représentation du processus de concentration de la lumière [31]

Dans l'équation ci-dessus, C_{geo} est appelé le rapport de concentration géométrique. Le flux de rayonnement est uniforme à travers l'ouverture et le récepteur. Si l'image ne couvre pas toute la surface du récepteur,

$$C_{geo} = \text{zone de l'ouverture / zone de récepteur} = A_a / A_r$$

« C_{geo} » Le rapport entre la surface d'ouverture A_a et la surface d'absorption A_r .

C_{opt} = le flux moyen sur le récepteur / le flux sur le récepteur (isolation)

$$C_{opt} = \frac{1}{A_r} \int \frac{I_r D A_r}{I_o}$$

Peut également du rapport de focalisation optique C_{opt} (ou rapport de focalisation de flux).

Si le flux d'énergie ambiant à travers l'ouverture (rayonnement solaire) et à travers le récepteur (rayonnement) est uniforme, sont égaux ($C_{geo} = C_{opt}$).

4. Les applications dans le domaine mobile

Ces dernières années, la popularité des véhicules électriques a augmenté dans les pays riches et qui font les recherches. Cela dépend de : recharge, stationnement, navigation, surveillance et entretien.

4.1. Le véhicule électrique

4.1.1. Définition

Une voiture électrique est une voiture qui fonctionne entièrement à l'électricité. Cette énergie est stockée dans une batterie rechargeable. Le véhicule est propulsé par un ou plusieurs moteurs électriques alimentés par des batteries. Bien entendu, les voitures électriques ne nécessitent pas de carburant et n'émettent pas de gaz d'échappement, ce qui les rend plus respectueuses de l'environnement que les voitures à moteur à combustion.

4.1.2. Historique

Dès 1830, le premier prototype connu de véhicule électrique fut conçu par Robert Anderson sur la base d'une voiture tirée par des chevaux. En 1834, l'Américain Thomas Davenport conçoit le premier modèle de véhicule électrique, qui ressemble davantage à une locomotive. En 1852,

Grâce à ces hommes, la voiture électrique prit véritablement son essor, car la voiture électrique devint viable lorsqu'elle pouvait être rechargée. 1830, le premier prototype connu de véhicule électrique fut conçu par Robert Anderson sur la base d'une voiture tirée par des chevaux. En 1834, l'Américain Thomas Davenport conçoit le premier modèle de véhicule électrique, qui ressemble davantage à une locomotive.

L'année 1859 voit l'invention de la batterie rechargeable au plomb par Gaston Planté. Elle fut ensuite améliorée grâce aux travaux de Camille Faure en 1881. Grâce à ces hommes, la voiture électrique prit véritablement son essor, car la voiture électrique devint viable lorsqu'elle pouvait être rechargée. [20]



Prototype voiture électrique, Robert Anderson en La Tesla Model S
1830-

Figure 1.26 : les voitures électriques

4.1.3. Les types de voitures électriques

« Véhicule électrique » désigne un véhicule qui se déplace grâce à la puissance mécanique fournie par un moteur électrique. Il est alimenté par une batterie de stockage. [20]

* Si le moteur électrique est alimenté par une pile à combustible à hydrogène, c'est-à-dire une « Voiture à hydrogène ».

4.1.4. Les différents types de voiture électriques

Désignation	Type de moteur propulsant le véhicule	Source de l'énergie utilisée par le moteur
Voiture électromotrice	Électrique	Électricité stockée dans les batteries
Voiture hybride	Électrique, couple au thermique	Carburant consommé par le moteur thermique Générateur pour les hybrides rechargeables Électricité stockée dans les batteries
Voiture à hydrogène	Moteur électrique	Électricité produite par la pile à combustible

Tableau 04 : Les différents types de voiture électriques [20]

4.1.5. Fonctionnement

Pour faire le plein, un véhicule électrique doit être branché à une prise électrique ou à une borne de recharge à l'aide d'un câble équipé des connecteurs appropriés. Deux normes de câble sont disponibles : la norme européenne « Combo CCS » et la norme japonaise « CHA de MO».

[20]

A. Onduleur : convertit le courant continu (CC) au courant alternatif (CA). Les batteries ne peuvent stocker l'énergie que sous forme de CC.

B. Batterie : Le courant s'accumule entre les cellules, Le courant stocké dans la batterie est alors dirigé vers un ou plusieurs moteurs électriques.

Exemple : Une batterie de 50 kWh chargée à 10 kW peut se recharger en environ 5 heures. Lorsque la charge dépasse 80 %, la batterie réduit automatiquement la vitesse de charge.

C. Transmission : Un véhicule électrique ne possède pas de boîte de vitesses, Il assure une rotation directe, contrairement à un moteur à combustion, qui doit convertir le mouvement rectiligne des pistons en mouvement circulaire. Il nécessite moins d'entretien.

D. Freinage régénératif : L'avantage des véhicules à batterie réside dans leur capacité à produire d'électricité. Lorsque le moteur électrique fonctionne « en vase clos », il n'a pas besoin d'électricité, comme c'est le cas à chaque fois que vous levez le pied de l'accélérateur ou du frein. L'énergie récupérée est ensuite injectée directement dans la batterie.



Figure 1.27 : la batterie de véhicule électrique [34]

D. Les pannes : Les pannes techniques sont rares. Si le niveau de charge de la batterie baisse, la voiture émet un avertissement, généralement entre 5 et 10 %. Un message s'affiche sur le tableau de bord pour alerter l'utilisateur. Selon le modèle, lorsque la batterie est déchargée, le « Mode Tortue » est activée et les vitesses supérieures à 10 km/h ne sont pas autorisées.

4.1.6. L'avenir peut-on imaginer pour les voitures électriques

À l'avenir, seuls les véhicules électriques, décarbonés, seront autorisés afin de réduire leur impact environnemental.

Les voitures électriques sont de plus en plus intégrées aux sources d'énergie renouvelables, telles que le solaire, l'éolien et les piles à combustible.

4.2. Le véhicule solaire

La voiture solaire est composée d'un moteur, d'un volant, de quatre roues... et de PV qui fonctionnent grâce à la lumière du soleil. Cette idée a fasciné aux chercheurs.

En 1955, un ingénieur de General Motors émerveille les visiteurs du Salon de l'auto de Chicago avec un modèle miniature équipé de 12 photocellules. Bien que la voiture solaire ne soit encore qu'un rêve commercial, les chercheurs ont l'intention de rendre cette invention disponible et peu coûteuse un jour.

4.2.1. Fonctionne une voiture solaire

La voiture à énergie solaire se déplace grâce à la propulsion électrique. Les batteries qui l'alimentent sont rechargées grâce à la technologie PV et l'électricité est produite par la lumière du soleil.

Le principe est le même que dans n'importe quelle voiture électrique, avec une source d'énergie variable.

4.2.2. Les difficultés imposées par un tel véhicule

La voiture a besoin d'une très grande quantité d'électricité. Le véhicule ne peut pas effectuer de longs trajets. Le rendement énergétique PV moyen est d'environ 20 à 30% malgré les évolutions, mais il reste encore très faible.

4.2.3. Les véhicules solaires existants

Light-year est une marque néerlandaise créée par des ingénieurs diplômés de l'Université d'Eindhoven. De 2013 à 2017, ils ont produit plusieurs modèles de Tesla : Light-year 0, Light-year 1 et Light-year 2. Leur autonomie est d'environ 3 000 kilomètres et leur prix varie entre 40 000 € et 250 000 €.

Sono Motors est une start-up spécialisée dans l'énergie solaire. Sono a produit la Sion, une petite voiture équipée de 248 cellules solaires et de 7,5 m² de panneaux photovoltaïques. Autonomie : 300 kilomètres ; prix : moins de 30 000 €. Elle était encore en phase d'essai en 2010.

Conçu par une entreprise française, **l'Hélios** est un véhicule électrique solaire de 4 mètres

De long, pesant 165 kilogrammes et doté d'une surface de panneaux solaires de 6 m². Il a été conçu à l'Institut Supérieur d'Enseignement Supérieur de Lille, en Belgique.



La Light-year 0

Sono Motors

L'Hélios

Figure 1.28 : Les véhicules solaires existants

4.3. Le système PV et Thermique et PAC pour les navires

L'étude des systèmes PV, thermiques et à PAC pour les navires est essentielle dans le contexte de la transition énergétique et de la réduction des émissions dans le secteur maritime. Diverses technologies l'intégration des énergies renouvelables. [21]

- Systèmes PV pour les navires

Les systèmes PV convertissent la lumière du soleil en électricité grâce à des PV. Cette technologie est adaptée aux environnements marins très ensoleillés.

- ✓ Énergie solaire illimitée.
- ✓ Réduit l'empreinte carbone du navire.
- ✓ Faibles coûts d'exploitation. Une fois installée, Installation de PV sur le pont.
- ✓ Systèmes de stockage d'énergie (batteries) pour une utilisation nocturne ou par temps nuageux.

- Systèmes thermiques

Utilisés pour chauffer l'eau ou les espaces à bord grâce à des capteurs PV/T pour fournir de l'eau chaude à bord (comme les cuisines et les baignoires).

L'énergie thermique est utilisée pour chauffer la cabine.

- Piles à combustible

Les PAC à hydrogène produisent de l'électricité par réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène, produisant de l'eau comme seul sous-produit.

- Idéales pour les applications marines
- Capacité à fournir une puissance constante, en l'absence de soleil.
- Systèmes de stockage d'hydrogène (gazeux ou liquide).
- Distribution d'électricité embarquée.

- Système hybride

La combinaison de ces trois technologies peut améliorer l'indépendance énergétique

d'un navire :

- Les panneaux solaires peuvent charger les batteries
- Les systèmes thermiques peuvent produire de l'eau chaude,
- Les PAC à hydrogène peuvent être utilisées dans des applications à forte demande énergétique.

- Défis et solutions

Coûts d'équipement initiaux

- Espace limité à bord pour les PV.
- Les infrastructures de ravitaillement en hydrogène restent sous-développées.
- Innovations technologiques visant à réduire les coûts et à améliorer l'efficacité des systèmes.
- Soutien financier aux technologies du secteur maritime.
- L'utilisation combinée de systèmes PV/T et de PAC à hydrogène représente une voie prometteuse pour améliorer la durabilité et l'efficacité énergétique des navires.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des explications générales sur les formes d'énergies renouvelables utilisées dans le passé et actuellement et leurs utilisations dans plusieurs secteurs tels que la construction de panneaux solaires usagés ou de voitures solaires et l'électriques, et les navires.

Références

- [2] Ana Galan, (2019) "The Power of the Sun", "How the pros and cons of solar power have Changed (Artc du livre, series -Spot on Science & Technologies), Poland.
- [3] Alexandre Joly, (2025), comment ça-marche l'énergie solaire photovoltaïque (Artc de connaissance des énergies, France)
- [4] Caroline Dusanter, (2024), Énergie solaire (article, Lyon, France)
- [5] Nihed toumi, (2021), energie solaire photovoltaïque et systeme photovoltaïque autonome, (Master, univ-b, mokhtar, Annaba)
- [6] Garout nourdine, (2021), Généralité sur les cellules photovoltaïque (mémoire de master, univ Ouargla)
- [7] khadraoui Zakaria, (2017), Etude centrale solaire thermique (mémoire de master univ badji Mokhtar)
- [8] BEKHOUCHE, Fouad & RAHOU, Mohamed, (2015), Généralité sur le système l'éolienne-, Master-univers-ibn khaldoune Tiaret
- [9] Zoubir de, Beleaid nada, (2020), Energie éolienne (mémoire de master univ badji Mokhtar Annaba)
- [10] Hamza mesai Ahmed, (2017), Conversion-de-l 'énergie-cinétique-du-vent (mémoire de master univ, Salhi Ahmed Naama)
- [11] Boubaker Boukhezzar, (2006) Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable, (article-univ, Constantine, Alger)
- [12] Bounaceur Amin, (2015), Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie, (mémoire de master univ, Ouargla)
- [13] Ben Amara Nabil, (2022),Energies éolienne,(cour, UNI Djilali yabiss-sidi belabass)
- [14] Rapport mondial, (2012) sur les énergies renouvelables, (Etude, Milan, France)
- [15] Ladislaus rybach ,(2007),Geothermal Sustainability" (Etude ,Swindled)
- [16] Damien Do Couto, (2021), comment-marchent-ils-et-quels-sont-les-risques (etude, univ-Sorbonne)
- [17] ARTC/Valthéra (2017), une plateforme technologique de pointe consacrée à la biomasse- France
- [18] Benherfallah Mouna, (2023), Simulation Dynamique d'un Système de Chauffage Solaire D'une Piscine Privée Extérieure, (Univ-Saad dahleb Blida)
- [19] Djafour A, Boutelli, H, (2023), Etude d'un système hybride à sources d'énergie renouvelables dans la région d'Ouargla (Doctorat/kasdi merbah Ouargla)
- [20] Artc, Hyundai Motors (2025), voiture-électrique, (France)

[21] Brahimi. Mimi, F, (2021), Energie Photovoltaïque et Pile à Combustible, (Univ Annaba)

Chapitre II

*Etude d'un système énergétique à base de
capteur hybrides PVT et pile à
combustible*

1. Introduction

Deux technologies innovantes dans le domaine des énergies renouvelables sont les capteurs photo thermiques et les piles à combustible. Les dispositifs thermoélectriques PVT combinent deux technologies de détection : la production d'énergie électrique via des cellules solaires et la production de chaleur via des échangeurs de chaleur. Mais les batteries produisent de l'énergie en interagissant avec l'hydrogène et l'oxygène dans une réaction chimique qui produit de la chaleur.

Les deux offrent des avantages significatifs en termes de durabilité et de fiabilité, et devraient avoir un impact significatif sur l'avenir de la production énergétique. Les appareils et batteries hybrides PVT produisent de l'électricité et de la chaleur à partir du carburant, créant ainsi des générateurs d'énergie au dioxyde de carbone. À mesure que la demande de sources d'énergie durables augmente, les capteurs solaires hybrides PVT et les piles à combustible sont devenus des solutions prometteuses pour améliorer

L'efficacité de la conversion énergétique.

Analyser l'état de l'art de ces technologies pour comprendre leur évolution et les possibilités de les améliorer, c'est ce que nous voyons dans ce chapitre.

2. Capteur Hybride PV/T

Un capteur PV/T est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. [1]. (Figure 2.1).

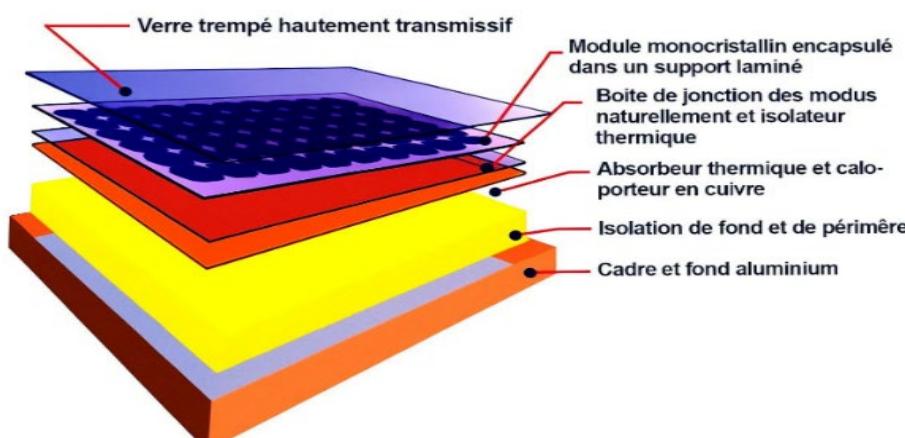


Figure 2.1 : Composants d'un capteur hybride PVT [2]

La production commerciale a commencé au 19e siècle, lorsque le produit a commencé à apparaître sur le marché. Les origines de l'énergie PV remontent aux années 1950 et 1960. Une organisation systématique et une concentration sur les activités de recherche et développement ont été mises en place. Secteur spatial. Proposition de combiner la production de chaleur et d'électricité via un seul appareil. La détention proprement dite est apparue dans les années 1970.

2.3. Principes de fonctionnements

La principale caractéristique d'un système solaire hybride PV/T est la conversion du rayonnement solaire en électricité, en chaleur en même temps et elles sont généralement tenues au même endroit ;

Ce qui rend la combinaison du ces système est particulièrement intéressante, via le procédé d'extraction de chaleur du PV/T, la cellule PV est activement refroidie ce qui permet de stabiliser ces performances électriques élevées (le rendement total de l'énergie produite par unité de surface est augmenté) ;

Un mètre carré de surface de PV/T donne plus d'électricité et de la chaleur par rapport à un mètre carré de module PV et d'un mètre carré d'un capteur solaires thermiques séparément installés, les systèmes combinés permettent une apparence plus uniforme sur les toits et Diminuée des coûts de l'installation. [1].

3. Différents type de capteurs hybrides PVT

Le concept de capteur hybride photoélectrique-thermique est basé sur les fonctions de l'électricité et de la chaleur. Parmi ses types les plus importants figurent :

- 1- capteurs hybrides à eau
- 2- capteurs hybrides à air
- 3- capteurs hybrides bi fluides

3.1.Capteur hybride à eau

En 1997, Fujisawa et Tanis ont conçu et construit un capteur solaire PV/T hybride à eau sur une cité universitaire à Tokyo, au japon. [3]

Le PV hybride vecteur eau est constitué d'une face avant composée de cellules PV poly cristallines qui produisent de l'électricité et en face arrière d'un échangeur thermique qui récupère la chaleur produite pour délivrer de l'eau chaude sanitaire. Le processus est semblable

au PV/T.

Le PV hybride vecteur eau (PV/T à eau) utilise la chaleur emmagasinée pour chauffer un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur est de ce fait constitué d'eau et va distribuer l'eau chauffée à un chauffe-eau solaire et redistribuera l'eau froide pour refroidir les panneaux solaires afin d'augmenter le rendement de production (Figure2.2). [4]



Figure 2.2 : le capteur hybride solaire PVT à eau

3.2 .Capteurs hybrides à air

Dans les capteurs solaires PV refroidis par air, l'air est utilisé comme fluide de travail (ou caloporteur), régulant la température des cellules PV. Les principales applications de ce type de collecteur sont la ventilation et le chauffage des locaux, ou à des fins de préchauffage de l'air, où ils sont intégrés dans les toits et les façades des bâtiments, ou installés comme composants autonomes sur les toits, où l'air chaud généré peut être utilisé pour le séchage, le chauffage des locaux ou la ventilation [5] L'utilisation d'un capteur photoélectrique améliore son efficacité électrique (Figure 2-3).



Figure 2.3 : Prototype de modèle PVT à air réalisée à l'URAER [2]

3.2.Capteur hybride bi fluides

En 2001, Trip Anagnostopoulos a étudié un capteur solaire hybride Utilisation de deux types de fluide caloporteur disposés en chevauchement. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement pour évaluation Comportement de chaque forme de production de chaleur (air ou eau). [6]

Pendant qu'il émet de l'électricité, le module photovoltaïque produit de la chaleur récupérée par un fluide, dit fluide caloporteur circulant dans la couche inférieure du capteur hybride. Le fluide caloporteur est aussi chargé de refroidir ce module pour améliorer sa performance.

Plus simplement, la couche du côté soleil – couche supérieure – produit de l'électricité grâce aux cellules PV exposées au rayonnement solaire.

La couche côté intérieur – couche inférieure – capte la chaleur du soleil grâce à ses capteurs solaires thermiques.

En 2011, trois configurations ont été analysées expérimentalement, Etude d'un capteur solaire hybride bi-liquide pour Évaluer le comportement de chaque configuration de formes de production de chaleur. Deux fluides caloporteurs sont disposés superposés. Des cellules PV ont été utilisées Fabriqués en silicium poly cristallin car ces cellules assurent de bonnes performances [7]. La figure suivante montre :

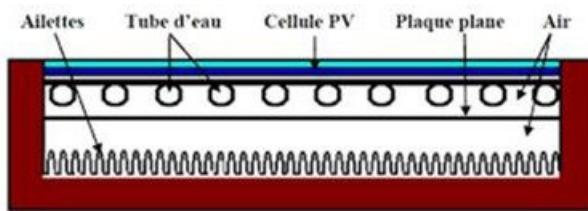


Figure 2.4 : Prototype de modèle PVT à air réalisée à l'URAER [2]

4. Application des capteurs PV/T

4.1.Applications résidentielles

Il est nécessaire d'intégrer des systèmes hybrides PV/T avec les batteries pour d'améliorer les performances électriques et thermiques. Le terme « PV intégré au bâtiment (BIPV/T) » fait référence à l'intégration d'un système PV ou PV/T dans la structure d'un bâtiment.

Les installations photovoltaïques PV intégrées aux bâtiments (PVIB) sont des produits ou des systèmes de production d'énergie solaire qui sont intégrés de façon transparente dans l'enveloppe du bâtiment, composant une partie du bâtiment comme un toit, une façade ou des fenêtres. Les systèmes PVIB sont des composantes intégrales des enveloppes de bâtiments et convertissent l'énergie solaire en électricité

Il est apparu pour la première fois dans les années 1990 Le BIPV/T a été proposé sur les toits des restaurants pour fournir de l'électricité et Production d'eau chaude aux États-Unis Dans le système PV à air intégré au bâtiment (air BIPV/T),

L'air est utilisé pour extraire la chaleur des modules PV intégrés au bâtiment. Grâce au flux d'air, la température du module PV est réduite et le problème est éliminé Gel en hiver [9].



Figure 2.5 : Exemples d'installations BIPV/T

5. Les Avantages et inconvénients des capteurs Hybride PVT

5.1. Avantages des capteurs Hybride PVT

Le capteur hybride PV-T n'est pas polluant car il utilise le soleil librement et de manière illimitée comme source d'énergie.

Le capteur hybride PV-T est un système de production silencieux, nécessitant peu d'entretien et bien adapté aux petites surfaces. Sa durée de vie est de plus de 20 ans : c'est donc un investissement rentable.

5.2. Inconvénients des capteurs Hybride PVT

- Complexe et coûteux à installer :** La combinaison de deux technologies différentes engendre l'installation d'un système de chauffage solaire thermique couplé à la technologie

photovoltaïque, ce qui complexifie l'installation (nécessitent des composants supplémentaires).

- **Complexe et couteux à installer :** Les installations de panneaux solaires hybrides nécessitent plus de composants et peuvent être plus compliquées à entretenir régulièrement.

- **Pertes d'efficacité :** La combinaison de deux systèmes de production de chaleur et d'électricité peut entraîner des pertes d'inefficacité. De plus, les panneaux ne couvrent pas l'entièreté des besoins de chauffage en période d'hiver lorsque l'ensoleillement est plus faible.

- **Nécessite plus d'espace :** L'installation de PV solaires hybrides peut nécessiter plus d'espace que de PV solaires classiques. L'installation sur toiture reste idéale pour des petites toitures.

6. Pile à combustible

6.1. Définition

Une PAC est un générateur d'énergie électrochimique Il permet la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique et L'énergie thermique.

Cette cellule électrochimique est utilisée pour produire de l'énergie électrique en fournissant continuellement à la cellule de l'oxygène et de l'hydrogène gazeux. Ou bien il stocke l'hydrogène sous pression dans des tubes et extrait l'oxygène de l'air. À l'anode, l'hydrogène est oxydé en protons (qui vont à l'intérieur du milieu électrolytique jusqu'à la cathode) et en électrons (qui vont de l'extérieur de la cellule à la cathode), où ils rencontrent tous l'oxygène. (Figure2.7) [11]

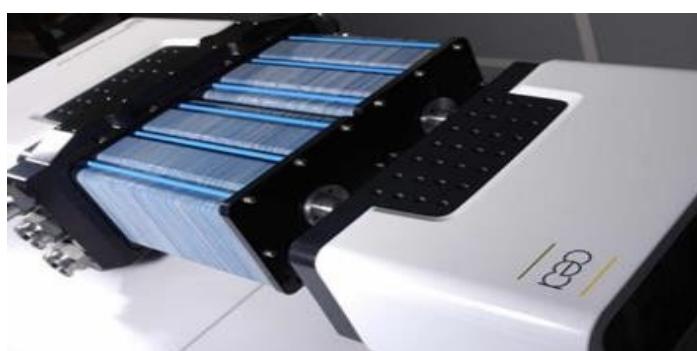


Figure 2.7 : Pile à combustible

En 1839, un avocat anglais, Sir William GROVE, chercheur amateur en électrochimie, découvre le principe de PAC. A l'exception de quelques tentatives de développement à la fin du XIXème siècle, on en restera à cette curiosité scientifique durant pratiquement une centaine d'années. Elle trouvera sa première application concrète 130 ans plus tard dans les programmes

spatiaux GEMINI et APOLLO. [12]

En 1889, L. Mond et C. Langer ont introduit les catalyseurs, également appelés platine, et ont amélioré l'électrolyte. [2]

En 1921, E. Baur comprend l'importance de la cinétique et crée une cellule capable de fonctionner à des températures élevées (1000 °C). [2]

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. [2]

1939-1953 : les travaux de Francis T. Bacon permettent la mise en place d'un premier prototype industriel de puissance (de l'ordre du kW).

1960 : la NASA sort la pile à hydrogène de l'oubli en l'utilisant pour alimenter ses véhicules spatiaux. [12]

En 1973, les piles à combustible ont été utilisées dans Le transport est intéressant. Le premier choc pétrolier a poussé les gouvernements et les industries Et les laboratoires à la recherche d'alternatives aux énergies fossiles pour assurer l'indépendance énergie. De nombreuses mesures ont été prises pour réduire les coûts de fabrication. [2]

Le type PEM (Proton Exchange Membrane, également connu sous le nom de PEFC (Polymère 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 [2]

Années 2020 : les piles à combustible se positionnent comme une solution clé pour la transition énergétique, avec des applications croissantes dans les transports, l'industrie et les infrastructures énergétiques, et une attention accrue à l'hydrogène vert produit à partir de sources renouvelables. [12]

6.2. Différents types de PAC

Les PAC sont classées en fonction de leurs matériaux électrolytiques, ou il existe plusieurs types de PAC développées pour différentes applications, notamment :

Trois à électrolytes acides (ions H⁺ migrant de l'anode vers la cathode) :

- **Les PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). L'électrolyte est constitué d'une membrane solide polymère fonctionnant à basse température. (20-100°C). Celle-ci transmet

sélectivement vers la cathode les ions H⁺ formés par oxydation catalytique de l'hydrogène injectée directement sur l'anode ;

- **Les DMFC** (Direct Methanol Fuel Cell). Au lieu d'hydrogène, ces piles utilisent comme combustible le méthanol (CH₃OH). Injecté directement sur l'anode avec de l'eau son oxydation catalytique produit des ions H⁺ et du gaz carbonique. Comme sur les PEMFC, une membrane solide polymère transmet sélectivement les H⁺ vers la cathode ;
- **Les PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell) utilisent à la place de membranes solides de l'acide phosphorique liquide occlus dans une matrice solide poreuse. Elles peuvent fonctionner jusqu'à 200°C.

Trois à électrolytes basiques (ions négatifs migrant de la cathode vers l'anode) :

- **Les AFC** à potasse liquide (Alkaline Fuel Cell) utilisent l'ion OH⁻ libéré par réduction catalytique de cette base sur la cathode ;
- **Les MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell) utilisent des carbonates de lithium et de potassium fondus pour faire migrer des ions CO₃⁻² ;
- **Les SOFC** (Solid Oxide Fuel Cell) exploitent un électrolyte solide (zirconium dopé aux terres rares) pour produire des ions O⁻²

En gros, le choix de l'électrolyte dicte la plage de température de fonctionnement de la PAC. La température de fonctionnement et la durée de vie utile d'une PAC dictent les propriétés physicochimiques et thermomécaniques des matériaux utilisés dans les composants de la cellule (c'est-à-dire les électrodes, l'électrolyte, L'interconnexion, le collecteur de courant, etc.).

En gros, le choix de l'électrolyte dicte la plage de température de fonctionnement de la PAC. La température de fonctionnement et la durée de vie utile d'une PAC dictent les propriétés physicochimiques et thermomécaniques des matériaux utilisés dans les composants de la cellule (c'est-à-dire les électrodes, l'électrolyte, L'interconnexion, le collecteur de courant, etc.).

La température de Fonctionnement joue également un rôle important dans la détermination du degré de traitement du carburant requis. Dans les PAC à basse température, tout le carburant doit être converti en hydrogène avant d'entrer dans la PAC.

De plus, le catalyseur de l'anode des PAC à basse température (principalement du platine) est fortement empoisonné par le CO. Dans les PAC à haute température, le CO et même le CH₄ peuvent être convertis en hydrogène ou même en interne directement oxydé électro-chimiquement. Le tableau 1 donne un aperçu des principales caractéristiques des principaux types de piles à combustible [13]

Caractéristique /Type	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	S0FC
Électrolyte	Membranes Échangeuses d'ions Polymères Hydratées	Hydroxyde De potassium Mobilisé où Immobilisé Dans une Matrice D'amiante	Acide Phosphorai Que Liquide Immobilise Dans Sic	Carbonate Fondu Liquide Immobilisé dans LiAlO ₂	Pérovskites (Céramique)
Électrodes	Carbone	Métaux de Transition	Carbone	Nickel et Oxyde de Nickel	Pérovskite et pérovskite /cermet Métallique
Catalyseur	Platine	Platine	Platine	Matériau D'électrode	Matériau D'électrode
Interconnexion	Carbone Ou métal	Métal	Graphite	Acier Inoxydable Ou nickel	Nickel, céramique Ou acier
Température de fonctionnement	40 – 80°C	65°C –220°C	205 °C	650 °C	600-1000 °C

Porteur de charge	H^+	OH^-	H^+	CO^{-3}	O^-
Reformeur externe pour carburants Hydrocarbures	Oui	Oui	Oui	Non, pour Certains Carburants	Non, pour Certains Carburants et conception de Cellules
Conversion par Déplacement externe du CO en hydrogène	Oui, plus Purification pour éliminer Les traces De CO	Oui, plus Purification Pour éliminer Le CO et le CO2	Oui	Non	Non
Composants de la cellule principale	À base de Carbone	À base de Carbone	À base de Graphite	À base D'inox. Céramique	À base d'inox. Céramique
Produit Gestion de l'eau	Evaporatif	Évaporatif	Évaporatif	Produit Gazeux	Produit gazeux
Product Heat Management	Process Gas+ Liquid Cooling Medium.	Gaz de Procédé + Circulation D'électrolyte	Gaz de Procédé + Milieu de Refroidissement Liquide où Génération De vapeur	Reformage interne + gaz de Procédé	Reformage Interne + gaz de Procédé

Tableau 09 : Types de piles à combustible

6.3. Principe de fonctionnement d'une PAC

Une PAC est un dispositif capable de convertir de l'énergie chimique directement en énergie électrique sans passer par des processus thermiques ou mécaniques externes.

Une caractéristique essentielle des PAC est la charge électrique détermine les taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Alimentation en gaz à l'anode pour l'hydrogène et la cathode pour l'oxygène. Par conséquent, la structure de la pile à combustible Il y a des entrées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains à haute basse température, autre basse température. Les PAC fonctionnant à basse température nécessitent souvent des catalyseurs de métaux précieux, généralement du platine, pour améliorer la réaction des

électrodes. La plupart des PAC sont utilisées pour Les applications automobiles utilisent des électrolytes solides à basse température qui conduisent des ions d'hydrogène.

En principe, les PAC peuvent fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène est considéré comme le carburant le plus efficace car il a une plus haute réactivité électrochimique que d'autres carburants tels qu'hydrocarbures ou alcools. L'oxygène est un excellent oxydant en raison de sa haute la réactivité et son abondance dans l'air [14] (Figure2.8).

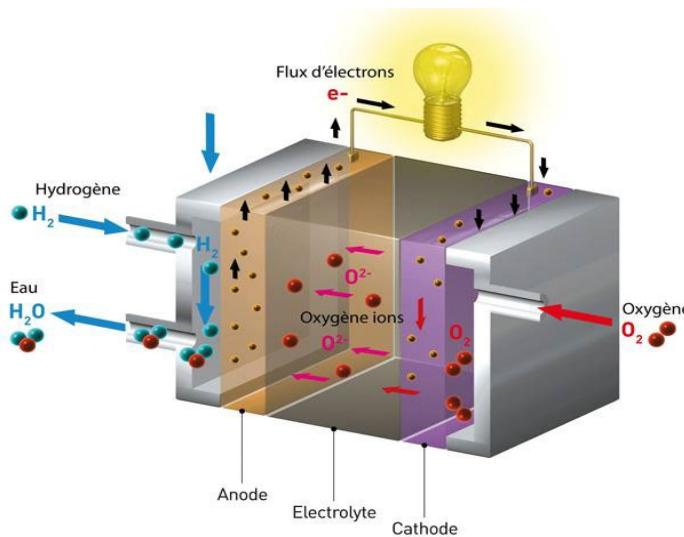


Figure 2.8 : schéma de fonctionnement d'une PAC [15]

L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons qui circulent dans le circuit électrique reliant l'anode à la cathode. A la cathode a lieu la réduction de l'oxygène, demandant une activation catalytique plus forte que l'hydrogène mais relativement aisée avec les catalyseurs appropriés :

- ❖ Réaction anodique : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2 e^-$
- ❖ Réaction cathodique : $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$
- ❖ Réaction globale : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$
- ❖ Le bilan de la réaction est alors : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{chaleur}$

7. Différentes applications

On distingue habituellement trois grands types d'applications :

- transport
- portables

- stationnaires

7.1. Application Transport

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de PAC à partir du début des années 90. Les PAC génèrent de l'électricité

Grâce à un mélange d'hydrogène comprimé et d'oxygène de l'atmosphère pour produire l'énergie nécessaire au fonctionnement des moteurs. Étant donné que les PAC n'émettent que de la chaleur et de l'eau, la mobilité des PAC est classée comme zéro émission. Même si la production d'hydrogène elle-même peut être polluante, elle est capable de réduire les émissions de gaz à effet de serre de plus de 30 %.

- Les transports terrestres : les véhicules électriques (véhicules légers, bus, scooter.).
- Les transports maritimes : navires, sous-marins, bateaux électriques.
- Transport aériens : les avions monomoteurs, les avions multi moteurs sans pilote. [16]



Figure 2.9 : exemples d'applications des PAC dans les domaines transports [17]

7.2. Applications portables

Grâce à leur modularité, les PAC ont la capacité d'être produites sur une plage de puissance nominale très large selon les applications. Exigence croissante en matière de qualité, de densité et de respect des délais destiné au marché de la production, qui comprend un nombre croissant de nouveaux produits (lecteurs de cassettes, minidisques, ordinateurs portables, téléphones Portable...). Sur ce marché, il y a toujours une concurrence entre

Différentes technologies, car les produits doivent être plus petits, moins chers, plus légers, avec un nombre croissant de fonctions. En plus des domaines Les communications, l'informatique, Internet et les réseaux sociaux sont devenus essentiels pour l'humain. Pour toutes ces raisons, les PAC notamment conviennent aux systèmes d'alimentation portables en

raison de sa présence Bon potentiel en termes de densité énergétique, de durabilité et de conception Simple et peu coûteux. Applications portables pour batteries

Fuel se concentre principalement sur le marché des batteries portables et des générateurs électriques conçus Pour une utilisation personnelle légère en extérieur (par exemple, applications commerciales légères) (Figure2.11) [18]

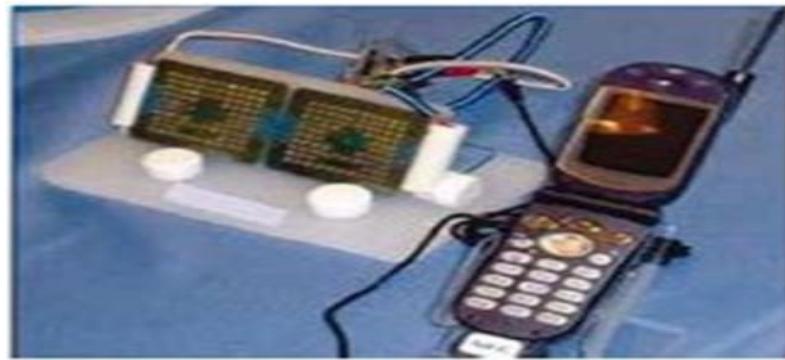


Figure 2.10 : Un système à PAC utilisé pour un téléphone portable

7.3. Applications stationnaires

Les applications stationnaires industrielles sont des applications où l'hydrogène est utilisé comme source d'énergie pour les installations industrielles, les réseaux électriques ou les stations de recharge de véhicules à hydrogène. Actuellement, 2 500 systèmes de PAC ont été installés dans le monde, dans des hôpitaux, des hôtels, des bureaux et des écoles. Les PAC sont également utilisées comme centrales électriques connectées au réseau électrique public pour fournir un soutien au réseau, ou comme centrales électriques autonomes dans les zones difficiles à connecter au réseau.

Les systèmes de PAC fonctionnent avec une efficacité de 40 %, sans bruit et sans pollution atmosphérique. Lorsque les PAC sont utilisées dans un système de cogénération où l'énergie thermique résultante est utilisée, l'efficacité peut être augmentée jusqu'à 85 %. [19]



Figure 2.11 : Pile à combustible au méthanol Ultra-cel

7.4. Innovations et applications futures

Les chercheurs expérimentent la photosynthèse artificielle ou couplent des cellules solaires simples et des photo-anodes. L'efficacité actuelle de la conversion de la lumière du soleil en hydrogène est de 5%, Ce couplage PAC/PV permet de convertir l'eau en oxygène et en hydrogène selon le principe de l'électrolyse. Par conséquent, l'appareil peut alimenter l'appareil indépendamment. Une application spécifique de cette approche est la plateforme Myrte en Corse. La plateforme est constituée de panneaux solaires (3700 mètres carrés) associés au système de production et de stockage d'hydrogène. [20]

Le marché mondial potentiel des PAC pour les voitures particulières et les camionnettes devrait représenter 750 milliards d'euros d'ici à 2040, sous réserve que soient levés un certain nombre de freins tels que le manque de densité des infrastructures, mais surtout le coût de fabrication des piles hydrogène. Nombreux sont donc les acteurs de la chaîne industrielle qui multiplient les recherches pour développer la PAC de demain, susceptible d'engendrer un développement massif des voitures particulières à hydrogène.

Intelligent Energy, principal fabricant de pile à hydrogène du Royaume-Uni, semble avoir franchi un pas de géant avec son système IE-Drive. [21]



Figure 2.12 : L'avenir PAC

8. Les Avantages et inconvénients PAC

8.1. Les Avantages

- Un procédé assez économique, qui lui permet de garantir une bonne rentabilité, malgré le coût élevé.
- Ils ne rejettent aucune émission locale (sauf celle de l'eau), ce qui constitue une préoccupation majeure pour la qualité de l'air, notamment dans les centres urbains.

- Fonctionnement sûr et silencieux.
- Différence de températures de fonctionnement.
- Une énergie propre avec une grande fiabilité.

8.2. Inconvénients

- Le principal inconvénient de la PAC est son prix, c'est sûr, notamment pour le platine utilisé comme catalyseur dans les électrodes.
- Son coût est très élevé en raison du prix élevé du platine utilisé.
- Gestion des unités thermiques.

Conclusion

L'analyse de pointe montre que les capteurs solaires hybrides PV/T et à PAC ont un grand potentiel pour améliorer l'exploitation de l'énergie solaire et réaliser des systèmes énergétiques plus durables, Où les dispositifs PV/T et les PAC sont des options et encouragent la production d'énergie renouvelable. En combinant les avantages des deux technologies, nous obtenons un système multi-bénéfices qui contribue à une production électrique efficace et durable. De plus, cette technologie s'adapte facilement aux consommateurs, qu'ils soient résidentiels, commerciaux ou industriels.

Les dispositifs à PAC thermique sont impliqués et participent à la transition vers des sources d'énergie plus durables en raison de leur grande taille, de leur flexibilité, de leur efficacité énergétique et de leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Même s'il existe encore des défis technologiques, ce système est considéré comme une solution prometteuse pour l'avenir de la production d'énergie propre et renouvelable.

Référence

- [1] BECHKI Sara, (2019), Etude Numérique d'un capteur solaire hybride PVT (Master) Univ-Kasdi Merbah, Ouargla
- [2] Oumelkhir DIB & Djihad ARROUSI, (2023), Conception et étude d'un système hybride : Piles à combustibles et capteurs photovoltaïques Thermiques, (Master), Univ-Ghardaia
- [3] Reteri, A & Fentrouci, A, (2013), Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP (Master GM), Univ-Tlemcen
- [4] Hamza Baraket, (2010). Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications,(Artc de livre),Centre for energetics study(IIT) ,India
- [5] Ghoniem Ahmed & christof schulz, (2022),Progress in energy and combustion science,(Artc de livre),USA
- [6] Ahmed R & Ahmed F, (2013), Refroidissement des capteurs hybrides (PV/T) (Master), Univ-Tlemcen
- [6] Bachkir S, (2020), Performances d'un capteur hybride PV/T, (Master), univ-Ouargla
- [7] Benattalah B & Cherati B, (2016), Etude D'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque/thermique, (Master), Univ-Médéa
- [8] Nadjat Kouki & Saadi Z, (2022), Etude et Réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique destinée à usage domestique, (Master), Univ- Adrar.
- [9] Touafek K & Khelifa A, (2014), Capteur solaire hybride thermique PV/T, (Artc), UARER, Ghardaia
- [10] Sebnem Pehlivan-Davis, (2015), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Seals Durability, (Doctoral Thesis), Loughborough University.
- [11] Th. Alleau, F. Barbier, (2001), Etude et simulation des performances des piles à combustible à hydrogène dans des applications statiques et dynamiques, (Artc), société chimique de France
- [12] Bouchaala S & Baggari H, (2022), Etude d'un système de pile à combustible de type PEMFC, (Master), Univ- Ouargla
- [13] Kabdi Z & Mansouri, A & Mansouri, K, (2022), Etude et simulation des performances des piles à combustible à hydrogène dans des applications statiques et dynamiques, (Master), Univ-Ouargla.
- [14] KOUACHE A & Rahoma K, (2020), Contribution à la modélisation optimale des piles à combustible de type PEM par utilisation des méthodes méta-heuristiques, (Master), Univ-Ouargla.

- [15] Sorina-Nicoleta Udroiu, (2009), Développement de piles à combustible en technologie planaire couches épaisses. Application à l'étude de dispositifs en configuration mono chambre, (Artc), Ecole Nationale Supérieure MSE, Français.
- [16] Mansouri Ali, (2022), Etude et simulation des performances des PAC à hydrogène dans des applications statiques et dynamiques, (Master), Univ-Ouargla.
- [17] lami F& Med N zoukar & oussama fadel, (2000), les applications de PAC, (Artc), Syrie
- [18] Joël Pauchet, Arnaud Morin, (2010), La pile à combustible PEMFC, (Artc), CEA Centre de Grenoble, France.

Chapitre III

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

1. Introduction

Les systèmes hybrides sont considérés comme des systèmes complexes car ils impliquent l'intégration de nombreuses technologies et leur intégration à travers capteurs PV et à PAC, y compris PV solaires, échangeurs de chaleur, PAC et convertisseurs de puissance.

La modélisation de ces systèmes permet de simuler leur fonctionnement, de comprendre leurs performances et de prédire leurs conditions de fonctionnement. Les convertisseurs élévateurs, utilisés pour augmenter la tension de sortie des PV ou des PAC, 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. [1]

2. Etude du système énergétique à base des capteurs PVT et PAC

Les capteurs PVT hybrides et les PAC s'appuient sur la température de fonctionnement, et l'intégration d'échangeurs de chaleur permet de refroidir les cellules PV et les PAC d'une part, et d'utiliser cette énergie thermique pour répondre aux charges thermiques d'autre part.

Ainsi, les capteurs PVT et PAC du système électrique permettront de répondre pleinement à la demande en énergie électrique et thermique de la charge indépendante située dans un site isolé du réseau ou pouvant être connectée au réseau électrique. C'est le cas des véhicules hybrides qui associent deux ou plusieurs sources d'énergie de nature différentes caractéristiques pour la propulsion du véhicule.

2.1. Système hybride autonome (PV/T+PAC)

Notre système hybride est utilisé dans un endroit isolé pour alimenter une charge indépendante du réseau électrique. La configuration de ce système est illustrée dans la figure (3.1). Le système de pile solaire, thermique et à hydrogène (ou combustible) représente une solution énergétique intégrée qui intègre diverses technologies pour une production, une conservation et une exploitation efficaces de l'énergie. [1]

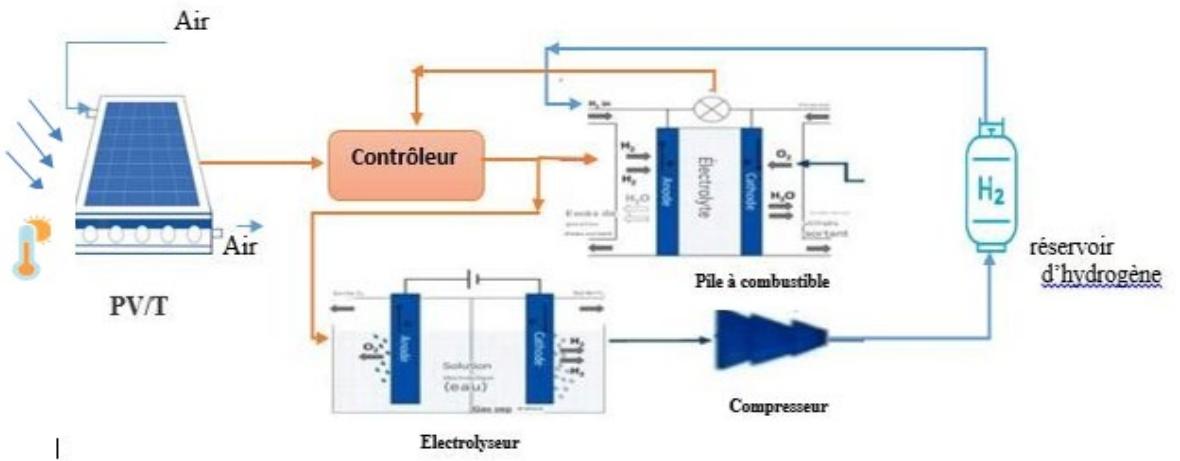


Figure 3.1 : Schéma électrique du système hybride (PV/T+PAC) [1]

Les capteurs hybrides PVT convertissent la lumière du soleil en énergie électrique. Capable de fournir de l'électricité aux appareils électriques ou de recharger les batteries pour l'utilisation de future.

Un système autonome de capteurs PV/T et PAC à hydrogène représente une solution hybride prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques tout en minimisant l'impact environnemental. [1] .La figure (3.2) montre structure du notre système composé d'alimentations, de convertisseur, d'un bus et la charge

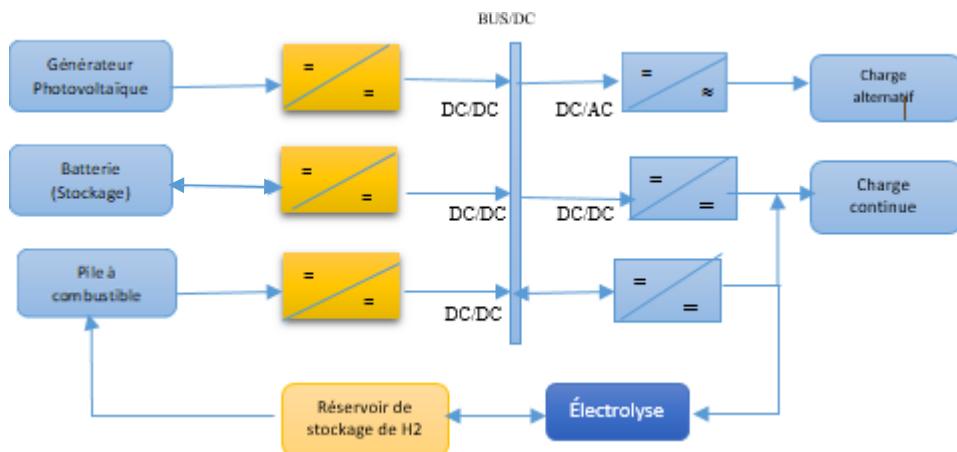


Figure 3.2 : Système hybride autonome.

2.2. Système connecté au réseau

L'installation connectée au réseau de PV et de batteries à hydrogène présente une configuration hybride qui utilise ensemble l'énergie solaire et les technologies de stockage

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

d'énergie. Cela offre divers avantages en termes d'efficacité énergétique, de flexibilité

Et de durabilité. Ce système a une grande capacité (MW) à exploiter toute l'énergie produite et à utiliser la chaleur produite pour les salles de contrôle de la centrale. [1] Voici un aperçu de ce type de système [2] :

3. Éléments du Système

A- Panneaux solaires (PVT) : Les PV transforment la lumière solaire en énergie électrique et thermique. Cette électricité peut être directement utilisée pour fournir de l'énergie à des équipements électriques ou être acheminée vers le réseau électrique.

B- Piles à hydrogène (PAC) : Les PAC à hydrogène transforment l'hydrogène et l'air en électricité, produisant uniquement de l'eau comme sous-produit. Elles peuvent opérer en continu tant que l'approvisionnement en hydrogène est suffisant. Dans ce dispositif, l'hydrogène peut être fabriqué par électrolyse de l'eau en utilisant l'électricité produite par les PV.

C- Électrolyseur : Quand la production d'électricité via les PV excède la consommation, l'énergie excédentaire peut servir à générer de l'hydrogène par le biais d'une procédure d'électrolyse. Ce stockage de l'hydrogène peut par la suite être utilisé dans la pile à hydrogène pour des applications futures.

D- Système de contrôle de l'énergie (ou Energy Management System, EMS) : Un programme intelligent qui gère la production, l'entreposage et l'utilisation de l'énergie. Il contrôle les exigences énergétiques en direct et ajuste l'exploitation des ressources en fonction des circonstances (telles que la météo ou la demande d'électricité).

E- Batteries (facultatives) : Outre les piles à hydrogène, il est possible d'intégrer des accumulateurs pour un complément de stockage d'énergie, ce qui facilite des cycles de recharge et de décharge plus rapides afin de répondre aux pics de demande à court terme. [2]

4. Modélisation du moteur électrique

La modélisation d'un moteur électrique consiste à créer un modèle mathématique qui décrit son comportement dynamique et électrique conformément aux détails et à la précision requis et nécessaires pour comprendre son comportement, optimiser son fonctionnement et concevoir des systèmes de contrôle appropriés. Les éléments suivants doivent être pris en compte lors de la modélisation d'un moteur électrique, nous utilisons deux types : Moteurs à DC et Moteurs à CA [3]

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

4.1. Moteur électrique

Un moteur électrique se compose de deux parties principales, le stator et le rotor. Le stator est la partie stationnaire du moteur et contient les bobines conductrices. Dans le même temps, le rotor est monté sur un axe qui lui permet de tourner à l'intérieur du stator. Les pôles du rotor tourner, alors librement et en continu : les pôles positifs attirent les pôles négatifs, et vice versa.

Lorsqu'un courant électrique traverse une bobine, le mouvement des électrons génère un champ magnétique, et la bobine devient un aimant avec un pôle nord et un pôle sud, et la bobine commence à tourner.

Lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur placé dans un champ magnétique, il crée une force qui pousse le conducteur dans une certaine direction. Le moteur électrique fait tourner les roues de la voiture et les propulse grâce à l'électricité. En alternative aux moteurs thermiques utilisant des combustibles fossiles (essence, diesel, etc.).

Les moteurs électriques présentent de nombreux avantages :

Haute efficacité énergétique ; souvent une puissance supérieure ; coût moindre, émissions polluantes limitées ; fonctionnement silencieux ; et une maintenance simplifiée. [5]

4.2. Moteurs à courant continu (DC)

Ces moteurs utilisent le même principe d'action, comme l'attraction entre les pôles d'un aimant ou d'un électro-aimant plus puissant et la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, pour maintenir cette rotation constante, le sens du courant électrique doit être périodiquement inversé.

Ce type de moteur électrique peut être fabriqué et vendu à des prix abordables au citoyen moyen, et est généralement de faible puissance pour une utilisation dans les automobiles, les appareils audiovisuels, la robotique, les jouets, etc. Le modèle de moteur à cc est décrit par les équations suivantes [5] : Un champ magnétique \mathbf{B} est généré par le courant circulant dans le fil enroulé (N spires)

$$\mathbf{B} = \mu \cdot N \cdot I \quad (\text{T, tesla}) \quad (3.1)$$

$$\vec{E} = \vec{V} \cdot \vec{B} : \text{La force électromotrice dans le fil ou le champ électrique(V)} \quad (3.2)$$

V : la vitesse relative du fil par rapport au champ ; (la perméabilité magnétique au vide) = $4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

N : nombre de tours de fil par unité de longueur= nombre de tours / la longueur de la bobine.

Lorsqu'une force de Laplace est appliquée à un fil conducteur de courant placé dans un champ magnétique : $\vec{d}\vec{F} = I \cdot \vec{dl} \cdot \vec{B}$ $\vec{F} = \int I \cdot \vec{dl} \cdot \vec{B}$ (3.3)

Le couple est proportionnel au courant (le champ magnétique = cts) : $C = K \cdot \Phi \cdot I$ (3.4)

a- Equation Mécanique de moteur à CC

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \quad (3.5)$$

Avec C_r : Couple résistant ; C_m : couple moteur :

$$C_m = K \cdot \Phi \cdot I \quad (3.6)$$

b- L'équation Electrique est donc :

Loi de Kirchhoff : $V = Ri + L \frac{di}{dt} + E$ avec $E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$ (3.7) ; (3.8)

V : Tension d'alimentation ; R : Résistance de l'enroulement ; L : Inductance de l'enroulement

i : courant ; k : constante de force électromotrice (f.e.m.) ; $\Omega := 2\pi N/60$; N : vitesse de rotation

b- Puissance mécanique donne $P = C \cdot \Omega$ (3.9)

c- Le couple d'un moteur électrique est $T = \frac{2\pi N}{60}$ (N.m) (3.10)

4.3.Moteurs à courant alternatif (AC)

Ce sont des moteurs synchrones et asynchrones (induction). Chaque type a des variables électriques : tension, courant et résistance.

Les moteurs électriques à AC utilisent un courant qui change constamment de direction pour générer un champ magnétique rotatif dans le stator. Contrairement aux moteurs à CC, pour créer un champ magnétique rotatif, les moteurs à AC utilisent une "excitation triphasée", c'est-à-dire trois bobines conductrices décalées les unes par rapport aux autres. En appliquant un courant alternatif dans ces bobines, le champ magnétique résultant se déplace autour du stator et le rotor tourne. Voici quelques-unes des équations clés :

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\theta) ; \text{ puissance active (W)} \quad (3.11)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\theta) ; \text{ puissance réactive (VAR)} \quad (3.12)$$

$$S = U \cdot I ; \text{ puissance apparente (VA)} \quad (3.13)$$

$$\cos(\theta) = \frac{P}{S} ; \text{ facteur de puissance active} \quad (3.14)$$

$$\sin(\theta) = \frac{Q}{S} ; \text{ facteur de puissance réactive} \quad (3.15)$$

$$N_s = \frac{f \cdot 60}{p} ; \text{ vitesse de synchronisme (t /mn)} \quad (3.16)$$

$$N = N_s \cdot (1 - g) ; \text{ vitesse réelle} \quad (3.17)$$

$$g = \frac{Ns - N}{Ns} ; \text{ coefficient de glissement} \quad (3.18)$$

$$I = I_0 \sin(2\pi f t) ; \text{ courant alternative (A)} \quad (3.19)$$

$$T = P60 / 2\pi N : \text{ couple (Nm), } f : \text{ fréquence (Hz), } I_0 : \text{ amplitude de courant (A)} \quad (3.20)$$

4.4. Moteurs asynchrones

Le modèle de moteur asynchrone est développé dans le repère de référence fixe en utilisant les hypothèses suivantes :

- Les saturations sont négligées.
- Les enroulements statoriques répartis.
- Les pertes courantes de Foucault.
- Les inductances mutuelles sont identiques.
- Les harmoniques des courants et des tensions sont ignorés. [6]

La modélisation par transformée de Park consiste à convertir un système triphasé en un système orthogonal à deux axes pour étudier le contrôle du flux, le couple, la tension et la régulation de la vitesse.

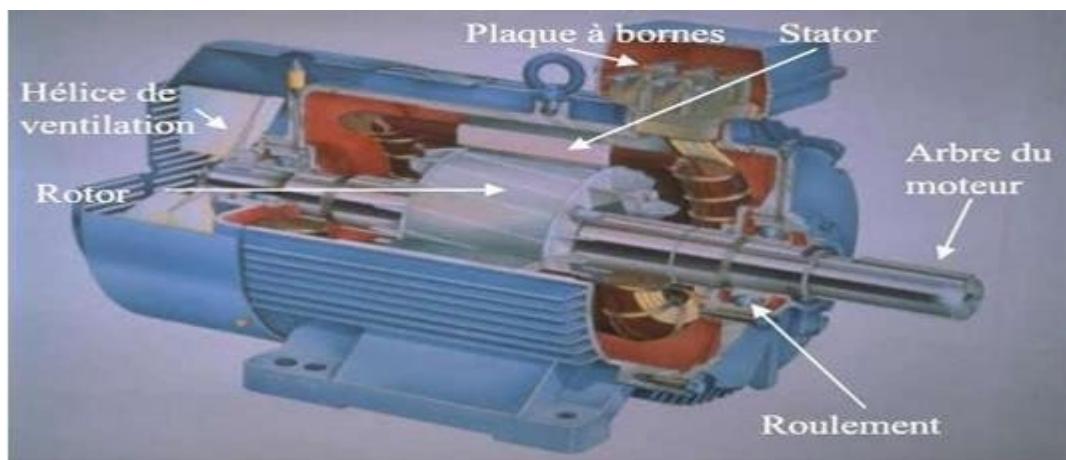


Figure 3.3 : Schéma d'une machine asynchrone

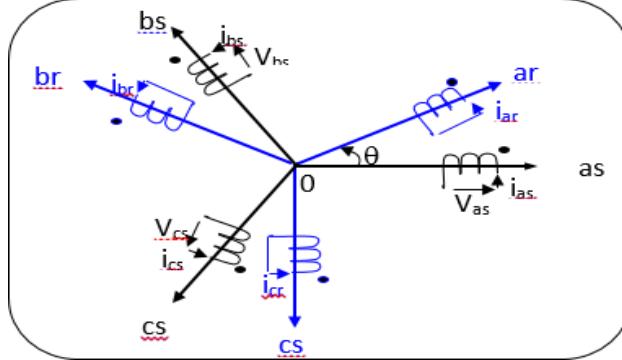
4.4.1. Les hypothèses simplificatrices

- L'entrefer est supposé constant et la machine est symétrique.
- La densité du courant est uniforme dans les sections des conducteurs

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

- Le circuit magnétique est non saturé et parfaitement feuilleté au stator et au rotor.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau et d'encoche est négligeable.
- La répartition dans l'entrefer de la force magnéto-motrice et celle du flux sont sinusoïdales.
- Le rotor à cage est décrit par un enroulement triphasé équilibré.

4.4.2. Représentation du moteur dans l'espace électrique



1. Figure 3.4 : Représentation spatiale des enroulements de la machine asynchrone [6]

Notons que caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire (en bipolaire) :

$$\omega = \Omega P = \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.21)$$

4.4.3. Équation électrique

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine représentée par la figure [6], on peut écrire :

$$\left[\begin{array}{l} Vs = Rs \cdot Is + d/dt. (\Phi_s) \\ Vr = \theta = Rr \cdot Ir + \frac{d}{dt} (\Phi_r) \end{array} \right] \quad (3.22)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Avec } Vs = (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) T ; Is = (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}) T ; \Phi_s = T(\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}) \\ Vr = (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}) T ; Ir = (I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}) T ; \Phi_r = (\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}) T \end{array} \right] \quad (3.23)$$

Les résistances statoriques et rotoriques de la MAS sont données par les matrices

$$Rs = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \quad ; \quad Rr = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

4.4.4. Équations magnétiques

Relations linéaires entre flux et courants. Comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_s = Ls \cdot Is + Lm \cdot Ir \\ \Phi_r = Lr \cdot Ir + Lm \cdot Is \end{array} \right. \quad \text{avec}$$

$$\begin{aligned}
 L_r &= \begin{cases} lr & mr & mr \\ mr & lr & mr \\ mr & mr & lr \end{cases} \\
 L_s &= \begin{cases} ls & ms & ms \\ ms & ls & ms \\ ms & ms & ls \end{cases} \\
 L_m &= [lm]T = lm \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

-ls, lr : inductance propres entre phase stator et rotor

-ms, mr : inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques

-lm : valeur maximale du mutuel stator et rotor.

Les équations matricielles des tensions de phases [6]

$$\begin{cases} V_s = R_s.I_s + \frac{d}{dt} L_s.I_s + L_m.I_r \\ V_r = 0 = R_r.I_r + \frac{d}{dt} L_r.I_r + L_m.I_s \end{cases} \quad (3.26)$$

4.4.5. Equation mécanique

Le couple électromagnétique $C_{em} = J.\underline{d\Omega} + \mathbf{f}_v \cdot \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{C}_r$ (3.27)

J : le moment d'inertie. \mathbf{f}_v : Le coefficient de frottement visqueux et \mathbf{C}_r : le couple résistant applique sur l'arbre de machine [6]

Le Transfer de Park permet dépasser du repère **abc (mobile)** vers **dq** (ou vers le repère **ab** vers le repère **dq** (fixe)

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en un modèle unique. La transformée de Park est définie par la matrice normale [P] comme suit : [7] [8]

$$P = \sqrt{(2/3)} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Park inverse

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

4.5.Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui convertit d'une source de tension (ou courant) directe continue, vers une source de tension ou courant de sortie alternative, et la fréquence de la tension ou courant de sortie peuvent être fixe ou variable selon l'application.

Les onduleurs ayant une fréquence de sortie fixe sont principalement utilisés pour générer de l'électricité à partir des batteries dans des applications industrielles en cas de pertes du secteur (ex : la voiture électrique ou sonalgaz...etc.). On les utilise dans des applications où la vitesse d'un moteur doit varier afin de soulever des charges ou de les faire pousser, on classe en fonction du nombre de phase (monophasé et triphasé) et de la grandeur (tension ou courant) à transférer et en fonction du mode commutation des semi-conducteurs utilisé (thyristors-diodes-transistors). Dans cette étude on utilise l'onduleur triphasé pour la voiture électrique.

4.5.1. Onduleur de tension triphasé

L'onduleur triphasé a deux niveaux utilisés pour les applications de moyenne tension (15kv à 35kv) à une structure des interrupteurs complémentaires en commande pour que la tension d'entre ne soit jamais en court-circuit.

a- Onduleur de tension :

- Il fonctionne grâce à une source de courant continu (comme, par exemple, une batterie).
- Il produit une tension alternative dont la fréquence et l'amplitude peuvent varier selon l'application.
- La tension de sortie est généralement constante, alors que le courant peut varier selon la charge.

b- Onduleur de courant :

- Il produit un courant alternatif dont la fréquence et l'amplitude peuvent varier en fonction de l'application.
- Le courant de sortie est constant, alors que la tension variée selon la charge.
- Des applications comme celles des systèmes d'éclairage ou les alimentations de secours, où il est nécessaire de réguler le courant.

5. Modélisation du capteur PVT

a) photovoltaïque idéal

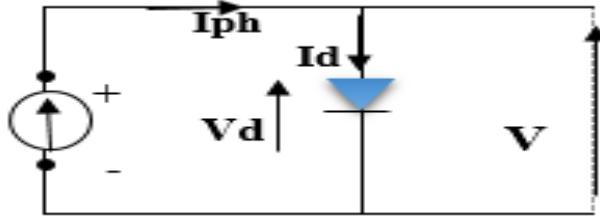


Figure 3.5 : Schéma de Circuit d'une cellule PV idéal

La cellule PV émet un courant idéal I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec la diode DC qui correspond à la région de transition p-n de la cellule PV.

$$\text{Suivant la loi du nœud : } I = I_{ph} - I_d \quad (3.30)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à la tension aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (3.31)$$

La diode étant un composant non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.32)$$

Avec : I_o : Courant inverse de la diode. V_d : Tension aux bornes de la diode.

$$V_t : \text{tension thermique } Kt/q ; \text{ La relation sera donc : } I = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.33)$$

b) Model d'une diode

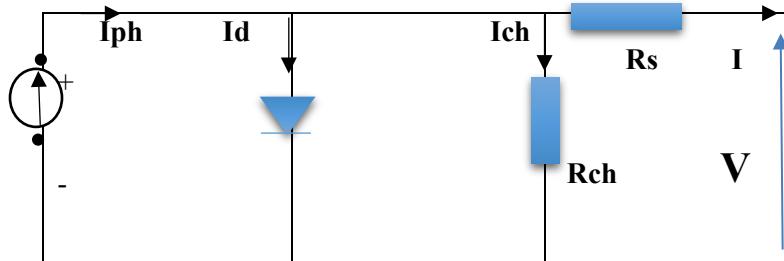


Figure 3.6 : Schéma de Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Nous avons :

$$\left. \begin{aligned} I &= I = I_{ph} - I_d \\ I_d &= I_{ch} \cdot I_d - I_{ch} \\ I_{ch} &= \frac{(V + R_s I)}{R_{ch}} \\ I_d &= I_{od} \left[e^{\frac{V + R_s I}{V_t}} - 1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

Avec : $V=Vd$: tension thermique=tension de diode, I = le courant de cellule,

I_{ph} =Isc. (G/1000) : le photo-courant dépendant de l'éclairement (G), I_0 = la courant saturation de diode. K =constante de BOLTZMAN (1.381×10^{-23} joule /kelvin), q =charge d'électron= 1.602×10^{-19} C, T = la température de cellule en kelvin. R_s : Résistance série [Ω] et R_{ch} : Résistance shunt [Ω] donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V+R_s I}{Vt}} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{ch}} \quad (3.35)$$

c) Model de deux diodes

Dans le modèle à deux diodes, la diode 2 est disposée en parallèle avec le schéma du modèle de diode (3.10). Pour d'assurer une courbe I-V plus précise, tenant compte de la variation du flux de courant à faibles niveaux de courant due à la recombinaison des charges dans la zone de charge spatiale des semi-conducteurs. Donc, la diode D1 reproduit la diffusion des porteurs à travers la base et l'émetteur. Plus le matériau n'a une bonne longueur de propagation, plus la diode D2 produit un modèle/recombinaison des porteurs dans la zone de charge spatiale. [9] [10] [11].

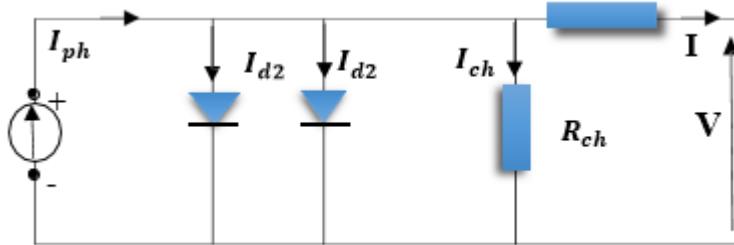


Figure 3.7 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le modèle à double diode est plus précis car il est plus difficile de résoudre l'équation du courant, c'est pourquoi le modèle à diode unique est préféré. On constate que pour le modèle à deux diodes, la puissance générée par la cellule est légèrement inférieure que celle du modèle à une seule diode, et cela peut être dû aux pertes supplémentaires causées par les diodes, donné par la relation selon la loi de Kirchhoff : [9] [10] [11]

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{ch} \\ I_{d1} &= I_0 [e^{q \frac{V+R_s I}{F1.K.T} - 1}] \\ I_{d2} &= I_0 [e^{q \frac{V+R_s I}{F2.K.T} - 1}] \end{aligned} \quad \boxed{\quad }$$

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

$$\text{Alors: } I = I_{ph} \left(I_{01} \left[e^{\frac{V+Rs.I}{n_1.Vt}} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\frac{V+Rs.I}{n_2.Vt}} - 1 \right] - \frac{V+Rs.I}{Rch} \right) \quad (3.38)$$

Avec : n : Facteur d'idéalité de la jonction ($1 \leq n \leq 1.5$) ; V_t est la tension thermique du module pour un nombre N_s de cellules en série et définie par : $V_t = \frac{N_s \cdot K \cdot T}{q}$; $R_{ch} = R_p$ [9]

Un module photovoltaïque est un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité à travers un réseau de cellules solaires assemblées pour générer de l'énergie électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière liée en parallèle et contenant respectivement généralement 36 à 72 cellules photovoltaïques. [11]

L'expression du courant passé par le module et sa tension aux bornes est donnée par les équations suivantes : [10]

$$I_{cc.mod} = N_{p.cel} * I_{cc.cel} \quad (3.39)$$

$$I_{MPP.mod} = N_{p.cel} * I_{MPP.cel} \quad (3.40)$$

$$V_{co.mod} = N_{s.cel} * V_{co.cel} \quad (3.41)$$

$$I_{cc.mod} = N_{s.cel} * I_{MPP.cel} \quad (3.42)$$

$$V_{MPP.mod} = N_{s.cel} * V_{MPP.cel} \quad (3.43)$$

Avec $I_{cc.mod}$: Courant de court-circuit du module [A] ; $I_{MPP.mod}$: Courant au point de puissance maximale du module [A] ; $V_{co.mod}$: Tension en circuit ouvert du module [V] ; $V_{MPP.mod}$: Tension au point de puissance maximale du module [V] ; $N_{s.cel}$: Nombre de cellules connectées en série ; $N_{p.cel}$: Nombre de cellules connectées en parallèle [9]

On observation est que le courant fourni par le module photovoltaïque est directement lié à l'éclairement ambiant, ce qui signifie que plus l'éclairement est élevé, plus le courant est important. Le contraire de la tension, qui diminue avec l'augmentation du courant. [10]

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_{co} .
- ✓ Point (3) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [11]

5.1. Exemple de caractéristiques électriques

Array type : Canadian Solar CS5P-220M ; 6 séries modules ; 1 parallèle strings

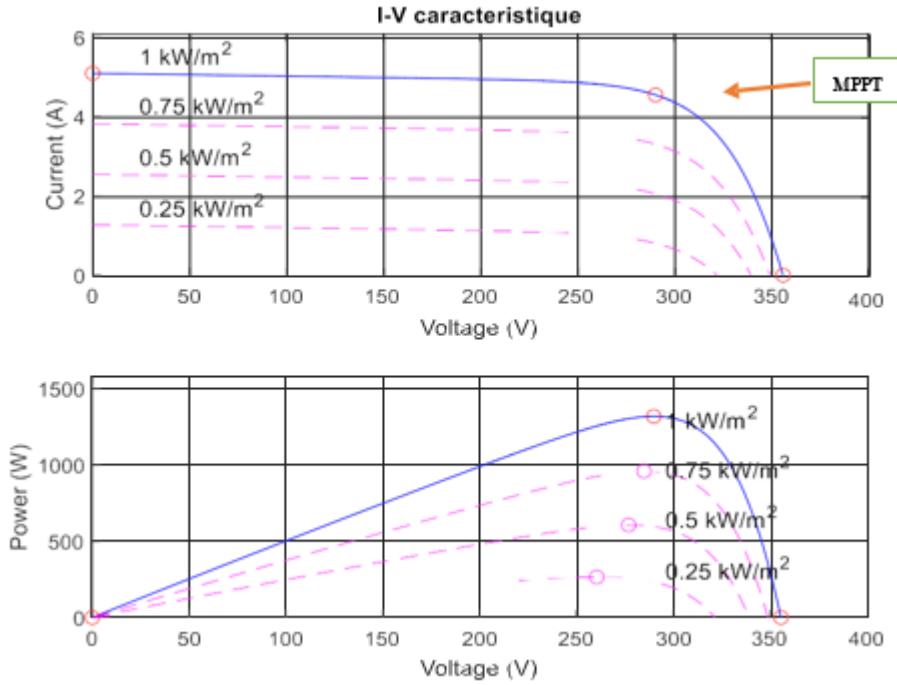


Figure 3.8 : les caractéristique un panneau

La irradiation utilise donne de figue (3.12) varie : on vue que $i=f(v)$ le courant est constant et la tension stable avant le MPPT, et pour la puissance $p=f(v)$ la puissance a valeur 260v et plus stable a point la valeur max.

5.2.Les caractéristiques d'un module PVT

a) La tension en circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension aux bornes de cellule lorsqu' elle n'est pas connectée à une charge ou la charge de résistance infinie (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [12] [13]

$$V_{co} = \frac{K \cdot T_c}{q} \lim_{I \rightarrow 0} \frac{I_{cc}}{I_{cc} + I_s} \quad (3.44)$$

Avec ; $\frac{K \cdot T_c}{q}$ la potentielle thermodynamique ; T_c : température absolue ;

q : la constante de charge d'électron = $1.602 \times 10^{-19} C$

K : la constante de BOLTZMANN , $1.380 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$

I_{ph} : Le courant photonique I_s : le courant de saturation

b) courant de court-circuit I_{cc} :

C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V_{pv}=0$)

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc} , le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre par conséquent, plus ces deux paramètres seront élevés, plus grande sera l'intensité produite. [12][13]

Cette courant caractérise le nombre de paires électron-trou générées G et qui traversent la jonction sans recombinaison, en tenant compte des longueurs de diffusion des électrons et des trous.

$$I_{cc} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (3.45)$$

c) Le facteur de forme FF

Le "facteur de forme" (fil factor) est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir un module photovoltaïque et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). Il caractérise l'efficacité de la cellule solaire, et est obtenu de la manière suivante :

$$FF = \frac{V_{max} * I_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (3.46)$$

Avec P_{max} : la puissance maximale sous conditions météorologiques standards (1000W/m, T=25°C)

5.3.Modèle thermique du capteur PVT

Un système combiné qui combine l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire thermique est appelé système hybride PV/T. Il permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur, améliorant ainsi l'efficacité globale du système. Ce système chauffe un fluide, généralement de l'eau, un fluide caloporteur ou l'air à l'intérieur de la voiture à des températures basses ou moyennes. [14]

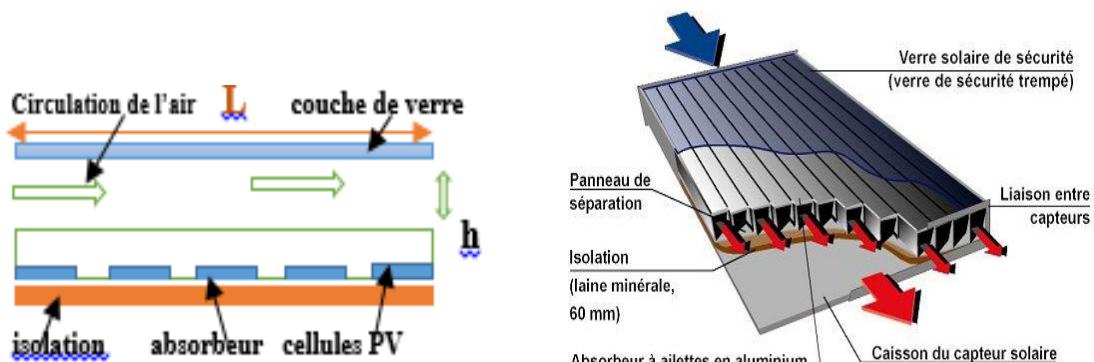


Figure 3.9 : le capteur-solaire-PV / T à air

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

Le capteur choisi pour notre analyse est montré en figure (3.14) Le capteur capte la lumière globale (directe et diffuse), mais une partie de celle-ci est perdue en raison des pertes thermiques. En raison de la différence de température entre l'absorbeur et l'environnement environnant, des pertes de chaleur se produisent. Elles sont divisées en trois catégories : les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales. [16]

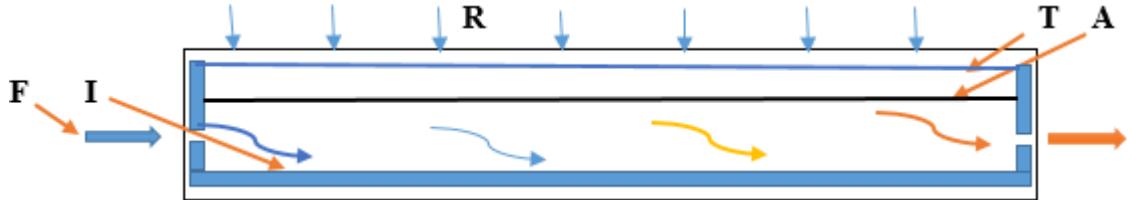


Figure 3.10 : Schématisation du collecteur plan à air

R : Rayonnement incident ; T : Plaque transparente ; A : Plaque absorbante ; I : Isolant thermique ; F : Ecoulement d'air [15]

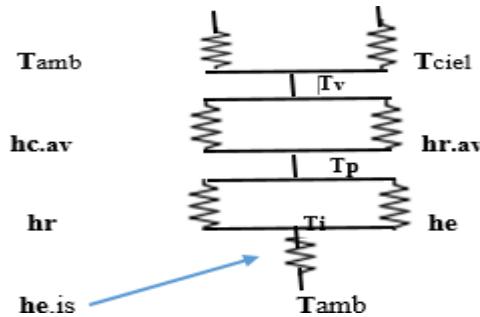


Figure 3.11 : Schéma électrique équivalente au capteur à l'air [15]

5.4. Equations de transfert de chaleur dans le capteur

Pour les équations de transfert d'énergie dans le capteur, s'écrit procédé par élément :

[14]

❖ **Plaque absorbante** : c'est la relation entre la puissance reçue par l'absorbeur et celle dégagée par la convection entre l'air et l'absorbeur ou par rayonnement entre l'absorbeur et la couche isolante [15]

$$GI_{(\tau \alpha) eff} = U_{av} (T_p - T_{amb}) + h_1 (T_p - T_{mf}) + hr (T_p - T_i) \quad (3.47)$$

❖ **Fluide caloporeur** : Le fluide thermique, qui est l'air consomme une quelque énergie, lors de son passage dans la paroi, par convection, d'une part de la plaque absorbante et d'autre part de l'isolant, ce qui lui permet d'emmager une chaleur dite 'utile' Q_u

$$h_1(T_p - T_{mf}) + h_2(T_i - T_{mf}) = Q_u = \frac{mC_p dt}{Dx} \quad (3.50)$$

❖ **Le panneau arrière** : Il est recouvert d'une couche d'isolant thermique, de sorte qu'il reçoit l'énergie par rayonnement provenant du panneau absorbant, et une partie de cette énergie est

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

transférée au fluide caloporteur, et une partie vers l'extérieur sous forme de pertes :

$$h_r(T_p - T_i) = U_{arr}(T_i - T_{amb}) + h_2(T_i - T_{mf}) \quad (3.51)$$

Ces solutions donnent l'équation différentielle suivante :

$$m \cdot C_p \frac{dt}{dx} = \left(\frac{1}{\frac{1+U_1}{h}} \right) [GIT - U_1 (T_{mf} - T_{amb})] \quad (3.52)$$

Avec : $h = h_1 + \left(\frac{1}{\frac{1+U_1}{h_2} + h_r} \right)$

(**h**) étant le coefficient de transfert de chaleur global dans le capteur.

GIT représente le produit **GI** par ($\tau \alpha$) eff.

Cette l'équation permet de déterminer la température du fluide en tout point de passage, avec les conditions aux limites : $x=0 \quad T_1 = TFE$; $x=L \quad T=T_2 = TFS$

$$T = T_1 + \left(\frac{GIT}{U_1} \right) - (T_1 - T_{amb}) + \left(\frac{GIT}{U_1} \right) \exp(-F_p \cdot U_1 \cdot b \frac{x}{mC_p}) \quad (3.53)$$

L'analyse faite dans ce domaine par H, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant par le rapport suivant : [16]

η = puissance thermique utile par m²de capteur /le flux solaire incident sur le plan de capteur Se traduit par l'expression : $\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot G}$ (3.54)

Rendement journalier

$\bar{\eta}$ = le rapport de la somme des énergies utiles prises au cours de la journée / la somme des ensoleilements correspondants, Se traduit par l'expression :

$$\bar{\eta} = \sum \frac{Q_u}{A_c \sum G_I} \quad (3.55)$$

La puissance utile récupérée par le fluide est déterminée par l'équation suivante :

$$Qu = A_c / (\tau \alpha) eff \cdot G I - U_t (T_p - T_{amb}) \quad (3.56)$$

ECLAIREMENT GLOBAL : Température ambiante – Température du fluide à l'entrée .ET à la sortie du capteur - Température de l'absorbeur - Température du vitrage. [17]

6. Technologie d'hydrogène

En 1997, le Japon a signé le Protocole de Kyoto avec plusieurs pays, qui vise à réduire et à stabiliser les émissions de dioxyde de carbone au cours de la période 2008-2012, selon les valeurs correspondantes de 1990, et à développer de nouvelles technologies respectueuses de l'environnement. L'énergie hydrogène apparaît comme l'une des solutions les plus améliorées qui offre des fonctionnalités supplémentaires intéressantes [17] :

- ✓ Efficacité énergétique : les molécules d'hydrogène fournissent 3 fois l'énergie de l'essence et 6

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

fois l'énergie du charbon.

- ✓ Énergie privée : produire de l'eau sans pollution.
- ✓ Source disponible : L'hydrogène est abondamment disponible et facilement accessible dans la nature.

Grâce à ses nombreux avantages, l'hydrogène est une source d'énergie respectueuse de l'environnement. La recherche de nouvelles technologies d'utilisation incite les entreprises à développer des systèmes de conversion ou de production d'énergie électrique. Les piles combustibles apparaissent comme l'une des meilleures solutions pour convertir l'hydrogène en électricité.

7. Modélisation de la pile à combustible

Une PAC est un générateur dans lequel l'électricité est produite en utilisant PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC) ou une PAC à hydrogène sur une électrode, l'oxygène de l'air comme combustible, sur l'autre électrode, et le déchet est de l'eau. La réaction d'oxydation de l'hydrogène est accélérée par un catalyseur, généralement du platine. La PAC la plus étudiée et la plus utilisée est la pile à hydrogène-oxygène ou hydrogène-air (Fig3.19). [18]

Le choix de la technologie des PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC) est implicite vu les performances intéressantes (faible poids, robuste, électrolyte solide, démarrage rapide, large gamme de puissance de 1 W à 10 MW, etc.)

Ci-dessus : la Honda FCX, voiture à hydrogène.

À droite : Au contact de l'électrolyte à l'électrode de diffusion de l'hydrogène (la borne négative), les atomes d'hydrogène se divisent en ions d'hydrogène et en électrons. Un courant électrique est produit par l'écoulement des électrons dans le circuit extérieur vers l'électrode de diffusion de l'oxygène (la borne positive). Les ions d'hydrogène se déplacent à travers l'électrolyte vers l'électrode d'oxygène. Ils se combineront alors avec l'oxygène présent dans l'air et les électrons du circuit extérieur, générant ainsi de l'eau. Le processus est continu. [19]

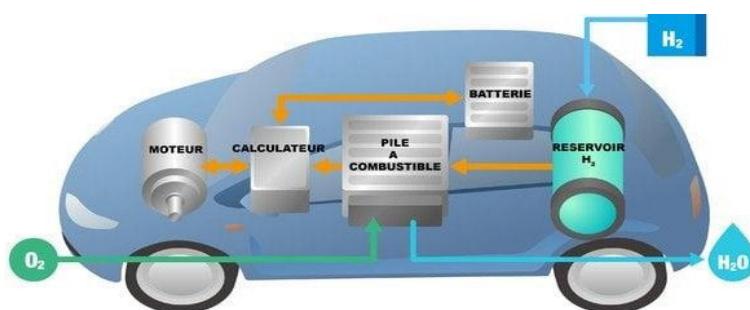
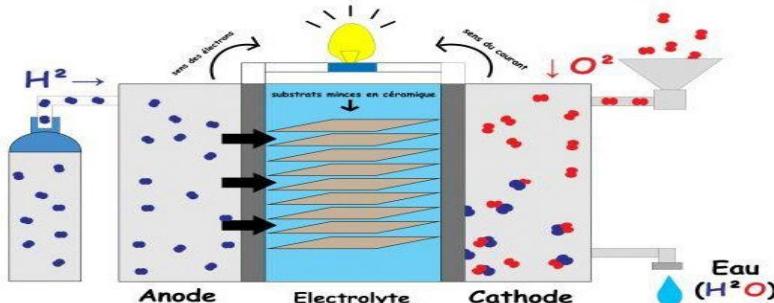
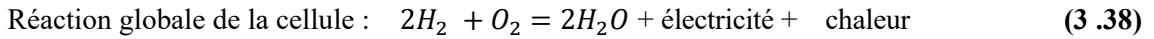
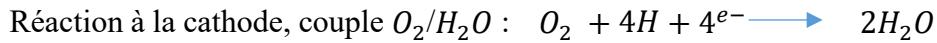
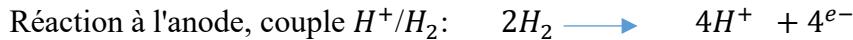


Figure 3.12 : voiture à hydrogène, la Honda FCX.

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

Les équations des réactions électrochimiques se produisant aux électrodes d'une cellule PEMFC comme suit :



© Umicore 2019

Figure 3.13 : schéma de fonctionnement de PAC

Cette équation finale représente le comportement électrochimique statique de la pile à combustible. Un circuit électrique équivaut peut-être utiliser pour la modélisation du comportement dynamique de la pile [21], il est représenté dans la figure (3.20)

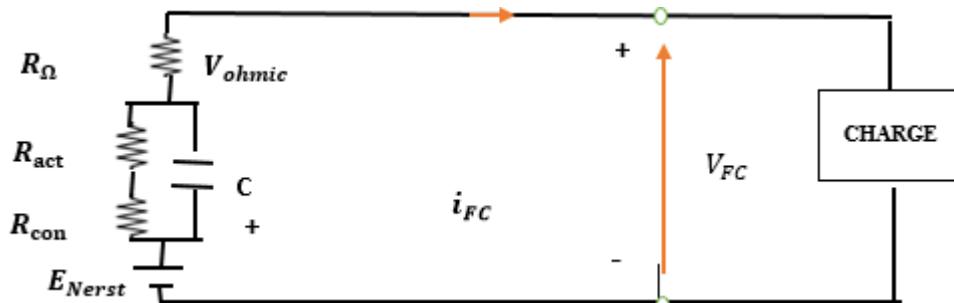


Figure 3.14 : Schéma électrique dynamique équivalent d'une pile

On obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC dans l'équation suivant :

$$\begin{aligned}
 V_{pac} &= 0.2817 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.308 \cdot 10^{-5} T \left[\ln \left(\frac{3}{4} P_{anode} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{2} P_{cath} \right) \right] \\
 &+ [2.86 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \ln(A) + 4.3 \cdot 10^{-5} \ln \left(\frac{\frac{3}{4} P_{anode}}{1.0910^6 \exp \left(\frac{77}{T} \right)} \right)] \cdot T + 7.6 \cdot 10^{-5} T \ln \left(\frac{\frac{1}{2} P_{cath}}{5.08 \cdot 10^6 \cdot e^{-\frac{498}{T}}} \right) \\
 &- 1.93 \cdot 10^{-4} T \ln(i_{pac}) - i_{pac} [181.6 \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{\left[1 + 0.03 \left(\frac{i_{pac}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{i_{pac}}{A} \right)^{1.25} \right]}{\left[\lambda_{SO_3}^{H_2O} - 0.0634 - 3 \left(\frac{i_{pac}}{A} \right) \right]} + R_c] + B \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (3.39)
 \end{aligned}$$

$$P_{anode} = \frac{4}{3} P_{H_2} ; P_{cathode} = 2P_{O_2} ; \text{conductivité thermique du verre} = 1.0 \text{W/m.}$$

B : constante empirique qui dépend du type de pile ; **J** : la densité de courant du

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

fonctionnement permanente (A/cm^2) J_{max} : la densité de courant maximale $\lambda \cdot \frac{H_2O}{SO_3}$: La teneur en eau dans la membrane

A : la surface active de la pile (cm^2) ; $T = 30^\circ C$,

R_c : La résistance équivalente de contact à la Conduction des électrons,

R_m : La résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons.

Le potentiel réel de la cellule décroît par rapport à la potentielle thermodynamique d'équilibre quand le courant débite, cette déviation à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations η (surtension) qui sont : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit [22] :

$$E_{pac} = E_{nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (3.40)$$

$$E_{pac} = E_{nernst} - \Sigma \text{ pertes}$$

La tension E_s de n piles unitaires reliées en série formant un assemblage :

$$E_s = n \cdot E_{pac} \quad (3.41)$$

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst : [22]

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85T^{-3} \cdot (T - 298.15) + 4.311 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot [\ln(P_{*H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{*O_2})] \quad (3.42)$$

8. Les équations de Sankey typique et équation thermique pour une PEMFC

Production de chaleur totale [23]: $Q_{chaleur\ totale} = \frac{iN_{cell}}{2F} \Delta H - P_{out}$ (3.43)

Chaleur évacuée par le système refroidissement (36%) : $Q_c = m_{refroi} \cdot C_{p\ refroi} (T - T_{refroi})$ (3.44)

Chaleur évacuée par le réactive supplémentaire (2%) : $Q_r = h_{conv,react} \cdot A (T - T_{react})$ (3.45)

Chaleur évacuée par convection naturelle (2%) : $Q_n = h_{conv,natur} \cdot A (T - T_{amb})$ (3.46)

Chaleur utilisée pour l'évaporation interne de l'eau (5%) : $Q_w = m_{eau\ generl} \cdot C_{Peau} (T_{sat} - T)$ (3.47)

Puissance sortie (50%) : $P_{out} = IVN_{cellul}$ (3.48)

Hydrogène non utilisé (5%) : $Q_{hyd} = (n_{tot} - \frac{iN_{cell}}{2F}) \Delta H$ (3.49)

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

9. Application à l'alimentation énergétique d'un véhicule électrique

Les piles à combustible sont largement utilisées dans les domaines des transports, tels que les voitures particulières, les véhicules légers, les véhicules lourds, etc., et varient en fonction des besoins énergétiques. Un système FCV (véhicule à PAC) complet se compose d'un réseau PAC, d'une batterie lithium-fer, d'une source d'hydrogène, d'un système de recirculation et d'un système d'alimentation en air, comme illustré dans la figure (3.18). Un compresseur aspire l'air ambiant dans le canal cathodique, agissant comme réactif et liquide de refroidissement. Des capteurs de paramètres sont installés pour surveiller la tension, la température, la pression, le débit massique, l'humidité, etc., et les renvoyer au système de contrôle.

De plus, un système de refroidissement est essentiel pour les applications PEMFC embarquées,

Telles que le refroidissement par air ou le refroidissement liquide, afin de réduire le risque de surchauffe des assemblages de PAC. Les systèmes d'alimentation en air et en hydrogène présentent une intégration précise et une haute précision pour fournir une puissance de sortie efficace et stable.

Des opérations de purge supplémentaires sont également effectuées pour purger le gaz et l'eau contaminés afin d'éviter le gel de l'eau ou le blocage du gaz. Comparé au mode condensation, le mode de circulation par condensation peut atténuer plus efficacement la chute de tension causée par une inondation. De nombreux facteurs doivent être pris en compte de manière exhaustive lors de la conception de véhicules à PAC à moteur électrique hybride (PEMFC). Outre la conception d'un système de condenseur robuste et performant, la gestion de l'eau, la gestion thermique, la conception de la gestion du carburant du système auxiliaire et les stratégies de gestion de l'énergie sont également des facteurs importants

- Envoyer des commentaires
- Panneaux latéraux
- Historique
- Enregistrées
- Résultats de traduction disponibles

Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude approfondie des systèmes énergétiques basés sur

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

l'intégration de capteurs hybrides (PVT) et de PAC. Nous avons exploré la complexité de ces systèmes et l'importance de leur modélisation pour comprendre leurs performances et optimiser leur fonctionnement.

Deux configurations principales de systèmes hybrides ont été détaillées : les systèmes autonomes (PV/T+PAC) conçus pour alimenter des charges indépendantes dans des sites isolés, et les systèmes connectés au réseau, offrant des avantages en termes d'efficacité énergétique, de flexibilité et de durabilité. Les composants clés de ces systèmes, tels que les panneaux solaires (PVT), les piles à hydrogène, les électrolyseurs et les systèmes de gestion de l'énergie, ont été examinés.

Une partie significative de l'étude a été consacrée à la modélisation des moteurs électriques, distinguant les moteurs à courant continu (DC) et à courant alternatif (CA), et décrivant leurs principes de fonctionnement et leurs modèles mathématiques. De plus, la modélisation des capteurs PVT, incluant les modèles à une et deux diodes, ainsi que les caractéristiques des modules PV, a été abordée en détail.

Enfin, le chapitre a mis en lumière la technologie de l'hydrogène comme une solution énergétique prometteuse et respectueuse de l'environnement, soulignant son efficacité énergétique, son caractère non polluant et sa disponibilité. La modélisation des PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC) a été présentée, expliquant leur fonctionnement électrochimique et leur potentiel en tant que convertisseurs d'énergie.

En somme, ce chapitre a fourni une base solide pour la compréhension et la conception de systèmes énergétiques hybrides avancés, soulignant leur rôle crucial dans la transition vers des solutions énergétiques plus durables et efficaces.

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

Reference

- [1] Ludmil Stoyanov, (2011), Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Energie électrique, (Thèse, Univ : Pascal Paoli, Français).
- [2] Awaneendra Kumar Tiwari,(2023),A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary, (etude univ, Institut, Institute of Technology, Indian)
- [3] Abou El-Matty Metwally Aly Abd El-Al, (2005), Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System (MSc. Eng. From Ain Shams University/Egypt.
- [4] Nechma Mohamed Lamine, (2019), Modélisation, Commande et Simulation d'un Moteur Asynchrone, (Master, Annaba)
- [5] Vincent Kerhoas (2006), recherche sur modélisation du moteur à courant continu (Artc- l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB), (Plouzané)
- [6] BOUNADJA El hadj, (2012), Machines Electriques, (cours et exercice) Univ-Chelef, Alger.
- [7] Ludmil Stoyanov, (2011), Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables (Artc, Univ Pascal Paoli, 2011. Français)
- [8] Guerif khouthir& Mallem Ahmed Oussama(2021), Etude et simulation d'une machine asynchrone alimenté par un onduleur de tension a commende MLI, (Master, univ – Annaba).
- [9] K. Kety & K.A. Amou &K. Sagna & K.Tepe & Y.Lare &K. Napo(2016), Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque : Cas du module poly cristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire Sévagan (Togo), (ARTC-Revue des Energies Renouvelables (Univ-de Lomé, Togo).
- [10] Lynda Debit, (2018), Modélisation et commande pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque en tenant compte de la variation de la température (Master, Univ mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).
- [11] S. Amara et A. Zerga(2007), Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin W.C. Benmoussa, (Master, Univ Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie
- [12] Benmoussa, W &C., Amara, S. & Zerga, A. (2007). Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin. (Artc d'étude -Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07, Tlemcen, (301-306).

Chapitre III Etude d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et Pile à combustible

- [13] A.Labouret, M.Villoz, (2003), Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel), (Artc de ce livre), (Paris, France).
- [14] Khelifa Abdelkrim(2017) « Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT », (Doctorat en physique) de l'univ hadj Lakhdar de batna-1.
- [15] Majid Ben Ammar, Maher Chaabene, Zied Chtourou,(2012), Artificial Neural Network based control for PV/T panel to track optimum thermal and electrical power, (Artc- University of Sfax, National School of Engineers of Sfax, Tunisia.
- [16] S. Boddaert, R. Morlot, C. Menezo, D. Quenard et J. Brau,(2005) 'Etude et Optimisation du Potentiel d'un Capteur Thermique Photovoltaïque de Faible Epaisseur Intégrable au Bâti,(Artc),Tanger, Maroc.
- [17] D. Semmar & S. Betrouni & D. Lafri (1998), Etude et Réalisation d'un Capteur Solaire à Air (Artc), revenue de : Physique Energétique p 33 – 38, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger.
- [18] Awaneendra Kumar Tiwari & Kalyan Chatterjee & Sanjay Agrawal & Gyanendra Kumar Singh (2023), A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance valuation and contemporary development,(Artc de etude)
- [19] Yamauchi Takashi, chercheur au Centre de Recherche et Développement de Toshiba (2005), Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène- oxygène et validation expérimentale, (Artc, Rev, Energ.Ren, p 109 ,121).
- [21] Marc. Lerenard, Les substrats minces en céramique dans les piles à combustible, (Artc de Umicore France).
- [22] F. Amrouche & B. Mahmah & M. Belhamel & H. Benmoussa ,(2005), Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène- oxygène et validation expérimentale,(Artc, d etude des profs,Alger).
- [23] Lixin Fan & Zhengkai Tu (2022), Recent development in design a state-of-art proton exchange membrane fuel cell from stack to system: Theory, integration and prospective,(Artc, School of Energy and Power Engineering, Univ of Science and Technology, (Wuhan, China)

Chapitre IV

Simulation du système hybride-

Application à un véhicule électrique

1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la simulation du fonctionnement de notre système énergétique reposant sur des capteurs PVT et PAC. Le système comprendra une partie électrique qui sera connectée à des convertisseurs boostés avec commande MPPT.

L'utilisation de MATLAB Simulink pour simuler ce système hybride offre la possibilité de prévoir ses performances et d'optimiser son fonctionnement. On peut expérimenter avec divers scénarios et conditions climatiques pour observer la réaction du système dans différentes circonstances.

2. Le système hybride PVT– PAC pour véhicule électrique

Le système hybride se compose d'un capteur PVT et PAC (PEMFC) (Figure 4.1).

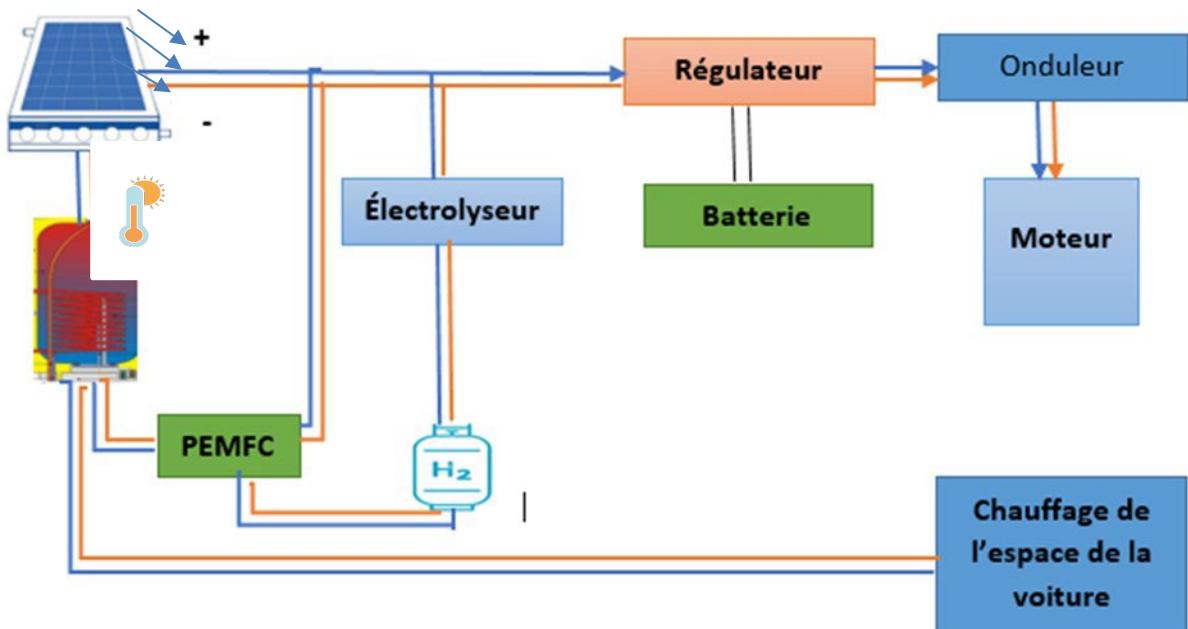


Figure 4.1 : systèmes hybrides PVT– PAC de voiture elec

Ce système représente un modèle de système d'alimentation hybride conçu pour alimenter un véhicule électrique. Le système s'appuie sur une unité PVT pour générer de l'électricité et de l'énergie thermique à partir du rayonnement solaire, l'électricité étant utilisée pour alimenter l'électrolyseur qui produit de l'hydrogène. Cette dernière est stockée puis transformée dans la PAC en énergie électrique qui est distribuée via l'unité de contrôle pour alimenter l'onduleur qui entraîne le moteur asynchrone.

Pendant les périodes de forte production d'énergie, la batterie est chargée en utilisant l'excès

d'énergie, et si la batterie est pleine, l'excès d'énergie peut être utilisé pour produire de l'hydrogène par électrolyse.

La batterie assure la disponibilité de l'énergie lorsque le soleil n'est pas présent (par exemple, la nuit ou par temps nuageux).

Côté thermique, la chaleur générée par PAC est utilisée par une pompe à chaleur pour chauffer l'intérieur du véhicule, et une partie de cette énergie est stockée dans un réservoir thermique pour être réutilisée. Cette intégration de sources solaires, électriques et thermiques vise à atteindre une efficacité énergétique élevée et à réduire les pertes, rendant le système adapté aux solutions de mobilité durable.

Les PV solaire sont intégrés à la batterie et à la PAC pour utiliser efficacement l'énergie, améliorer l'efficacité énergétique et éviter les pannes de courant.

3. Simulation du système hybride PVT– PAC

Dans cette étude, le modèle de système hybride suggéré dans le chapitre précédent a été simulé en utilisant Matlab/Simulink.

La simulation du ce système contient PVT-PAC comprend la simulation du capteur PVT, la simulation du moteur et de la PAC (PEMFC).

3.1. La Simulation du PV

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

Dans cette partie, la simulation approfondie des deux techniques de commande à MPPT Été réalisé. Les résultats obtenus ont été évalués à l'aide du logiciel MATLAB /Simulink. La première partie de cette étude a été réalisée sous test standard Conditions (Eclairement= 1000W/m², T = 25 ° C).

La figure suivant donne la simulation de commande MPPT de PV

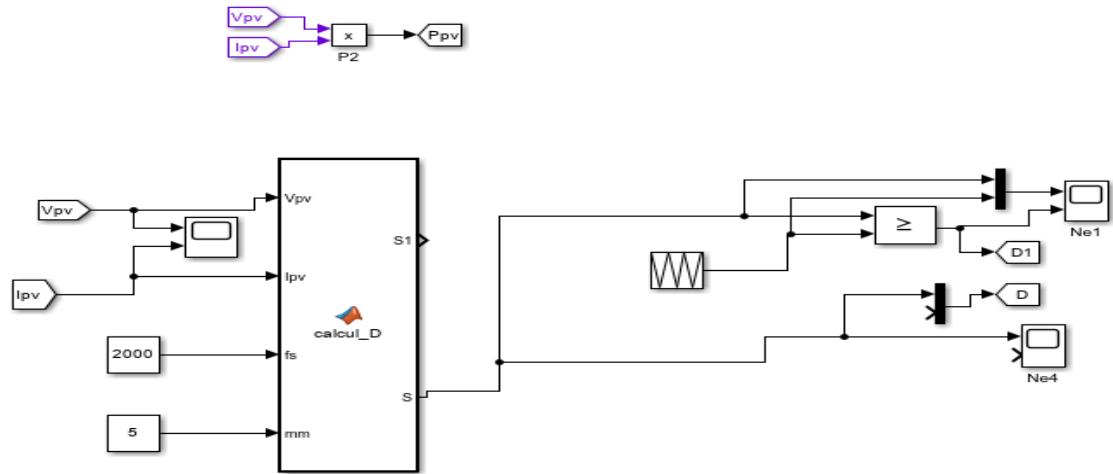


Figure4.2 : la commande MPPT de PV

3.2.La commande globale de système Hybride

```

clear time;
t=0;
T=1e-5;
ff=1;
while t<=3+1*T
time(ff) = [ t ];
t = t + T;
ff =ff+1;
end
length(time)

clear time2;
t2=0;
T2=5e-7;
ff2=1;
while t2<=1.3+1*T2
time2(ff2) = [ t2 ];
t2 = t2 + T2;
ff2 =ff2+1;
end|
length(time2)
length(Ppv)
length(Pbat)
length(P)

```

4. La Simulation du System globale

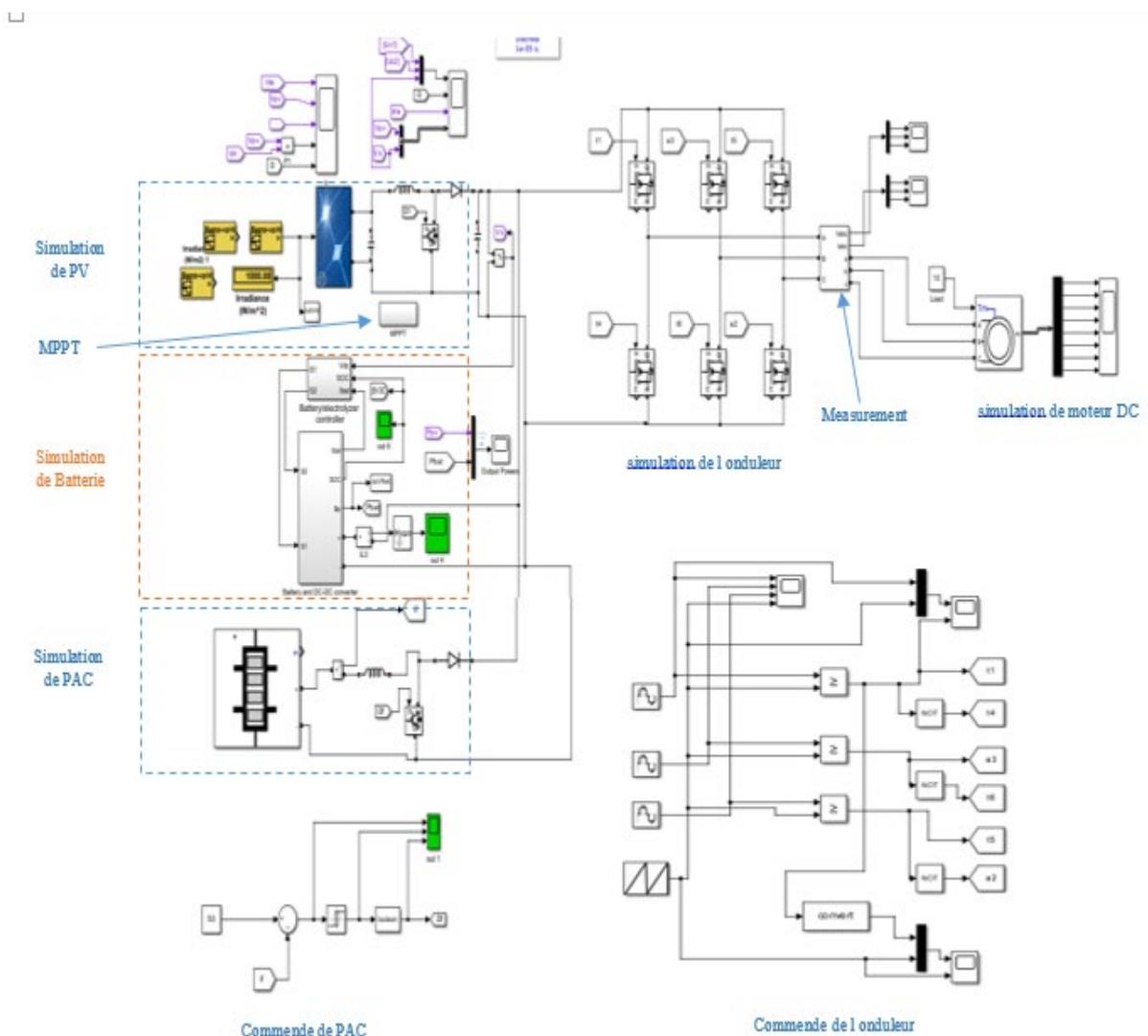


Figure4.8 : Modèle système globale de Matlab Simulink

4.1.Le Résultats et commentaire

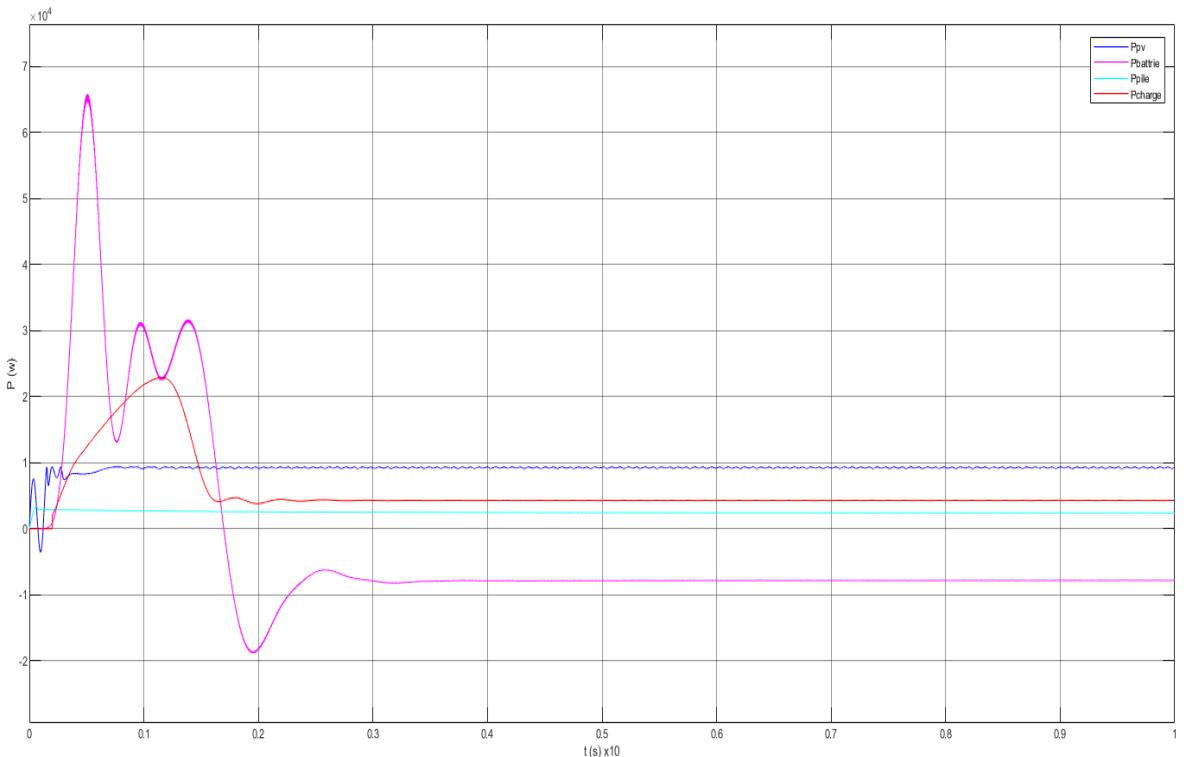


Figure4.9 : Résultats de simulation de MATLEB de système global

$$P_{PV}(t) + P_{Batterie}(t) + P_{PAC}(t) + P_{charge}(t) \text{ (W)}$$

- Avant $t = 0.1$ s :

La puissance des panneaux est égale de 8000w, plus la valeur de puissance de pile à combustible à 3100 w, Là où l'énergie est fournie principalement par des cellules PV.

- Pour $t \geq 0.1$ s

La puissance de charge est principalement fournie par la batterie.

- À $t \geq 1$ s

La puissance de PV égale 9500w et la puissance de PAC égale 3100w, la puissance max de charge 23000w

- À $t = 1.7$ s, la batterie de mode de charge.

- À $t \geq 3$ s

La puissance PV atteint environ 9500w, tandis que la puissance de charge reste stable à environ 4800w. Et La puissance PAC atteint environ 3100 W, Un déficit de puissance d'environ 7800 W est alors compensé par les batteries.

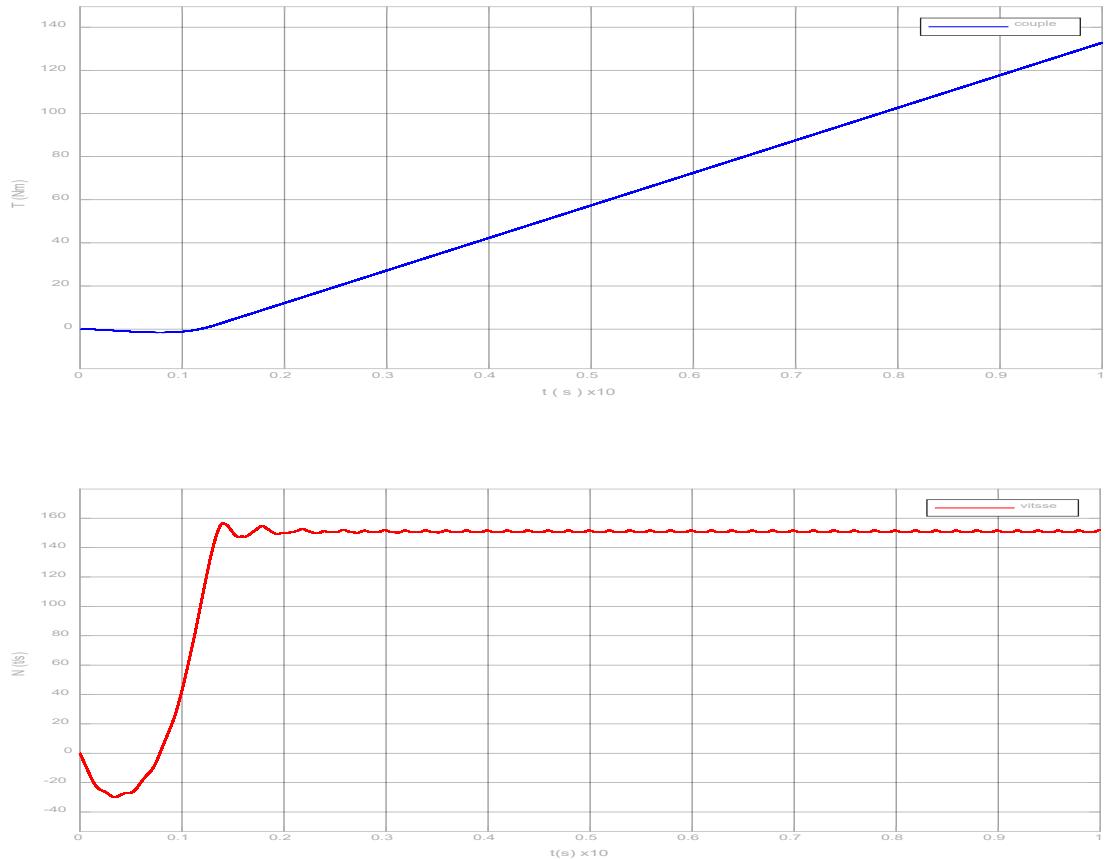


Figure4.10 : Résultats de simulation de moteur de couple et (Nm) vitesse (m/s)

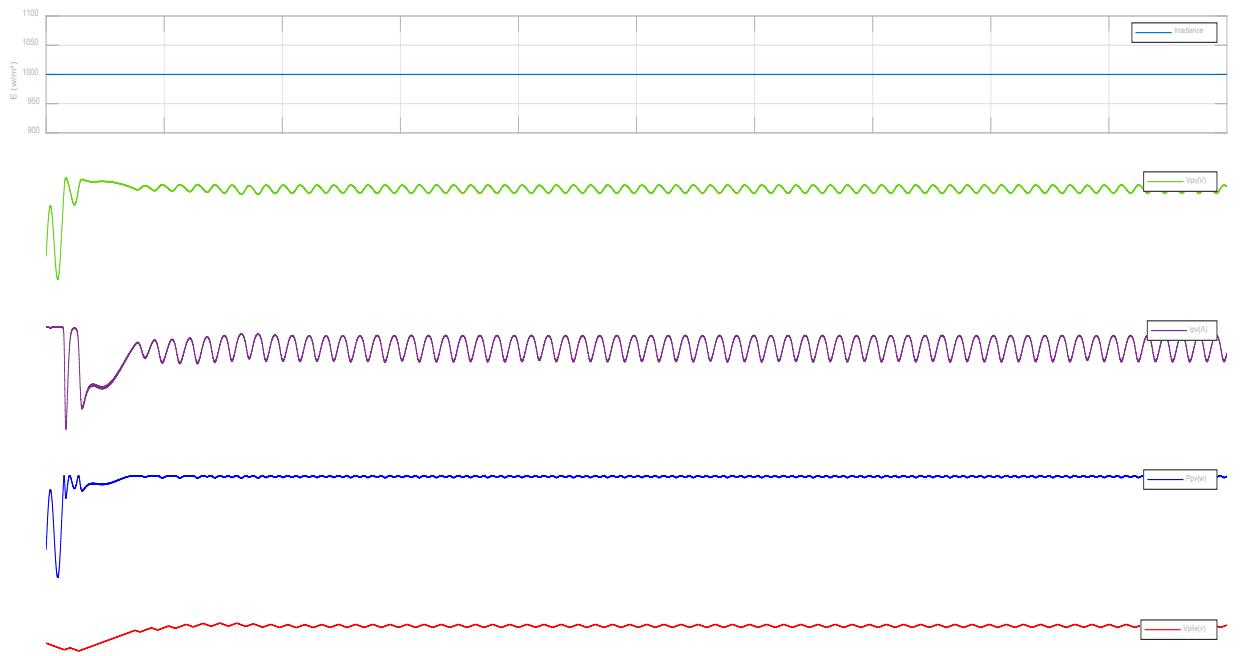
Le résultat de moteur de figue(4.10) assurées que la vitesse de moteur démarrage a le temps de 1.3 seconde puis établir a $t= 3$ s, la valeur max $v=152$ m/s, après donne la valeur stabilise à $V= 150$ m/s. Le couple donne une valeur après $t > 01$ seconde et augmente à une valeur croissante $T= 136$ Nm.

4.2.Résume :

Le diagramme montre l'évolution de la vitesse et du couple d'un moteur électrique depuis le démarrage jusqu' à ce qu'il atteigne l'équilibre.

Le point culminant est provoqué par l'accélération et le transfert soudain d'énergie au début de la présentation, ensuite les deux valeurs liés les uns aux autres et du temps.

4.3.Le Résultats et commentaire de PV-V(v) /Ppv(w)/D/Ipv(A)



**Figure4.11 : Résultats de simulation de E (w/m^2) ; $V_{pv}(\text{v})$; $I_{pv}(\text{A})$;
 $P_{pv}(\text{w})$; $V_{pile}(\text{v})$**

- La tension de $Ppv(t)$ commence par 0, elle augmente rapidement et atteint la limite de 200volt, avec une petite fluctuation, ce fait par le changement du la commutation dans un transformateur de puissance.
- Le courant $Ipv(A)$ commence par 0, il saute a valeur 60A, après stabilise a 55A.
- La tension de pile commence par une valeur faible et augmente et stable à 0.72V
- La puissance de Ppv , commence à 0w, monte en peu de temps et se stabilise à 9500 w avec une petite fluctuation.

Conclusion Générale

Dans cet article, nous avons consacré notre étude au système énergétique hybride avec PV/T et PAC pour le transport, en nous concentrant sur le véhicule électrique ou à hydrogène, et en mentionnant les véhicules marins comme autre exemple d'étude théorique.

Dans le premier chapitre, une introduction générale a été donnée sur les types des énergies renouvelables et leur importance dans le contexte de la transition énergétique. Il met en évidence les avantages de ces systèmes des énergies renouvelables et présents les sources d'énergie principales utilisées dans le monde : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie biomasse l'énergie géothermie.

On a abordé les applications dans le domaine résidentiel puis le chauffe-eau solaire et étudie les types de tours solaires et les concentrateurs solaires et dernièrement les applications dans le domaine mobile (notre étude, la véhicule électrique (historique, fonctionnement, différentes composant, la voiture solaires.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'état de l'art sur les capteurs hybrides PV/T et le pile à combustible, on étudie les types de capteurs hybrides PV/T : son principe de fonctionnement, capteur d'eau et capteur a l'air, capteur hybrides bi-fluides, puis on explique les applications des capteurs PV/T.

Nous avons expliqué les PAC, par leur principe et déférents types et ces applications.

Pour le troisième chapitre, On étudions d'un système énergétique à base de capteurs hybrides et PAC de les système hybride autonome (PV/T+PAC), Explication du contenu les éléments du Système, modélisation du moteur électrique (Moteur électrique, Moteurs à courant continu et ces caractéristiques mécaniques et électriques puis on étudie pour le chapitre 4, la simulation de système hybrides et application a une voiture électrique.

En chapitre 4, Nous avons extrait et étudié les résultats la simulation la PV/T et PAC, et le moteur électriques de la voiture électriques et ces résultats de simulation, et leurs leur importance croissante dans le contexte de la transition énergétique et système mobile.

Sur la base de notre étude, nous avons atteint que cette recherche est plus efficace pour les véhicules avec un espace pour installer des panneaux photovoltaïques tels que les véhicules et les marins, les trains et les gros bus, mais nous avons obtenu un résultat moins réaliste dans les résultats en utilisant le programme Matlab et moins disponible sur les marchés des véhicules et voitures électriques,

Malgré l'applicabilité, mais elle était limitée uniquement aux entreprises, chercheurs et

Conclusion Générale

étudiants d'instituts internationaux, dans l'espoir d'atteindre des voitures électriques respectueuses de l'environnement et moins coûteuses pour l'humanité.

Conclusion Générale

