

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 محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريبيج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Electromécanique**

Spécialité : **Electromécanique**

Par : - Hamraoui Abdallah

- Zougham Souhaib

Sujet

Amélioration d'Efficacité Energétique d'un Système Hybride

PV/T/TEG

Soutenu publiquement, le 01 / 07 / 2025 , devant le jury composé de :

Mr/Bensidhoum Tarek

MCA

Univ-BBA

Président

Mr/Meddad Mounir

PR

Univ-BBA

Examineur

Mr/Benhadouga Seddik

PR

Univ-BBA

Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

*AU BON DIEU LE TOUT PUISSANT ET MISÉRICORDIEUX,
QUI NOUS A ÉCLAIRÉ NOTRE CHEMIN TOUT AU LONG DE
NOS ÉTUDES, QUI NOUS A DONNÉ LA FORCE ET LA
PATIENCE D'ACCOMPLIR CE MODESTE TRAVAIL*

*NOUS ADRESSONS AUSSI NOTRE SINCÈRE SENTIMENT DE
GRATITUDE À NOTRE PROMOTEUR M BENHADOUGA
SEDIK QUI NOUS A GUIDÉ ET ORIENTÉ DURANT TOUTE
CETTE PÉRIODE.*

*NOS PROFONDS REMERCIEMENTS AUX MEMBRES DU
JURY POUR L'INTÉRÊT QU'ILS ONT PORTÉ À NOTRE
RECHERCHE EN ACCEPTANT D'EXAMINER NOTRE
TRAVAIL ET DE L'ENRICHIR PAR LEURS PROPOSITIONS.*

*NOUS TENONS À EXPRIMER NOS SINCÈRES
REMERCIEMENTS À TOUS LES PROFESSEURS QUI NOUS
ONT ENSEIGNÉS ET QUI PAR LEURS COMPÉTENCES NOUS
ONT SOUTENUS DANS LA POURSUITE DE NOS ÉTUDES.*

*ENFIN, ON REMERCIE TOUS CEUX QUI, D'UNE MANIÈRE
OU D'UNE AUTRE, ONT CONTRIBUÉ À LA RÉUSSITE DE CE
TRAVAIL.*

DÉDICACE 1

JE DÉDIE CE TRAVAIL À :

MON PARENT, POUR LE DÉVOUEMENT DONT IL
FAIT PREUVE, À MA FAMILLE ET MES AMI(E)S,
ET À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.

ABDALLAH

DÉDICACE 2

JE DÉDIE HUMBLEMENT CE TRAVAIL :

À MA CHÈRE MÈRE, SOURCE D'AMOUR ET DE
PRIÈRES, POUR SON SOUTIEN
INCONDITIONNEL ET SA TENDRESSE SANS
LIMITES.

À MON PÈRE BIEN-AIMÉ, POUR SA PATIENCE,
SES SACRIFICES ET SA CONFIANCE QUI M'À
TOUJOURS PORTÉ VERS L'AVANT.

À MES GRAND-MÈRES ET À MON GRAND-
PÈRE, POUR LES VALEURS QU'ILS M'ONT
TRANSMISES ET LEUR PRÉSENCE
PROFONDÉMENT INSPIRANTE.

À MES SŒURS, POUR LEUR AFFECTION
SINCÈRE ET LEUR SOUTIEN CONSTANT.

À MES ONCLES ET TANTES, DU CÔTÉ
PATERNEL COMME MATERNEL, POUR LEUR
BIENVEILLANCE, LEURS ENCOURAGEMENTS
ET LEURS PRIÈRES SILENCIEUSES.

SOUHAIB

Table des matières

Introduction générale.....	1-2
Chapitre I Généralité sur les énergies renouvelables	3
I. 1 Introduction	3
I. 2 Types d'énergie renouvelables	3
I. 2. 1 L'énergie éolienne	3
I. 2. 2 L'énergie hydraulique.....	4
I. 2. 3 L'énergie biomasse.....	5
I. 2. 4 L'énergie thermique.....	8
I. 2. 5 Énergies Marines	9
I. 2. 6 L'énergie photovoltaïque.....	10
I. 3 Tableau comparatif des différentes énergies	12
I. 4 L'importance des Énergies Renouvelables	12
I. 5 Conclusion.....	13
Chapitre II Modélisation et simulation d'un système hybride PV/TEG	14
II. 1 Introduction.....	14
II. 2 Première Partie : Modélisation de PV	14
II. 2. 1 Définition cellule photovoltaïque.....	14
II. 2. 2 L'effet photovoltaïque.....	15
II. 2. 3 Modélisation électrique et mathématique d'un panneau PV.....	16
II. 2. 4 Module PV	18
II. 3 Deuxième partie : Modélisation de TEG	20
II. 3. 1 Définition de générateur thermoélectrique.....	20
II. 3. 2 Modélisation électrique et mathématique d'un TEG	21
II. 3. 3 Effets thermoélectriques.....	22
II. 3. 4 Types de générateurs thermoélectrique.....	23
II. 4 Troisième Partie : La simulation de système hybride PV/TEG	24
II. 4. 1 Définition de MATLAB Simulink	24
II. 4. 2 Description du système à simuler.....	24
II. 4. 3 Modèle Simulation du système photovoltaïque	26
II. 4. 4 Modèle Simulation de TEG.....	32
Les résultats de la simulation :.....	36

II. 5 Conclusion	40
Chapitre III Amélioration de système hybride PV/T/TEG	41
III. 1 Introduction	41
III. 2 Le système hybride PV/TEG	41
III. 3 La simulation de système hybride PV-TEG	42
III. 3. 1 Série/Parallèle	42
III. 3. 2 Série/Sérié	44
III. 4 Caractéristiques réels d'un panneau photovoltaïque	45
III. 4. 1 Présentation des résultats expérimentaux du panneau photovoltaïque	46
III. 4. 2 Comparaison des caractéristiques expérimentales et simulées de sortie PV	49
III. 5 Optimisation du modèle électrique	50
III. 6 La simulation PV/TEG dans les Termes réels	51
III. 7 Conclusion	54
 Conclusion générale.....	 56

Liste des figures

Figure I.1 :Energie éolienne	4
Figure I.2 : Energie hydraulique	5
Figure I.3 : Troncs d’arbres	7
Figure I.4 : L’énergie thermique	9
Figure I.5 : Énergies Marines	10
Figure I.6 : Panneaux solaires	11
Figure II.1 : Cellules photovoltaïque	15
Figure II.2 : Fonctionnement d’une cellule solaire photovoltaïque. [17]	16
Figure II.3 : Circuit équivalent d’une cellule PV –Model idéal.	16
Figure II.4 : générateur thermoélectrique	21
Figure II.5 : Modèle électrique d’un TEG	21
Figure II.6 : Schéma principe de l’effet Seebeck	23
Figure II.7 : plaque signalétique d’un panneau	25
Figure II.8 : Schéma simulé d’un panneau étudié	26
Figure II.9 : Caractéristiques électrique P-V d’un panneau photovoltaïque.	27
Figure II.10: Caractéristiques électrique I-V du panneau photovoltaïque.	28
Figure II.11 : Influence de l’éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V.	30
Figure II.12 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V	31
Figure II.13 : schéma de modélisation d’un générateur thermoélectrique (1TEG) réalisé sous l’environnement Simulink/Matlab	32
Figure II.14 : Caractéristiques électrique P-V d’un seul TEG	32
Figure II.15 : Caractéristiques électrique I-V du TEG	33
Figure II.16 : schéma simulations réalisées sur un ensemble de dix générateurs thermoélectrique en série	34
Figure II.17 : Caractéristiques électrique P-V d’un ensemble de dix TEG	35
Figure II.18 : Caractéristiques électrique I-V d’un ensemble de dix TEG	35
Figure II.19 : Le schéma global d’un champ de 20 TEG série /parallèle	36
Figure II.20 : Caractéristique p-v d’un champ de 20 TEG série / parallèle	37
Figure II.21 : Caractéristique I-V d’un champ de 20 TEG série / parallèle	37
Figure II.22 : Le schéma global d’un champ de 20 TEG série /série	38
Figure II.23 : Caractéristique p-v d’un champ de 20 TEG série / série	38

Figure II.24 : Caractéristique I-V d'un champ de 20 TEG série / série.....	39
Figure II.25 : Comparaison des caractéristiques des TEG.....	39
Figure III.1 : Dessin approximatif du système hybride PV/T/TEG.....	42
Figure III.2 : Schéma d'un GPV associé avec un champ des TEG (série/parallèle)	43
Figure III.3 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle).....	43
Figure III.4 : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle).....	44
Figure III.5 : Schéma d'un GPV associé avec un champ des TEG (série/série)	44
Figure III.6 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/série).....	45
Figure III.7 : Étude expérimentale des caractéristiques électriques d'un module solaire photovoltaïque	46
Figure III.8 : Caractéristique réel de la puissance en fonction de tension d'un panneau solaire	48
Figure III.9 : Courbe caractéristique Puissance-Tension (P-V) d'un module photovoltaïque : 'comparaison entre résultats réels et simulés'	49
Figure III.10 : Courbe caractéristique Puissance-Tension (P-V) d'un module photovoltaïque : 'après estimation'	51
Figure III.11 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle) dans les Termes 870/47	52
Figure III.12 : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle) dans les termes de 870/47.....	52
Figure III.13 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/série) dans les Termes 870/47	53
Figure III.14 : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle) dans les termes de 870/47.....	53

Liste des tableaux

Table 1: comparatif des différentes énergies	12
Table 2 : Tableau des symboles et des constants	18
Table 3 : Spécifications du module PV Solare	26
Table 4: les valeurs mesurées de la tension (VOC) et du courant (ISC) d'un panneau	48
Table 5: Les valeurs de l'irradiation et de température	49

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par une demande énergétique croissante et une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux, la recherche de solutions durables et performantes constitue une priorité incontournable. Les énergies fossiles, longtemps dominantes dans la production énergétique mondiale, présentent aujourd'hui de nombreuses limites : leur épuisement progressif, leur prix fluctuant, et surtout leur contribution significative au réchauffement climatique. Face à ces défis, les **énergies renouvelables** apparaissent comme des alternatives crédibles, répondant aux exigences de durabilité, de sécurité énergétique et de préservation de l'environnement [1].

Parmi ces sources, **l'énergie solaire** occupe une place de choix en raison de son abondance, de sa gratuité, de sa propreté et de sa disponibilité quasi universelle. Les systèmes photovoltaïques (PV), qui convertissent directement le rayonnement solaire en électricité, sont largement utilisés dans le monde. Toutefois, leur **rendement reste limité**, car une part importante de l'énergie solaire est dissipée sous forme de chaleur. Cette chaleur provoque une élévation de température des cellules photovoltaïques, ce qui nuit à leur efficacité [2].

Pour pallier ces limitations, des systèmes hybrides combinant plusieurs technologies de conversion d'énergie ont été développés. Parmi eux, les systèmes **PV/T/TEG** (Photovoltaïque/Thermique/Thermoélectrique) représentent une solution innovante. Ils permettent une exploitation conjointe du rayonnement solaire sous ses deux formes principales : **la lumière**, convertie en électricité par les cellules PV, et **la chaleur**, récupérée par un système thermique et exploitée ensuite par des **générateurs thermoélectriques (TEG)** pour produire de l'électricité supplémentaire via l'effet Seebeck.

Dans l'architecture étudiée dans ce travail, la gestion thermique repose sur un **serpentin** traversé par de l'eau à une température constante de 15 °C. Ce serpentin est conçu pour **refroidir à la fois la moitié inférieure du panneau photovoltaïque et l'ensemble des générateurs thermoélectriques** disposés en aval. Ce dispositif présente **deux avantages majeurs** :

1. Il **réduit la température des cellules photovoltaïques**, permettant ainsi une amélioration de leur rendement électrique, qui est fortement dépendant de la température de fonctionnement.
2. Il **assure un gradient thermique optimal au niveau des TEG**, ce qui favorise la production d'électricité supplémentaire à partir de la chaleur résiduelle, grâce à l'effet thermoélectrique.

Ainsi, ce système thermique joue un double rôle : il agit comme **un système de refroidissement passif pour les PV** et **un système d'activation thermique pour les TEG**, contribuant de manière significative à l'amélioration du rendement énergétique global du système hybride

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser le **fonctionnement**, les **performances**, et les **enjeux liés à l'intégration d'un système hybride PV/T/TEG**. Nous étudierons le comportement thermique et électrique de chaque composant, leur interaction dans un cadre intégré, ainsi que les différentes stratégies d'optimisation du rendement global du système.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- Le **premier chapitre** présente une vue d'ensemble des énergies renouvelables, en détaillant leurs principales sources, leurs avantages et leurs limites, afin de mieux situer le cadre général de l'étude.
- Le **deuxième chapitre** est dédié à l'étude des panneaux solaires photovoltaïques (PV), en décrivant leur principe de fonctionnement, leur structure et leurs limitations. Ensuite, nous introduisons le système hybride PV/T/TEG, en exposant sa modélisation thermique et électrique, ainsi que son architecture globale. Les différentes simulations sont réalisées à l'aide du logiciel **MATLAB/Simulink**.
- Le **troisième chapitre** porte sur **l'optimisation de la performance énergétique** du système PV/T/TEG. À travers des scénarios de simulation, nous explorons diverses configurations et paramètres afin d'augmenter l'efficacité globale du système.

Ce mémoire s'achève par une **conclusion générale** qui résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives pour le développement futur de systèmes solaires hybrides à haute efficacité

Chapitre I Généralité sur les énergies renouvelables

I. 1 Introduction

Depuis longtemps, l'humanité exploite diverses sources d'énergie, afin de satisfaire ses exigences. Après le bois et la puissance des animaux, les sources d'énergie non renouvelables telles que le charbon, le pétrole et le gaz ont permis de générer une grande quantité d'électricité, cependant elles sont restreintes et causent une grande pollution. Leur usage considérable a engendré plusieurs problèmes, tels que le réchauffement climatique et détérioration de l'environnement. Aujourd'hui, en raison de l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux risques qu'elles engendrent, il devient essentiel de découvrir des solutions plus écologiques et durables. Les sources d'énergie renouvelables, telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la chaleur terrestre constituent des options sûres. Elles emploient des ressources naturelles illimitées et facilitent la production de l'électricité et de la chaleur sans affecter la planète. En plus de préserver l'écosystème, ces énergies encouragent l'autonomie énergétique et génèrent de nombreux emplois dans le monde. [1]

I. 2 Types d'énergie renouvelables

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables dans l'environnement humain, comme : l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie biomasse, l'énergie thermique et l'énergie photovoltaïque.

I. 2. 1 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne, est une énergie cinétique du vent, utilisée après conversion en énergie mécanique ou électrique. Cette énergie résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même relié soit à des systèmes mécaniques qui servent à moulin le grain ou à pomper l'eau, soit à un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Lorsque l'arbre est connecté à une charge, par exemple à une pompe, la machine est appelée roue éolienne ; lorsque celle-ci est utilisée pour produire de l'électricité, il s'agit d'une turbine éolienne ou d'un aérogénérateur.[2]

I. 1. 1. 1 Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne produit de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, sans pollution de l'air, des sols ni des eaux, contrairement aux énergies fossiles. [6]

- Elle utilise une ressource naturelle inépuisable, le vent, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable durable. [6]
- L'énergie éolienne génère des recettes fiscales locales via les taxes sur les parcs éoliens, apportant un revenu aux collectivités territoriales.[7]

I. 2. 1. 1 Inconvénients

- L'exploitation de l'énergie éolienne est non polluante par elle-même mais les aérogénérateurs engendrent une pollution acoustique due à la notation des pâles qui engendrent une dégradation du paysage.
- Faible disponibilité (20 à 30%).
- Difficultés de raccordement au réseau
- Surface au sol.



Figure I.1 : Energie éolienne

I. 2. 2 L'énergie hydraulique

Cette énergie produite par une chute d'eau entre deux niveaux, l'un étant plus élevé que l'autre, est fournie par des roues à eau ou des turbines hydrauliques. On peut exploiter la source d'énergie renouvelable, dès que l'eau atteint un volume suffisant et un débit régulier. L'exploitation de cette énergie nécessite aujourd'hui des installations de grande taille, comprenant des lacs de réserve, des barrages, des canaux de dérivation et l'installation de grandes turbines, ainsi que des systèmes de production d'énergie électrique. Le développement de l'énergie hydroélectrique exige d'importants capitaux [2]

I. 2. 2. 1 Avantages de l'énergie hydraulique

- Production stable et continu
- Stockage facile de l'eau
- Longe durée de vie de barrage

I. 2. 2. 2 Inconvénients

- Cout très élevé de barrage
- Risque en cas de rupture de barrage
- Aléas climatiques (sécheresse).[8]
- Impacts sur l'environnement à la construction.[8]



Figure I.2 : Energie hydraulique

I. 2. 3 L'énergie biomasse

La biomasse est un terme général désignant de grandes quantités de matériaux de nature très hétérogène. [3]

La biomasse pouvant être utilisée à des fins énergétiques fait référence à toute matière organique pouvant être utilisée directement comme combustible ou convertie en d'autres substances (solides, liquides, gazeuses) pouvant être utilisées dans des usines de conversion.

D'autres formes de biomasse peuvent être constituées de résidus de cultures (paille) destinés à la consommation humaine ou animale, ou de plantes cultivées uniquement à des fins

Les principaux types de biomasse sont les résidus forestiers, les résidus de l'industrie de transformation du bois, les résidus des élevages, les résidus des marchés et les déchets solides ménagers. La biomasse est la forme la plus sophistiquée de stockage d'énergie solaire, permettant aux plantes de convertir le CO₂ atmosphérique en matière organique grâce au processus de photosynthèse au cours de leur croissance [3]

Ainsi, environ 2,1011 tonnes de carbone sont liées chaque année dans le monde, avec un contenu énergétique d'environ 70,10 3 M tep. La consommation énergétique de la biomasse ne contribue pas à l'effet de serre, puisque la quantité de CO₂ libérée lors de la décomposition ou de la conversion énergétique est comparable à la quantité absorbée lors de la croissance de la biomasse elle-même. Il n'y a donc aucune contribution nette à l'augmentation des niveaux de CO₂ atmosphérique [3]

- Bois énergie : C'est l'énergie renouvelable la plus utilisée au monde. Les applications utilisant le bois comme combustible sont fondamentalement basées sur l'utilisation de la chaleur et vont des chaudières individuelles aux systèmes collectifs en passant par les chaufferies industrielles d'une puissance unitaire supérieure à 15 MW.

- Biocarburants : Le développement des biocarburants est souvent associé à des cycles de fluctuations du prix du baril de pétrole. Actuellement, l'éthanol (betterave, blé...) et le biodiesel (colza, tournesol...) offrent des bénéfices environnementaux importants dans la lutte contre l'effet de serre.

- Biogaz : L'utilisation du biogaz en Europe se situe précisément à l'intersection des enjeux environnementaux et énergétiques, ce qui en fait un secteur industriel à part entière. Les déchets de l'industrie agricole, de l'agriculture, des décharges domestiques ou les boues d'épuration peuvent être fermentées pour produire de la chaleur et de l'électricité. Le potentiel exploitable en Europe est estimé à 18 millions de tonnes par an d'ici 2020 [4]

I. 2. 3. 1 Avantages de l'énergie biomasse [9]

L'un des principaux avantages de l'énergie biomasse est son caractère renouvelable. Selon une directive européenne, elle provient de la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus issus de l'agriculture, de la sylviculture, des industries associées, ainsi que des déchets municipaux et industriels.

En plus, la biomasse utilise des ressources abondantes et peu coûteuses, souvent considérées comme des déchets, telles que :

- Le bois provenant des forêts.
- Les résidus agricoles (feuilles, paille, tiges, etc.).
- Les déchets alimentaires issus de l'industrie ou des ménages.
- Le fumier des exploitations agricoles.

I. 2. 3. 2 Inconvénients

L'un des inconvénients de l'énergie biomasse est son coût élevé, notamment lié aux procédés de combustion ou de méthanisation, ainsi qu'aux frais de fonctionnement des centrales. Le transport des ressources contribue aussi à augmenter les coûts, surtout en fonction du prix du carburant.

Un autre point négatif est que la biomasse émet du CO₂ lors de sa combustion. Cependant, cette émission est compensée par le CO₂ absorbé par les plantes pendant leur croissance, ce qui crée un cycle fermé.[10]



Figure I.3 : Troncs d'arbres.

I. 2. 4 L'énergie thermique

L'énergie thermique est une forme d'énergie qui résulte de l'agitation des particules au sein de la matière. Elle est liée à la température d'un système et peut être convertie en d'autres formes d'énergie, telles que l'énergie mécanique ou électrique. Dans les systèmes thermiques, la chaleur peut être utilisée pour produire de l'électricité, chauffer des bâtiments, ou encore dans des processus industriels. Il existe 2 types de l'énergie thermique : Énergie thermique géothermique, Énergie thermique solaire. [27]

- **L'énergie thermique solaire :** l'énergie solaire thermique est utilisée dans des installations solaire thermodynamiques fours solaires ou cheminées solaires la chaleur du soleil produit de la vapeur d'eau qui alimente une turbine alimentant elle-même un générateur qui produit de l'électricité
- **L'énergie thermique géothermique :** L'énergie géothermique consiste à exploiter la chaleur naturelle stockée sous la surface de la Terre. Cette chaleur provient de la désintégration des éléments radioactifs présents dans le sol et du noyau terrestre. Elle peut être utilisée pour le chauffage direct des bâtiments ou pour produire de l'électricité lorsque la température est suffisamment élevée. Très fiable et disponible en permanence, la géothermie est particulièrement intéressante dans les régions volcaniques ou géologiquement actives, mais elle nécessite des installations spécifiques et parfois des forages profonds

I. 2. 4. 1 Avantages de l'énergie thermique

- Cette énergie est rentable à la production
- Elle a un prix modeste sur le marché mondial.
- Souplesse d'utilisation et disponibilité élevée.
- Facilité d'exploitation

I. 2. 4. 2 Inconvénients

- Prix fluctuants.
- Géostratégie des ressources.
- Impacts sur l'environnement
- Il faut un plan d'eau à proximité.
- Les usines possédant un circuit de refroidissement à circuit ouvert, peuvent avoir des problèmes écologiques dus au réchauffement des rivières.



Figure I.4 : L'énergie thermique

I. 2. 5 Énergies Marines

Les énergies marines, bien que moins développées que les autres sources d'énergie renouvelables, représentent un potentiel important pour la production d'énergie propre et durable. Ces technologies émergentes exploitent la puissance des océans à travers trois principales catégories : l'énergie marémotrice, l'énergie holométrique et l'énergie thermique des mers. Chacune de ces technologies présente des avantages notables mais également des défis qui freinent leur déploiement à grande échelle.

I. 2. 5. 1 L'énergie marémotrice

L'énergie marémotrice exploite les variations du niveau de la mer, causées par les marées, pour produire de l'électricité. Cette énergie est captée grâce à des turbines installées dans des barrages construits sur des estuaires ou des baies.[26]

I. 2. 5. 2 L'énergie Holométrique

L'énergie holométrique tire parti de l'énergie des vagues océaniques pour produire de l'électricité. Des dispositifs flottants ou immergés captent le mouvement des vagues, convertissant l'énergie cinétique en énergie électrique.[26]

I. 2. 5. 3 L'énergie thermique des mers

L'énergie thermique des mers (ETM) exploite la différence de température entre les eaux superficielles chaudes et les eaux profondes froides des océans pour produire de l'électricité. Ce procédé repose sur un cycle thermodynamique utilisant des fluides caloporteurs.[26]



Figure I.5 : Énergies Marines

I. 2. 6 L'énergie photovoltaïque

Le soleil demeure, à ce jour, la principale source d'énergie renouvelable, en dépit de l'énorme distance qui le sépare de la planète. La puissance que le soleil émet en rayonnant est évaluée à 390×10^{15} GW, tandis que la surface terrestre ne parvient à capter que 180×10^6 GW. En atteignant la terre, le rayonnement solaire connaît d'importantes transformations, causées par flux lumineux qui est la quantité de puissance reçue par une surface exposée à un éclairage. Sous des conditions atmosphériques idéales, cette densité de puissance atteint 1Kw/m^2 pour un emplacement au niveau de la mer. [5]

- **Panneaux photovoltaïques bifaciaux :** Les panneaux bifaciaux sont des panneaux solaires qui captent l'énergie solaire des deux côtés du panneau, contrairement aux panneaux traditionnels qui ne captent l'énergie que par leur face avant. Cela signifie que la

lumière réfléchi par le sol ou d'autres surfaces peut également être utilisée pour produire de l'électricité.[27]

- **Stockage d'énergie :** Le stockage d'énergie est essentiel pour pallier l'intermittence de la production solaire. Les technologies courantes incluent les batteries lithium-ion, les systèmes à flux redox, le stockage thermique, et l'hydrogène. Bien que ces systèmes permettent d'améliorer l'indépendance énergétique et de réduire les coûts d'électricité, ils restent coûteux et peuvent souffrir de pertes d'efficacité en fonction des conditions d'utilisation. .[27]



Figure I.6 : Panneaux solaires

I. 2. 6. 1 Avantages de l'énergie photovoltaïque

- Validation par le public
- Conçu pour les régions chaudes et les endroits éloignés.
- L'énergie solaire offre, en plus des bénéfices des énergies renouvelables, des atouts propres, notamment : une énergie contrôlable et ajustable aux contextes de chaque région.
- Coûts de maintenance plutôt limités.

I. 2. 6. 2 Inconvénients

- Le coût demeure toujours élevé.

- Energie plutôt faible.
- Accessibilité

I. 3 Tableau comparatif des différentes énergies

Source d'énergie	Rendement	Coût	Avantages	Inconvénients
Solaire Photovoltaïque	Moyen (~15-22%)	Modéré	Inépuisable, faible maintenance	Intermittence, dépendance au climat
Solaire Thermique	Élevé (jusqu'à 70%)	Modéré	Chauffage efficace, technologie simple	Dépendance au climat
Éolien	Moyen (~30-40%)	Élevé	Propre, bonne rentabilité	Variabilité, nuisances visuelles et sonores
Biomasse	Moyen (~20-25%)	Variable	Valorisation des déchets, stockable	Émissions de CO ₂ , concurrence alimentaire
Géothermie	Élevé	Élevé	Stable, faible impact environnemental	Localisation limitée, coût initial élevé
Hydraulique	Très élevé	Très élevé	Fiable, stockage possible	Impact écologique, coût élevé
Énergies Marines	En développement	Très élevé	Potentiel important	Coûts très élevés, technologie émergente

Table 1: comparatif des différentes énergies

I. 4 L'importance des Énergies Renouvelables

L'importance des énergies renouvelables est multiple et essentielle pour l'avenir énergétique et environnemental à l'échelle mondiale. Elles jouent un rôle majeur dans la lutte contre le changement climatique en permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, qui sont la principale cause du réchauffement de la planète. La transition vers ces sources d'énergie est également cruciale pour la santé publique, car elle contribue à diminuer la pollution de l'air, responsable de nombreuses maladies respiratoires et de décès prématurés. Par ailleurs, le développement des énergies renouvelables favorise l'indépendance énergétique des pays en

valorisant les ressources locales et en limitant la dépendance aux énergies fossiles importées, dont les prix sont souvent instables. Sur le plan économique, ce secteur représente un puissant levier de croissance, générant des emplois dans les domaines de la recherche, du développement, de la fabrication, de l'installation et de la maintenance des équipements. Enfin, les énergies renouvelables donnent aux citoyens et aux collectivités la possibilité de maîtriser leur propre production d'énergie, encourageant ainsi une transition énergétique décentralisée et participative.[11]

I. 5 Conclusion

Ce chapitre a souligné l'importance majeure des énergies renouvelables face à la crise énergétique et environnementale actuelle. Il a montré que la transition des énergies fossiles, limitées et polluantes, vers des alternatives durables et écologiques est indispensable pour contrer le changement climatique et préserver l'environnement.

Différents types d'énergies renouvelables ont été présentés, chacun avec ses avantages et ses limites. L'énergie éolienne apparaît comme une source propre mais sujette à intermittence et à certains impacts environnementaux et sociaux. L'énergie hydraulique offre une production stable mais nécessite des investissements importants et peut engendrer des impacts écologiques. La biomasse valorise des ressources organiques renouvelables, bien que ses coûts et émissions nécessitent une gestion rigoureuse. L'énergie thermique solaire est efficace et rentable, mais dépend de certains facteurs externes. Enfin, l'énergie photovoltaïque est flexible et adaptée à diverses régions, malgré un coût initial élevé.

En résumé, les énergies renouvelables constituent les piliers d'un avenir énergétique durable, permettant de répondre aux besoins mondiaux tout en réduisant les pressions environnementales. Cette transition est à la fois une nécessité écologique et une opportunité économique et sociale, renforçant l'indépendance énergétique et favorisant un développement durable à l'échelle mondiale.

Chapitre II Modélisation et simulation d'un système hybride PV/TEG

II. 1 Introduction

Après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables, nous allons à présent étudier le système hybride PV/T/TEG dans ses composantes et son fonctionnement. » La modélisation des cellules photovoltaïques et des modules thermoélectriques nécessite une compréhension approfondie des configurations physiques et des caractéristiques électriques des éléments constitutifs, ainsi qu'une formulation précise des relations non linéaires (pour les PV) ou linéaires (pour les TEG) entre courant, tension et température, avec une détermination rigoureuse des paramètres pour garantir la précision des modèles.

Ce chapitre aborde la modélisation des cellules photovoltaïques ainsi que celle des générateurs thermoélectriques, Dans le cadre de ce travail, nous avons développé des simulations numériques. Ces simulations, basées sur les modèles électriques équivalents et les équations caractéristiques permettent d'analyser les performances des cellules photovoltaïques et des modules thermoélectriques sous différentes conditions d'éclairement, de température

II. 2 Première Partie : Modélisation de PV

II. 2. 1 Définition cellule photovoltaïque

Les cellules solaires, qui génèrent de l'électricité à partir de la lumière solaire, constituent la partie essentielle d'un système photovoltaïque (PV). Ces cellules forment une diode semi-conductrice particulière, telle que le silicium, l'arséniure de gallium ou le cadmium, qui convertit le rayonnement électromagnétique en courant continu [14] ,La puissance des modules PV est influencée par les matériaux des cellules, la température ambiante, le rayonnement solaire, la température des cellules, l'ombrage et l'angle d'inclinaison Ces facteurs affectent l'efficacité des modules photovoltaïques, individuellement ainsi qu'en combinaison [15]



Figure II.1 : Cellules photovoltaïques

II. 2. 2 L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

« Phots », qui signifient lumière.

« Volta », du nom du physicien Alessandro Volta

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique par lequel certains matériaux semi-conducteurs génèrent une différence de potentiel électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ce processus permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, et constitue le principe de base des cellules solaires utilisées dans les systèmes photovoltaïques.[16]

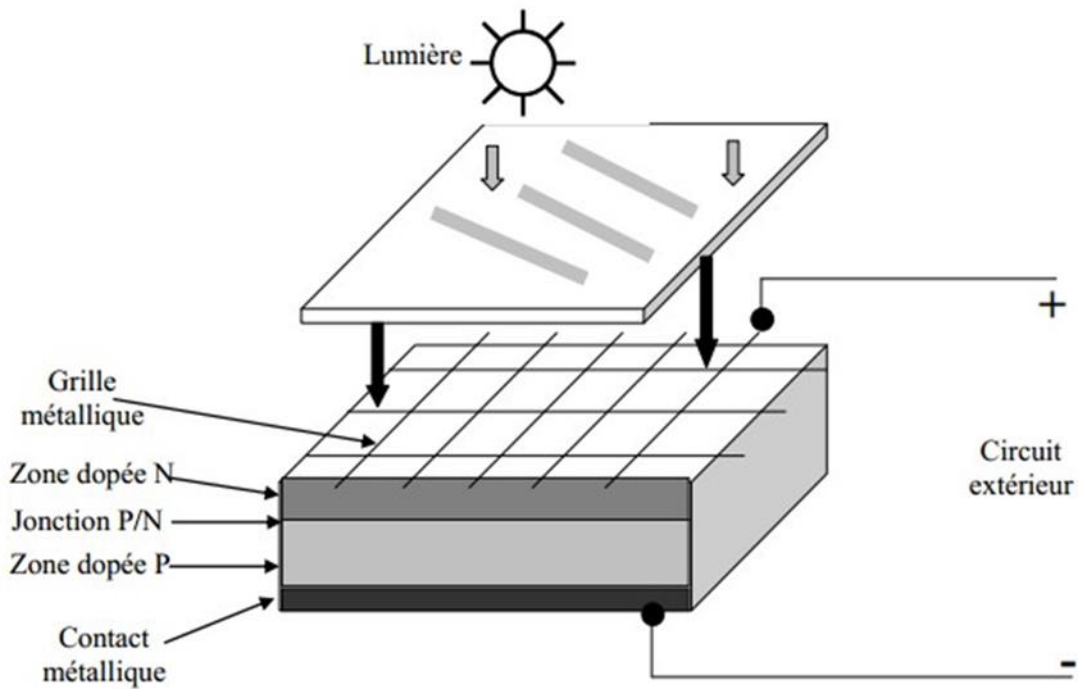


Figure II.2 : Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.

II. 2. 3 Modélisation électrique et mathématique d'un panneau PV

II. 2. 3. 1 Modèle idéal

La Figure II.3 représente Un modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, Ce circuit incorpore une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances disposées en série (R_s) et en parallèle (R_{sh}) pour prendre en compte les phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule

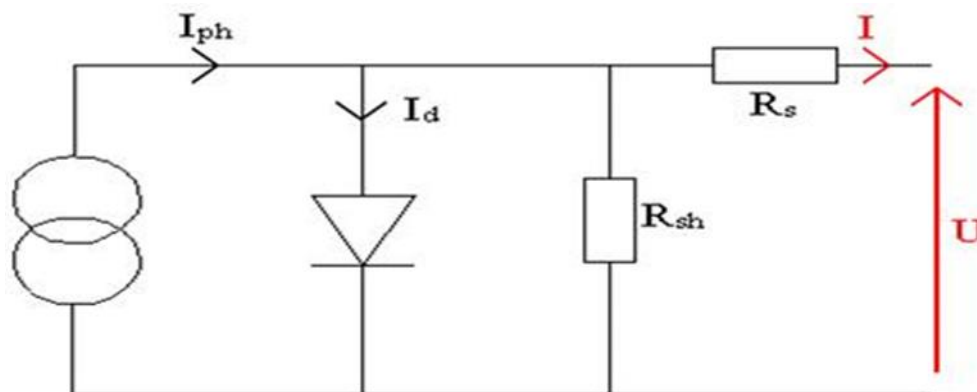


Figure II.3 : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal.

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit :

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_t}} - 1 \right) \quad (II-1)$$

Où

V_D : Différence du potentiel électrique entre les deux extrémités de la diode.

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

n: Facteur d'idéalité de la diode.

V_t : Tension thermique en fonction de la température donnée par l'équation suivante

$$V_t = \frac{k.T}{q} \quad (II-2)$$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_t}} - 1 \right) \quad (II-3)$$

II. 2. 3. 2 Modèle mathématique

- Le photon courant

$$I_{ph} = [I_{sh} + ki(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (II-4)$$

- Le courant de saturation

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T}{T_n} \right]^3 \cdot \exp \left[\frac{q.Eg \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n.k} \right] \quad (II-5)$$

- Le courant réversible

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q.V_{oc}}{n.N_s.k.T} \right)} - 1} \quad (II-6)$$

- Le courant de Shunt

$$I_{sh} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (II-7)$$

- Le courant de sortie de la cellule photovoltaïque

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{q.(V + I.R_s)}{n.K.N_s.T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (II-8)$$

Ou :

Symbole	Désignation	Unité
I _{ph}	Le photon courant	Ampère (A)
I _{cc}	Le courant de court-circuit	Ampère (A)
K _i	Le courant de court-circuit de la cellule à 25°C et 1000 W/m ²	Ampère (A)
T	La température en Kelvin	Kelvin (K)
T _n	La température nominale	Kelvin (K)
G	L'irradiance solaire	Watt par mètre carré (W/m ²)
Q	La charge de l'électron	Coulomb (C)
V _t	Tension thermique de la diode	Volt (V)
V _{co}	La tension du circuit ouvert	Volt (V)
N	Le facteur d'idéalité de la diode	Sans unité
K	La constante de Boltzmann	Joule par Kelvin (J/K)
E _g	L'énergie de gap du semiconducteur	Electronvolt (eV)
N _s	Nombre de cellules PV en série	Sans unité
N _p	Nombre de cellules PV en parallèle	Sans unité
R _s	Résistance de série	Ohm (Ω)
R _{sh}	Résistance de shunt	Ohm (Ω)

Table 2 : Tableau des symboles et des constants.

II. 2. 4 Module PV

Un champ solaire est constitué de modules solaires connectés en série et en parallèle. Un module solaire unique est composé d'un certain nombre de cellules, en fonction de la capacité du module. Les cellules fonctionnent à une faible tension, allant de moins de 1 V (cellule PV) à 3 ou 4 V (cellule Li-Ion). Ces basses tensions ne sont pas adaptées aux systèmes à haute puissance existants, c'est pourquoi les cellules solaires sont connectées en série pour créer une batterie ou un module PV avec une tension de sortie plus élevée [18]. La puissance de sortie du champ solaire

dépend de l'irradiation solaire (en kW/m^2), de la température des cellules et de la surface du champ.

II. 2. 4. 1 Les caractéristique d'un module PV [16]

Un module photovoltaïque (PV) est l'élément fondamental de tout système solaire photovoltaïque. Il convertit directement l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La connaissance approfondie des caractéristiques électriques et physiques d'un module PV est essentielle pour optimiser le rendement et garantir la fiabilité des systèmes solaires

- **La puissance maximale (P_{max})** : C'est la puissance électrique maximale que le module peut délivrer dans des conditions standards (1000 W/m^2 , 25°C , AM1.5).

Importance : Permet de dimensionner les installations et de comparer les performances des différents modules.

Facteurs influents : L'irradiation solaire disponible, la température ambiante, l'âge du module, les pertes dues à la poussière, aux ombrages et aux salissures.

- **Le courant de court-circuit (I_{sc})** : Courant maximum fourni par le module lorsque ses bornes sont en court-circuit (tension nulle), Proportionnel à l'irradiation et faiblement influencé par la température.

Propriétés : Directement proportionnel à l'irradiation, faiblement dépendant de la température.

Intérêt : Paramètre clé pour la conception des systèmes de protection et de sécurité.

- **La tension en circuit ouvert (V_{oc})** : Tension maximale aux bornes du module lorsque le circuit est ouvert (courant nul).

Comportement : Diminue avec l'augmentation de la température, légèrement influencée par l'irradiation

Utilité : Essentielle pour le choix des onduleurs et pour éviter les surtensions.

- **Point de Puissance Maximale (MPP)** : Point de fonctionnement où le produit courant \times tension est maximal.

Rôle : Exploité via des régulateurs MPPT pour maximiser la production d'énergie.

Impact : Un mauvais suivi entraîne des pertes considérables en production.

- **Conditions Standard de Test (STC) :**

Normes : Irradiation : 1000 W/m², Température de cellule : 25°C, Spectre AM 1.5.

Intérêt : Les STC permettent de comparer objectivement les modules de différents fabricants

- **Rendement du Module (η) :** Rapport entre la puissance électrique produite et la puissance solaire incidente sur la surface du module.

Formule : $\eta = (P \text{ max}) / (\text{Surface} \times \text{Irradiation})$

Facteurs influents : Température des cellules, qualité des matériaux, pertes par réflexion et ombrage

II. 3 Deuxième partie : Modélisation de TEG

II. 3. 1 Définition de générateur thermoélectrique

Les TEG (générateurs thermoélectriques) sont des dispositifs à semi-conducteurs qui utilisent l'effet Seebeck dans des thermopiles pour convertir le gradient de température, induit par la chaleur résiduelle, en énergie électrique. En pratique, une structure TEG se compose d'un certain nombre de thermocouples. Les thermo-éléments, constitués de semi-conducteurs de type p et n, sont intercalés entre deux plaques céramiques, qui doivent être maintenues à deux températures différentes afin de générer de l'énergie électrique. Un gradient de température induit entre les plaques céramiques supérieure et inférieure crée une tension aux bornes du TEG grâce à l'effet Seebeck.



Figure II.4 : générateur thermoélectrique

II. 3. 2 Modélisation électrique et mathématique d'un TEG

II. 3. 2. 1 Modèle électrique

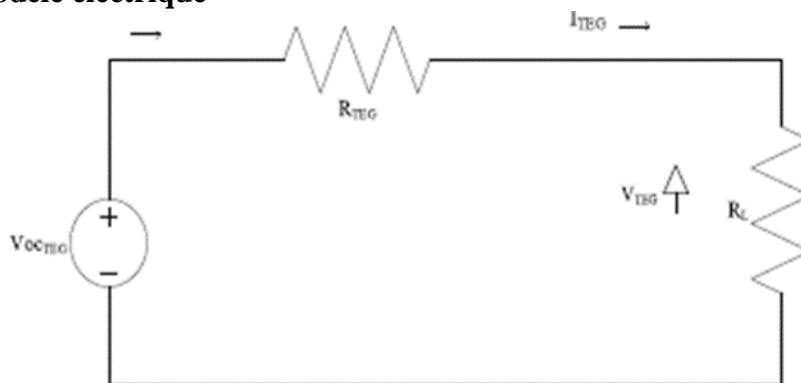


Figure II.5 : Modèle électrique d'un TEG

Le schéma (Figure II.5) présenté est un modèle de circuit équivalent simplifié pour un Générateur Thermoélectrique (TEG), également connu sous le nom de module Peltier utilisé en mode générateur. Ce modèle est fondamental pour analyser et prédire les performances électriques d'un TEG, qui convertit directement l'énergie thermique (différence de température) en énergie électrique via l'effet Seebeck. Il est particulièrement utile pour comprendre comment le TEG interagit avec une charge externe.

Le modèle équivalent du TEG se compose de deux éléments principaux qui représentent ses caractéristiques intrinsèques, auxquels s'ajoute la charge externe : Source de Tension Idéale ($V_{OC}(TEG)$), Résistance Interne (R_{TEG}), Charge Connectée (R_L)

II. 3. 2. 2 Modèle mathématique

- La tension du TEG :

$$V_{teg} = V_{oc} - R_{teg} \cdot I_{teg} \quad (II-9)$$

- La température applique sur un TEG :

$$T_{teg} = T_H - T_C \quad (II-10)$$

- La tension de circuit ouvert V_{oc} :

$$V_{oc} = S \cdot \Delta T = \alpha \cdot K_{th}(T_H - T_C) \quad (II-11)$$

- ou S est :

$$S = \alpha \cdot K_{th} \quad (II-12)$$

- Le courant :

$$I_{teg} = (V_{oc} - V_{teg}) / R_{teg} \quad (II-13)$$

- La puissance :

$$P_{teg} = I_{teg} \cdot V_{teg} \quad (II-14)$$

II. 3. 3 Effets thermoélectriques

Les effets thermoélectriques décrivent l'interaction entre la chaleur et l'électricité dans les solides. Sur la base de ces effets, des dispositifs thermoélectriques ont été développés et utilisés pour la production d'énergie ou la réfrigération. Les effets thermoélectriques qui ont lieu dans un TEM comprennent : l'effet Peltier et l'effet Thomson et ce que nous utilisons dans cette étude est : l'effet Seebeck. [20]

II. 3. 3. 1 Effet Seebeck

L'effet Seebeck est un phénomène thermoélectrique découvert par Thomas Johann Seebeck en 1821. Cet effet se produit lorsqu'un circuit est constitué de deux conducteurs ou semi-conducteurs différents reliés à leurs extrémités et soumis à une différence de température entre ces jonctions. Une force électromotrice ($f_e m$) est alors générée, créant une tension électrique

mesurable. Cette tension est proportionnelle à la différence de température appliquée. [21], $\Delta T = T_H - T_C$ ou T_H et T_C désignent les températures des cotes chaud et froid, respectivement

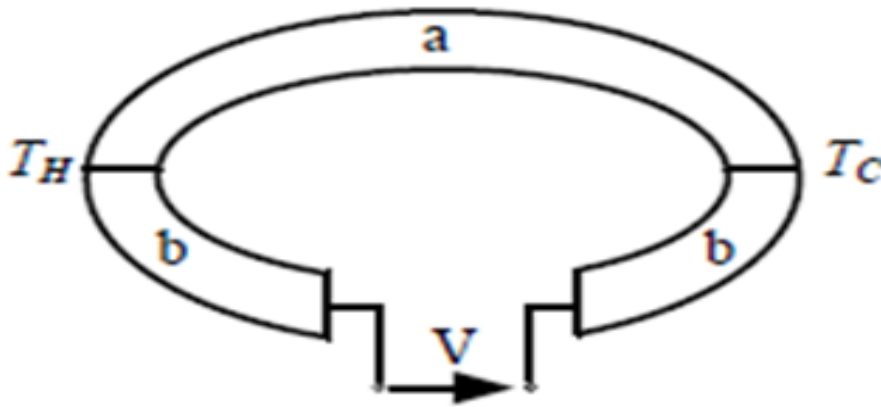


Figure II.6 : Schéma principe de l'effet Seebeck

La tension en circuit ouvert générée est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \alpha \cdot \Delta T \quad (II-15)$$

α : Coefficient de Seebeck

II. 3. 4 Types de générateurs thermoélectrique

Les générateurs thermoélectriques constituent le cœur des systèmes de récupération de l'énergie thermique. Il existe aujourd'hui plusieurs types de générateurs thermoélectriques, qui se distinguent principalement par leurs méthodes de fabrication, bien que les matériaux thermoélectriques utilisés soient généralement similaires.

II. 3. 4. 1 Générateurs thermoélectriques massifs

Les premiers générateurs développés sont appelés générateurs thermoélectriques massifs. Ces dispositifs représentent les modèles traditionnels et sont largement utilisés dans les applications classiques. Un exemple de générateur thermoélectrique massif est proposé par 'Eureka Messtechnik'. Ces générateurs se caractérisent par une structure robuste et une capacité à intégrer quelques dizaines de paires de jonctions p-n par centimètre carré.[22]

II. 3. 4. 2 Générateurs thermoélectriques en couches minces

Avec l'évolution des techniques de micro fabrication, il est désormais possible de concevoir des générateurs thermoélectriques en couches minces aux dimensions nettement inférieures à celles des générateurs massifs. Cette technologie est particulièrement adaptée aux applications

compactes et permet d'intégrer un nombre élevé de paires de jonctions p-n sur des surfaces réduites. Par exemple, un générateur massif peut contenir quelques dizaines de paires de jonctions p-n par centimètre carré, tandis qu'un générateur en couche mince peut en intégrer plusieurs centaines par millimètre carré.

Cette configuration permet de générer des tensions exploitables même à partir de faibles gradients de température. Cependant, l'augmentation du nombre de jonctions entraîne une élévation de la résistance électrique interne, ce qui limite la puissance électrique produite.[23]

II. 3. 4. 3 Générateurs thermoélectriques sur substrat souple

Une autre catégorie concerne les générateurs thermoélectriques flexibles fabriqués sur des substrats souples. Par exemple, l'entreprise Green TEG développe actuellement des générateurs thermoélectriques flexibles destinés à être intégrés dans des systèmes tels que des vannes de chauffage intelligentes et autonomes en énergie. Ces générateurs se déclinent en plusieurs tailles et formes, offrant une grande adaptabilité à diverses configurations. [24]

II. 4 Troisième Partie : La simulation de système hybride PV/TEG

II. 4. 1 Définition de MATLAB Simulink

MATLAB Simulink est un environnement de simulation graphique intégré à MATLAB, permettant de modéliser, simuler et analyser des systèmes dynamiques multi-domaines. Il se distingue par son interface basée sur des blocs fonctionnels interconnectés, facilitant la conception visuelle et l'étude des systèmes complexes, notamment dans les domaines de l'électronique, de la mécanique, de l'automatique et de l'énergie. [25]

II. 4. 2 Description du système à simuler

Nous avons choisi de simuler un panneau solaire constitué d'un module monocristallin composé de 36 cellules photovoltaïques en silicium multi cristallin, électriquement connectées entre elles. Ce choix s'appuie sur les caractéristiques techniques et le rendement supérieur des cellules monocristallines, qui sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium, assurant une homogénéité et une efficacité optimales. La Figure II.7 illustre le modèle électrique du panneau photovoltaïque étudié, permettant d'analyser son comportement sous différentes conditions d'irradiation et de température. Cette modélisation est essentielle pour évaluer les performances globales du module et optimiser son intégration dans des systèmes énergétiques.

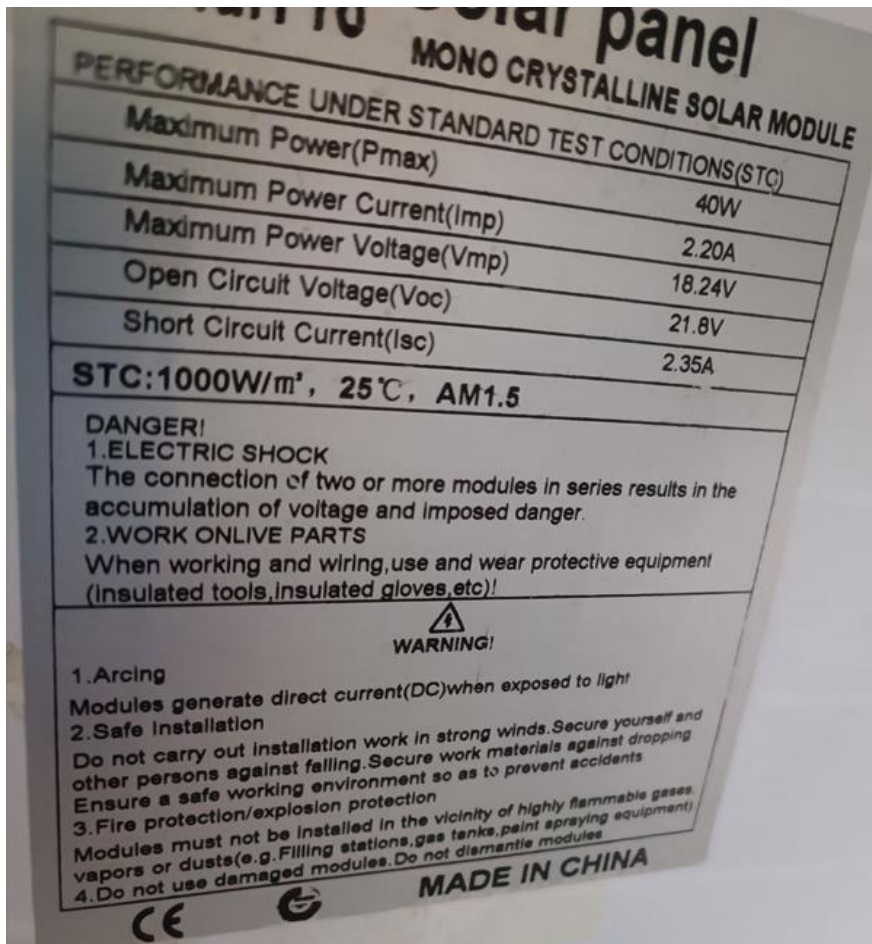


Figure II.7 : plaque signalétique d'un panneau

Puissance maximale, P max	40 W
Courant de P max, I mp	2,20 A
Tension de P max, V mp	18,24 V
Tension de circuit-ouvert, V co	21,8 V

Courant de court-circuit, Isc	2,35 A
Irradiation(G)	1000 W/m
Température	25°C
Nombre de cellules	36

Table 3 : Spécifications du module PV Solare

II. 4. 3 Modèle Simulation du système photovoltaïque

La simulation constitue un instrument essentiel pour l'analyse des performances théoriques d'un système. Cette section nous donnera l'occasion de réaliser des simulations d'un module photovoltaïque, Cela nous permet d'ajuster aisément les paramètres des systèmes comme les conditions météorologiques. La puissance maximale atteinte par notre modèle est de 40 watts (figure), donc les résultats restent les mêmes

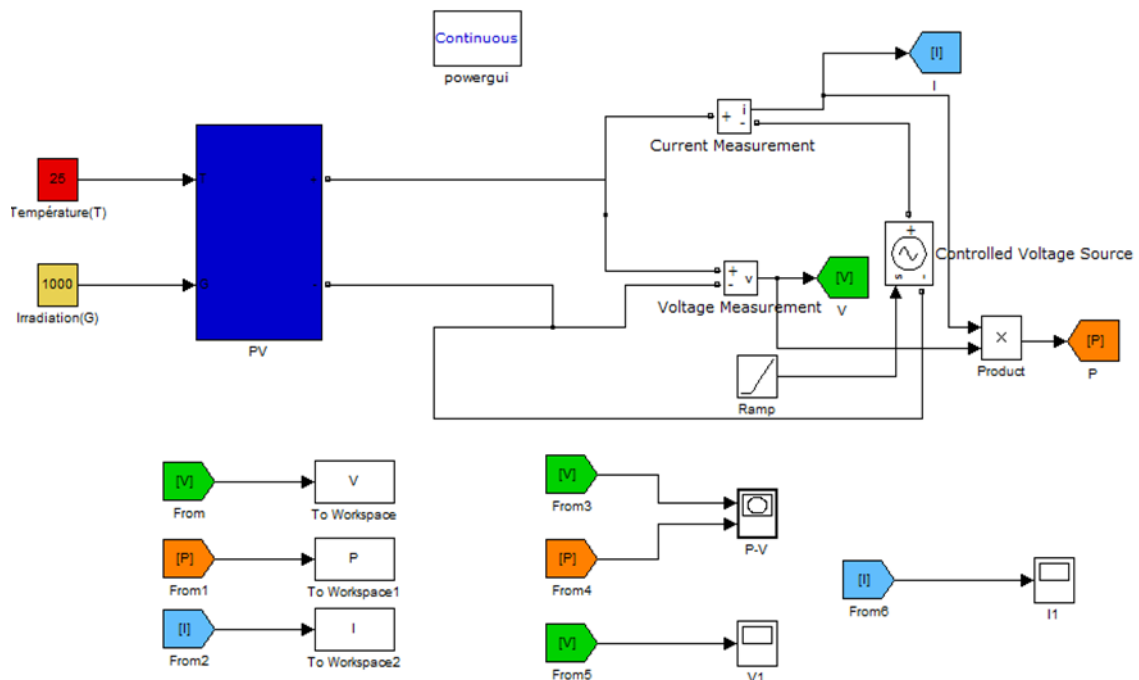


Figure II.8 : Schéma simulé d'un panneau étudié

Pour réaliser l'analyse du fonctionnement du panneau PV sélectionné, en s'appuyant sur le modèle examiné, une série de simulations ainsi que les résultats obtenus sont illustrés dans les figures suivantes, à savoir :

- La première courbe (Figure II.8) montre la caractéristique Courant-Tension (P-V) du panneau PV sous une irradiation $G = 1000\text{W/m}^2$ et une température $T = 25^\circ\text{C}$.
- La seconde courbe montre la relation Puissance-Tension (I-V) du panneau PV pour une irradiation $G = 1000\text{W/m}^2$ et une température $T = 25^\circ\text{C}$

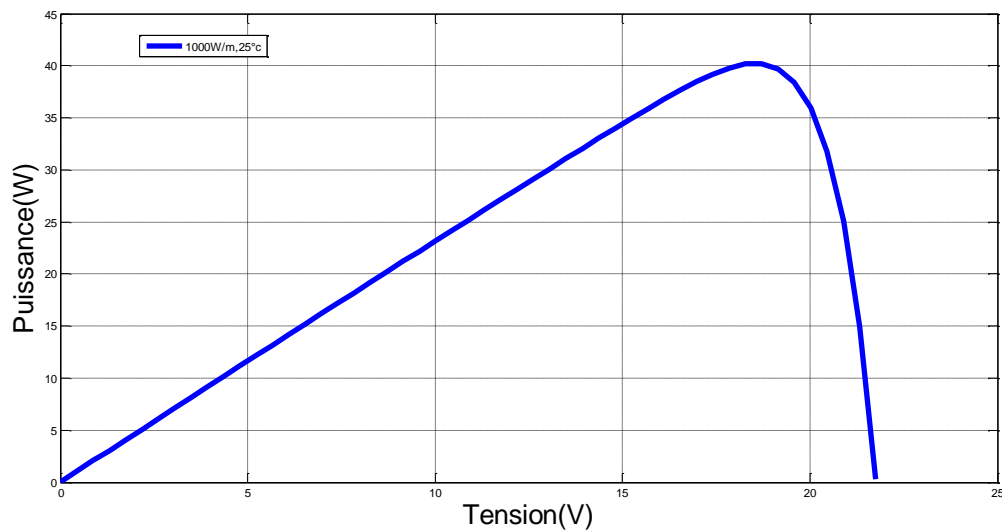


Figure II.9 : Caractéristiques électrique P-V d'un panneau photovoltaïque.

La (Figure II.9) représente les caractéristique Puissance-Tension (P-V) d'un panneau photovoltaïque.

La courbe montre l'évolution de la puissance de sortie du système en fonction de la tension à ses bornes.

Au début, la puissance augmente de manière quasi linéaire avec la tension.

La courbe atteint un point maximal, appelé le Point de Puissance Maximale (MPP - Maximum Power Point). À ce point, le système délivre sa puissance la plus élevée.

Au-delà du MPP, la puissance chute rapidement à mesure que la tension continue d'augmenter, indiquant que le système ne fonctionne plus de manière optimale.

Point de Puissance Maximale (MPP) :

Le point mis en évidence sur la figure correspond au MPP. Ses coordonnées sont :

* Tension au MPP (V mpp) : $X = 18,29$ V

* Puissance Maximale (P mpp) : $Y = 40,15$ W

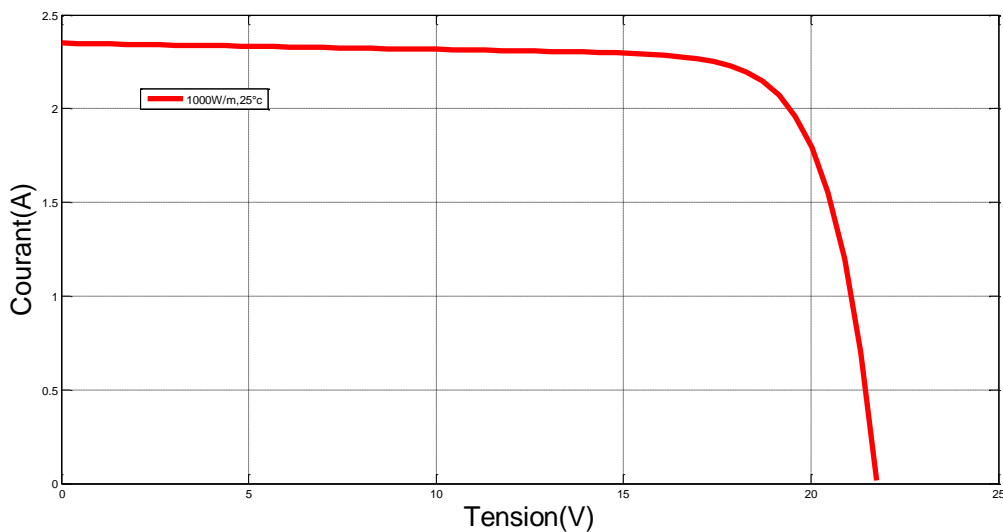


Figure II.10: Caractéristiques électrique I-V du panneau photovoltaïque.

La (Figure II.10) représente les caractéristique Courant-Tension (I-V) d'un panneau photovoltaïque.

L'énergie électrique fournie par une cellule photovoltaïque est effectivement le produit de la tension (V) et du courant (I) qu'elle génère. Ces deux grandeurs dépendent à la fois des caractéristiques intrinsèques de la cellule et de la charge électrique connectée à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. [28]

II. 4. 3. 1 L'influence des paramètres de fabrication

II. 4. 3. 1. 1 Résistance série (R_s)

La résistance série (R_s) correspond à la résistance interne de la cellule photovoltaïque. Elle est principalement influencée par la résistance du matériau semi-conducteur utilisé, la résistance de contact au niveau des grilles collectrices, ainsi que la résistivité propre à ces grilles.

Ce modèle intègre la résistivité du matériau ainsi que les pertes ohmiques liées aux contacts, offrant ainsi une représentation plus réaliste du comportement électrique de la cellule comparée au modèle idéal. Ces pertes sont modélisées par une résistance série R_s [28]

II. 4. 3. 1. 2 Résistance shunt (R_{sh})

La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [28]

II. 4. 3. 2 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

La (Figure II.11) illustrent un exemple des courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un panneau photovoltaïque soumis à différents niveaux d'éclairement.

- Sur la courbe I-V, il est observé que l'intensité du courant de court-circuit (I_{cc}) est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement incident. En revanche, la tension aux bornes du panneau ne varie pas de manière proportionnelle et demeure quasiment constante, même en conditions de faible éclairement.
- Sur la courbe P-V, il apparaît que la puissance maximale délivrée par la cellule augmente en fonction de l'intensité de l'éclairement.

Cette analyse met en évidence l'influence prépondérante de l'éclairement sur le courant généré et, par conséquent, sur la puissance maximale exploitable du panneau photovoltaïque.

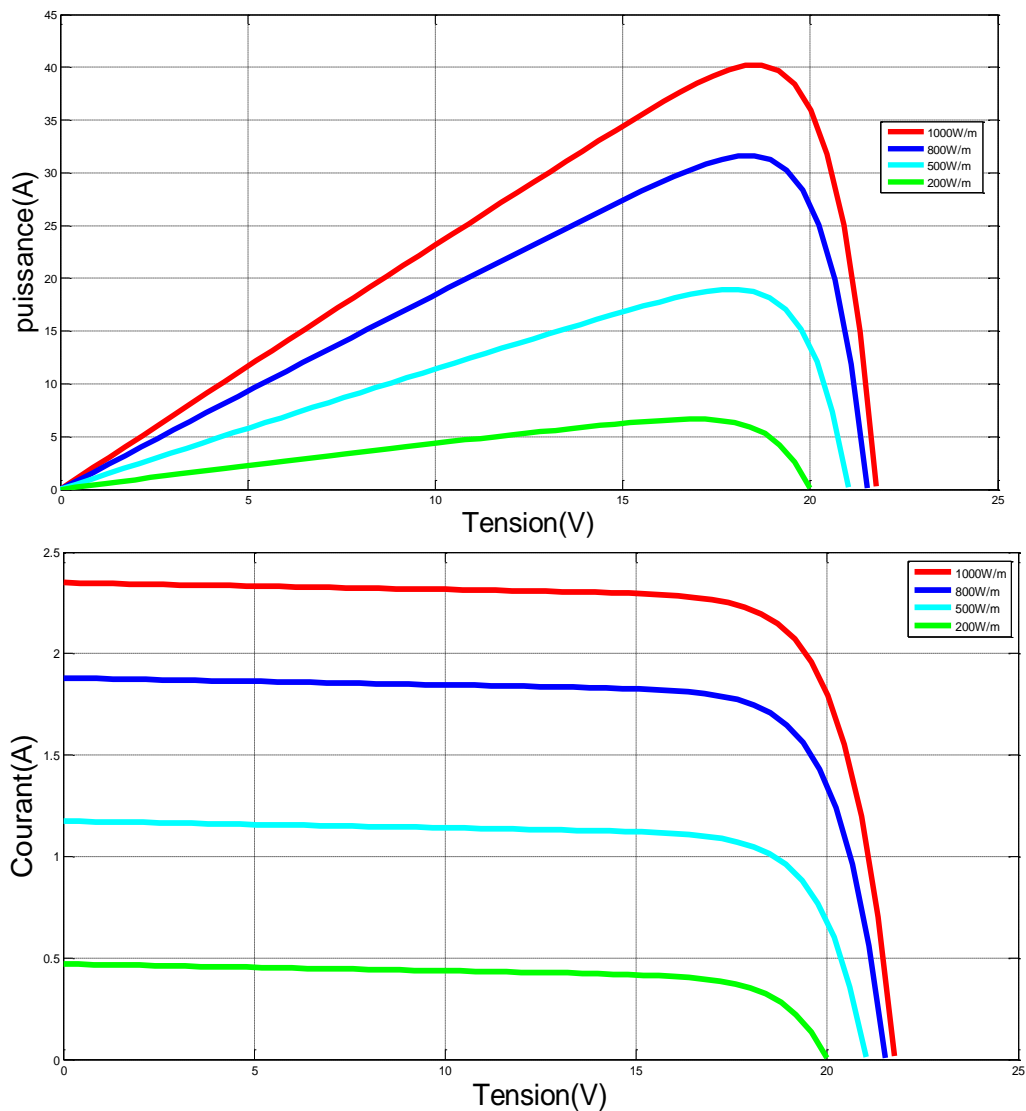


Figure II.11 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V.

II. 4. 3. 3 Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

La Figure II.12 illustrent un exemple des courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un panneau photovoltaïque soumis à différents niveaux de température

- Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres.
- La tension à vide et la puissance maximum diminuent très faiblement lorsque la température augmente.

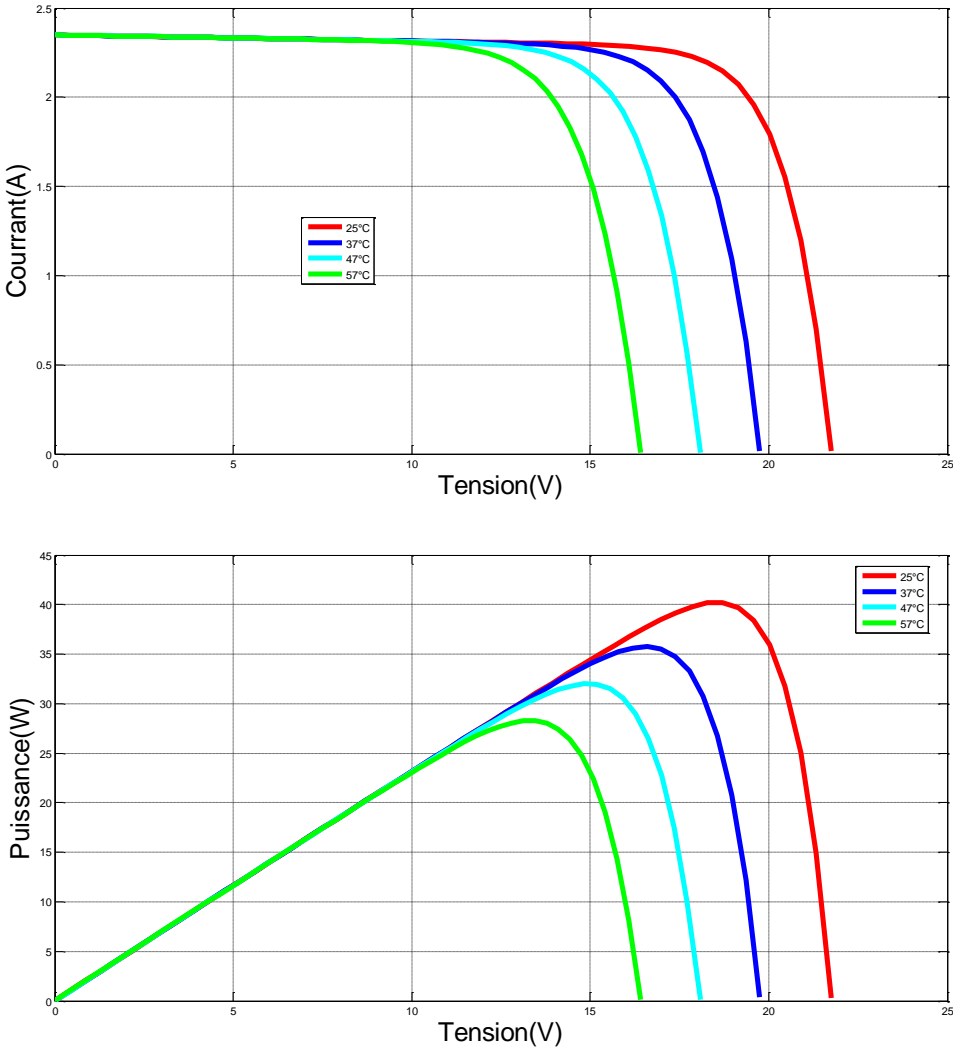


Figure II.12 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

II. 4. 4 Modèle Simulation de TEG

Le schéma détaille d'un générateur thermoélectrique en l'environnement Matlab/Simulink est représenté par la Figure II.13, avec $T_H=28$, $T_C=0$, $R=2.9$, $N_{th}=127$ et $\alpha=0.00053$

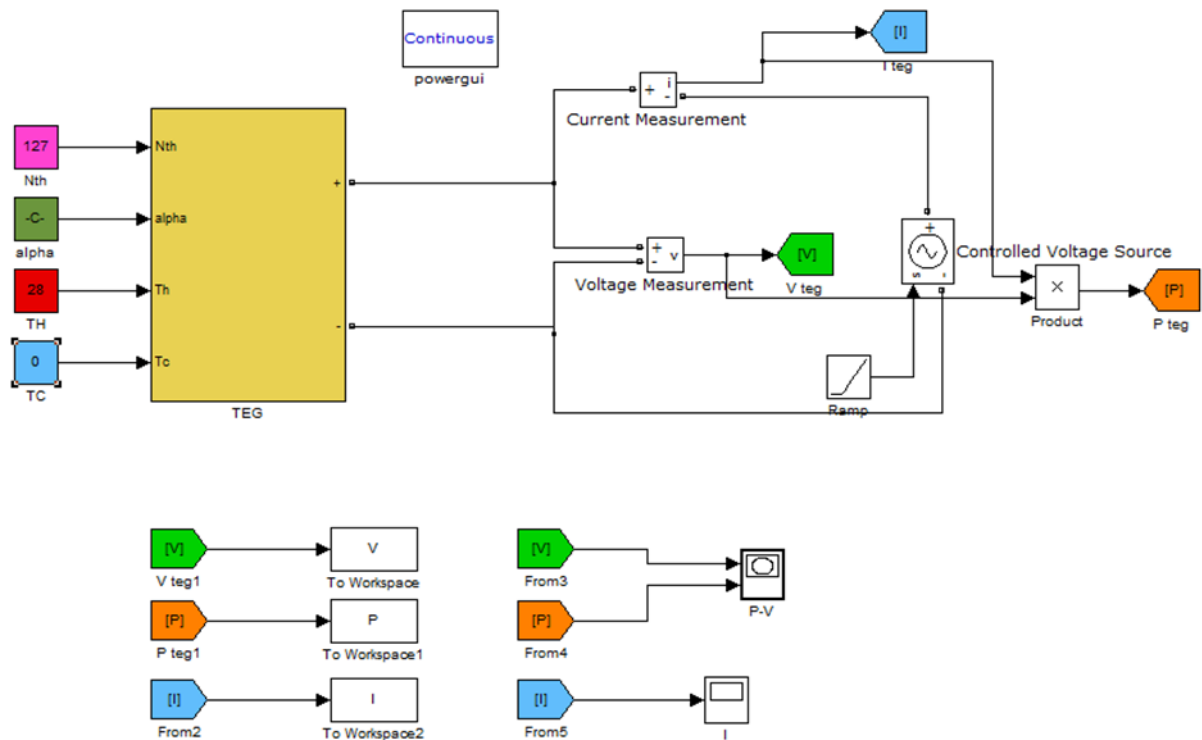


Figure II.13 : schéma de modélisation d'un générateur thermoélectrique (1TEG) réalisé sous l'environnement Simulink/Matlab

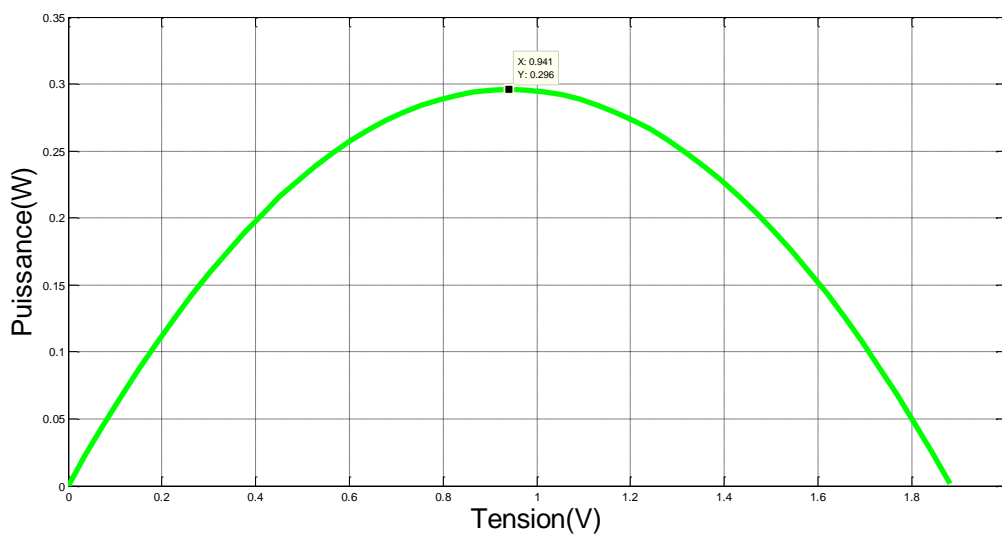


Figure II.14 : Caractéristiques électrique P-V d'un seul TEG

La Figure II.14 représente les Caractéristiques électrique P-V d'un seul TEG, Ce graphique illustre la relation entre la puissance électrique générée (en Watts) et la tension de sortie (en Volts) du TEG. La courbe parabolique est typique des sources d'énergie, culminant au point de puissance maximale (MPP). Le MPP est identifié à 0.941 V pour une puissance de 0.298 W, indiquant la tension optimale pour extraire la puissance maximale du dispositif.

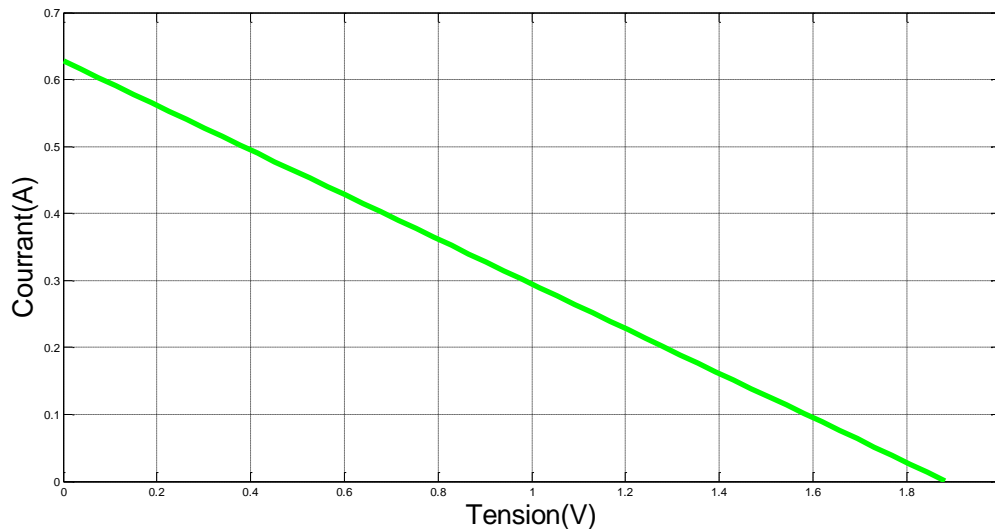


Figure II.15 : Caractéristiques électrique I-V du TEG

La Figure II.15 exprime les Caractéristiques électrique I-V du TEG, Ce graphique représente la dépendance linéaire du courant de sortie (en Ampères) par rapport à la tension aux bornes (en Volts) du TEG. La décroissance linéaire est caractéristique d'une source de tension avec une résistance interne. On observe un courant de court-circuit (tension nulle) d'environ 0.62 A et une tension de circuit ouvert (courant nul) d'environ 1.85 V. La pente de cette droite est inversement proportionnelle à la résistance interne du TEG

Figure II.16 illustre schéma simulations réalisées sur un ensemble de dix générateurs thermoélectrique en série

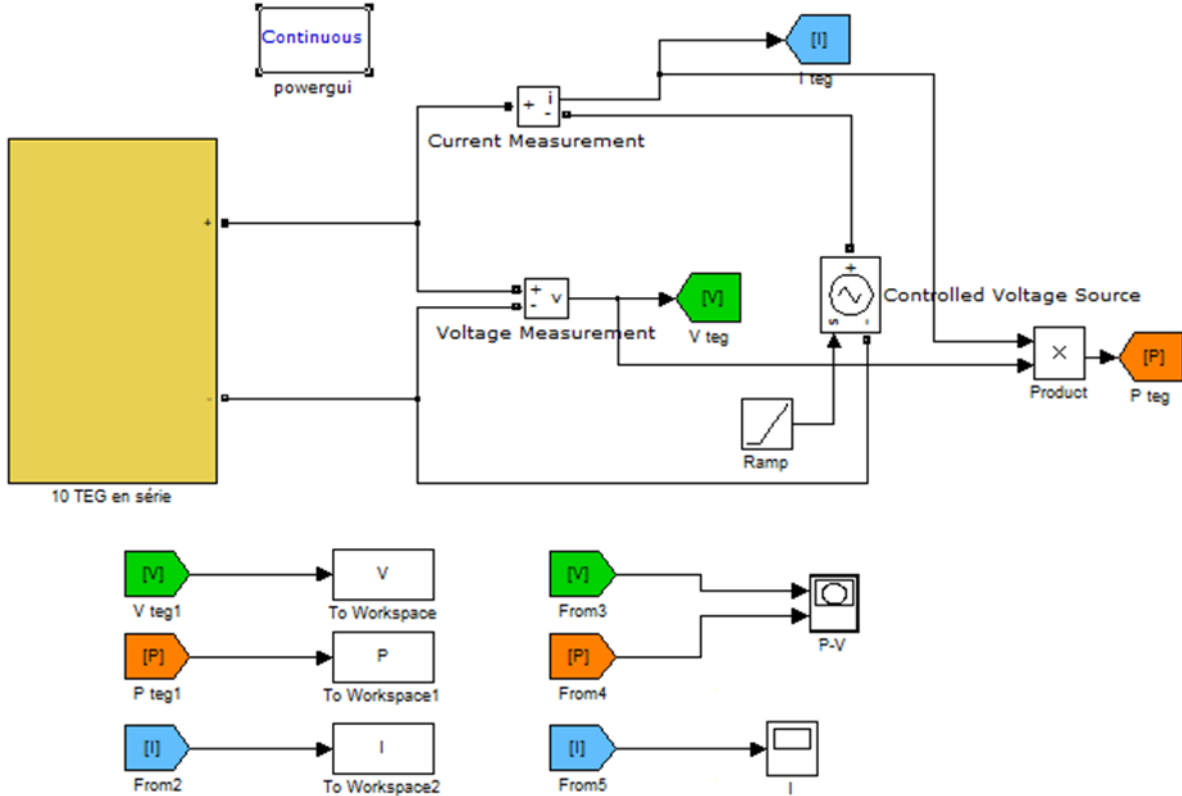


Figure II.16 : schéma simulations réalisées sur un ensemble de dix générateurs thermoélectrique en série

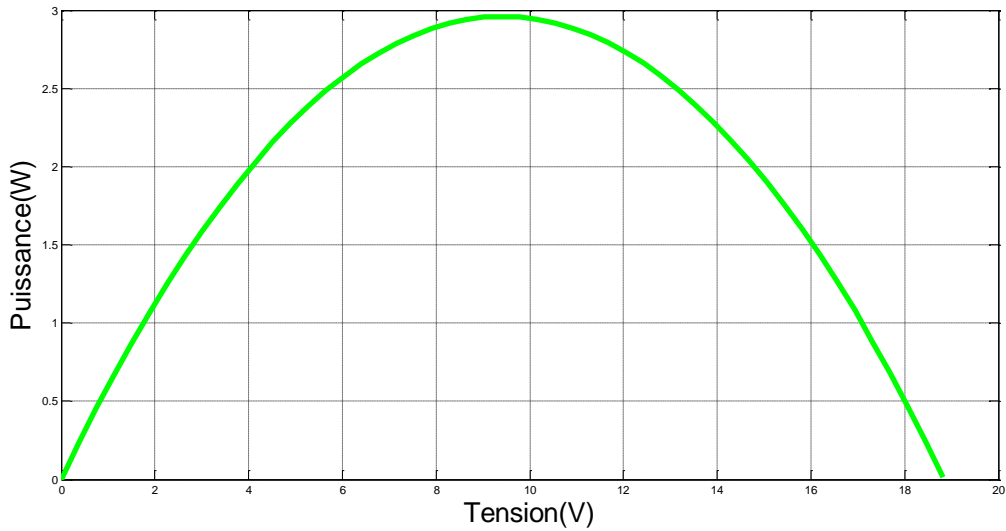


Figure II.17 : Caractéristiques électrique P-V d'un ensemble de dix TEG

La Figure II.17 exprime les Caractéristiques électrique P-V d'un ensemble de dix TEG, Ce graphique représente la puissance électrique totale (en Watts) générée par les 10 TEG en fonction de la tension agrégée (en Volts). La forme parabolique est cohérente avec le comportement d'un générateur. Le Point de Puissance Maximale (MPP) est observé à une tension d'environ 9.8 V pour une puissance maximale d'environ 2.95 W. Comparativement à un seul TEG, la tension et la puissance au MPP sont approximativement multipliées par dix, ce qui confirme une connexion en série des modules.

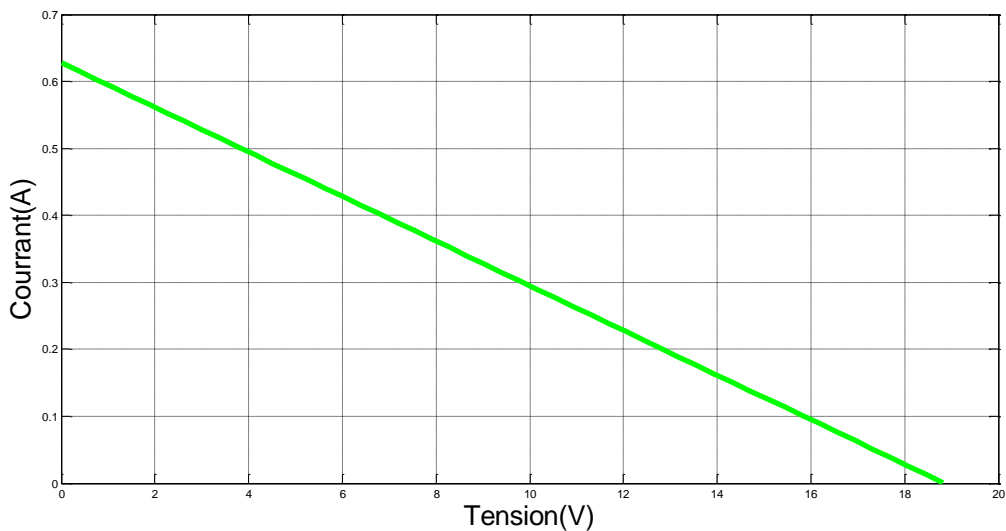


Figure II.18 : Caractéristiques électrique I-V d'un ensemble de dix TEG

La Figure II.18 exprime les Caractéristiques électrique I-V d'un ensemble de dix TEG, Ce graphique montre la relation linéaire et décroissante entre le courant de sortie (en Ampères) et la tension agrégée (en Volts) pour l'ensemble des 10 TEG. Le courant de court-circuit (à tension nulle) est d'environ 0.62 A, tandis que la tension de circuit ouvert (à courant nul) est d'environ 18.5 V. La tension de circuit ouvert est environ dix fois supérieure à celle d'un seul TEG, tandis que le courant de court-circuit reste similaire, ce qui est une signature claire d'une connexion en série où les tensions s'additionnent et le courant est limité par le module le plus faible

La figure ci-dessous représente le schéma global d'un champ de 20 TEG dans chaque module il y a 10 TEG connecté en série et les deux modules sont connectés en parallèle

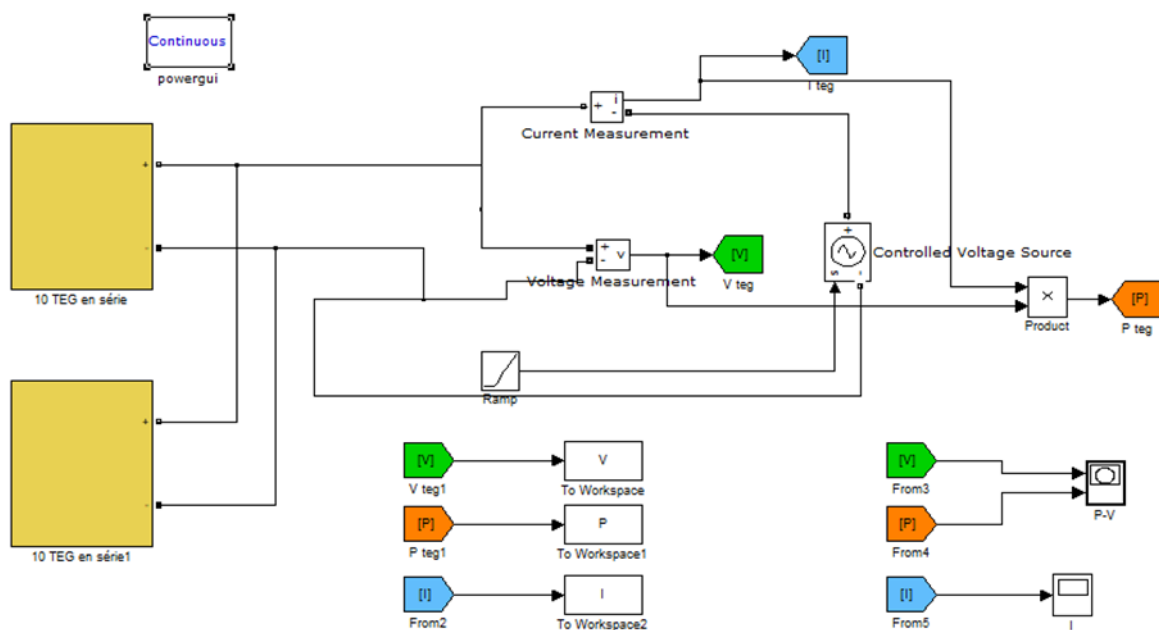


Figure II.19 : Le schéma global d'un champ de 20 TEG série /parallèle

Les résultats de la simulation :

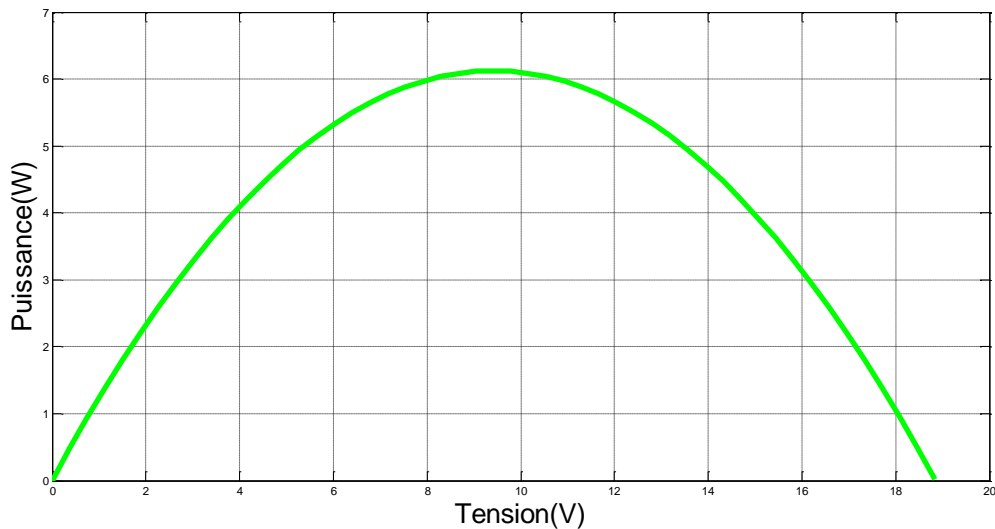


Figure II.20 : Caractéristique p-v d'un champ de 20 TEG série / parallèle

La Figure II.20 représente les Caractéristique p-v d'un champ de 20 TEG série / parallèle, les résultats montrent que la valeur de puissance a augmenté pour atteindre une valeur d'environ 6 watts (sa valeur a doublé) en raison de l'ajout de 10 TEG en série .et la valeur de tension reste constante

On peut remarquer aussi que la tension optimal V_{mp} est toujours égale à la moitié de la tension de circuit ouvert ainsi le courant maximale a été augment

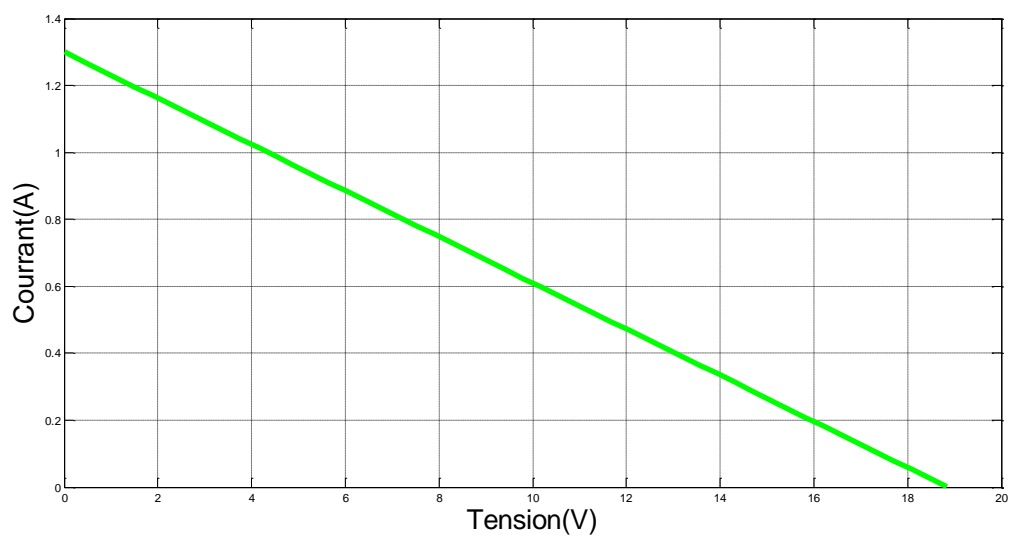


Figure II.21 : Caractéristique I-V d'un champ de 20 TEG série / parallèle

La Figure II.21 représente les Caractéristique I-V d'un champ de 20 TEG série / parallèle, on observe que La valeur du ITEG est égale (1.3 A) cette valeur diminue à mesure que la valeur de la tension augmente

La Figure II.22 ci-dessous représente le schéma global d'un champ de 20 TEG dans chaque module il y a 10 TEG connecté en série et les deux modules sont connectés en série

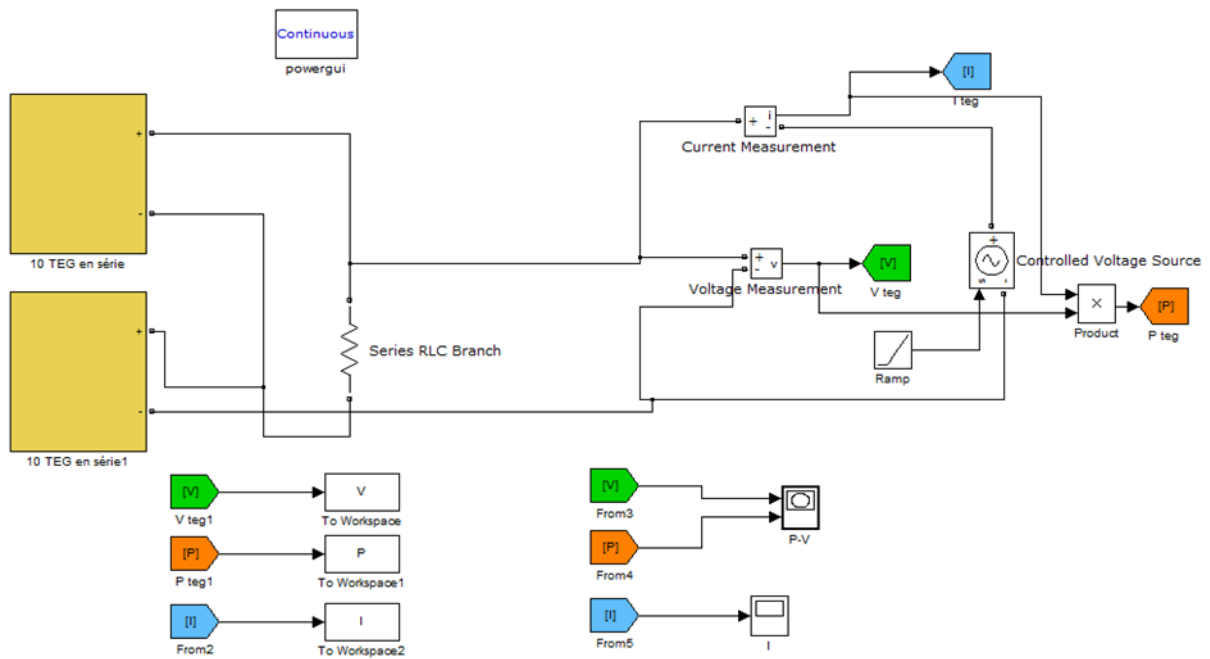


Figure II.22 : Le schéma global d'un champ de 20 TEG série /série

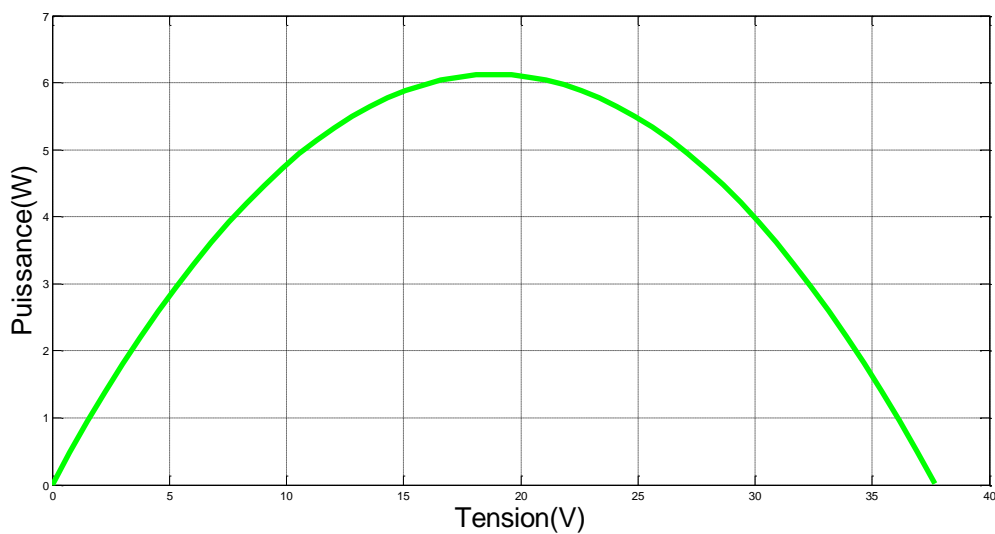


Figure II.23 : Caractéristique p-v d'un champ de 20 TEG série / série

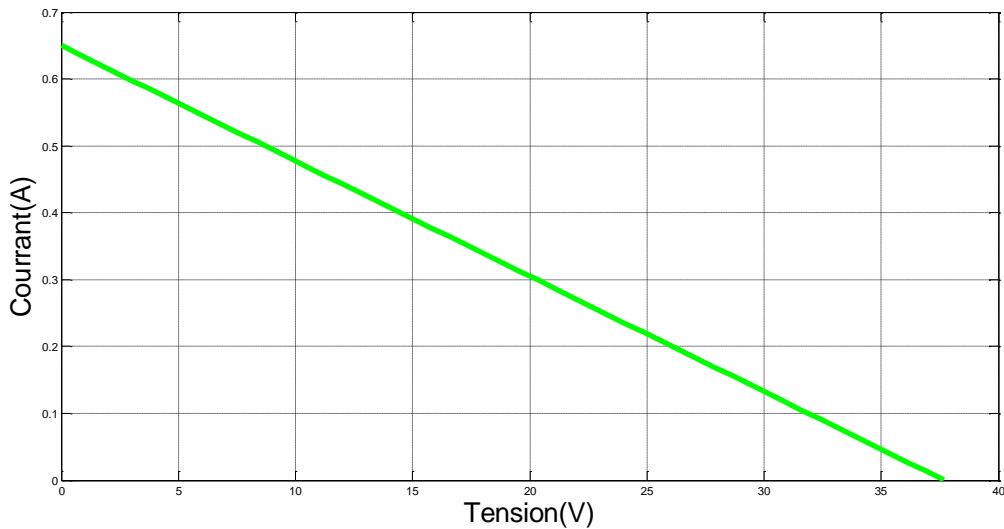


Figure II.24 : Caractéristique I-V d'un champ de 20 TEG série / série

Nous avons établi le graphique ci-joint (Figure II.25). Ce dernier présente les caractéristiques de puissance en fonction de la tension pour un TEG unique, un ensemble de 10 TEG, ainsi que pour des arrangements de 20 TEG connectés en série/parallèle et en série/série. Cette représentation visuelle permet une évaluation comparative rigoureuse de l'impact de la mise en série et en parallèle sur les propriétés électriques des systèmes TEG.

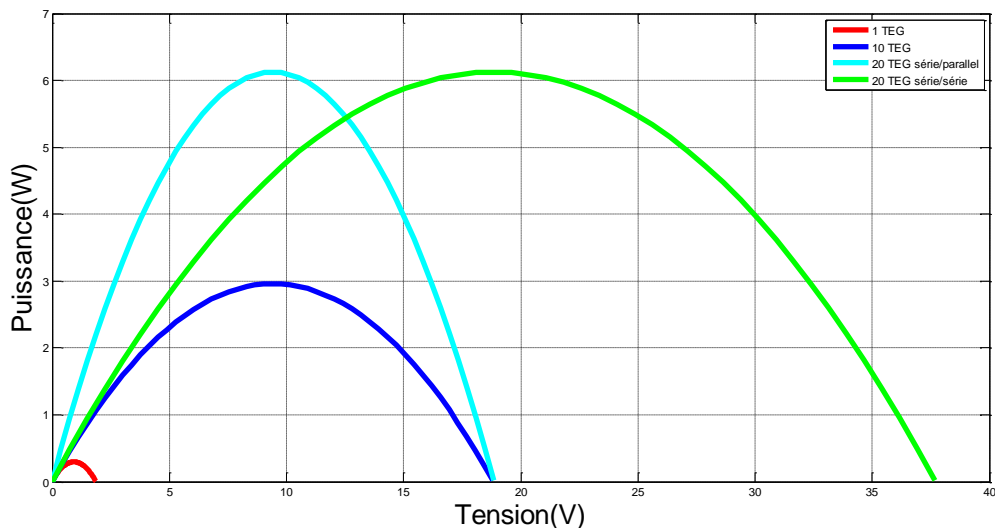


Figure II.25 : Comparaison des caractéristiques des TEG

- La configuration 20 TEG série/parallèle atteint la puissance maximale la plus élevée (6 W) pour une tension d'environ (10 V).
- La configuration 20 TEG série/série offre une puissance élevée mais à une tension beaucoup plus grande (20 V)

II. 5 Conclusion

Ce chapitre a établi une base solide pour la modélisation et la simulation d'un système hybride PV/TEG. Il a présenté, d'une part, une modélisation détaillée des cellules photovoltaïques tenant compte des paramètres électriques et environnementaux, et d'autre part, une représentation rigoureuse des générateurs thermoélectriques basée sur l'effet Seebeck. L'intégration de ces deux technologies dans un environnement de simulation sous MATLAB/Simulink a permis de poser les fondations nécessaires à l'analyse de leur performance conjointe. Ces travaux constituent une étape clé pour l'optimisation de systèmes énergétiques hybrides exploitant à la fois l'énergie solaire et la chaleur résiduelle.

Chapitre III Amélioration de système hybride PV/T/TEG

III. 1 Introduction

On sait que les systèmes hybrides PV/TEG permettent de bien utiliser l'énergie solaire en convertissant le rayonnement lumineux en électricité par des cellules, l'énergie thermique résultante est récupérée par les générateurs thermoélectrique(TEG), Cela vient en assemblant, tout à la fois, les deux éléments à savoir le panneau photovoltaïque, les générateurs dans un seul système

Dans ce chapitre, nous aborderons l'amélioration de ce système hybride afin de tirer le meilleur parti de l'énergie solaire, dont une grande partie est perdue sous forme de chaleur .dans ce chapitre, nous étudierons les composants du système et la conception technique qui combine le panneau solaire et le générateur et comment connecter les générateurs thermoélectrique totaux, puis transférerons cette conception à MATLAB Simulink et discuterons des résultats obtenus

III. 2 Le système hybride PV/TEG

Ce system concerne la conception et la réalisation d'un système hybride à haute efficacité énergétique qui englobe tout à la fois la production de l'énergie électrique par le panneau photovoltaïque et la production d'une énergie électrique supplémentaire par les générateurs thermoélectrique, les générateurs thermoélectriques seront incorporés dans le système hybride qui est collés à la face arrière du panneau solaire (20 TEG dans notre cas)

Le système hybride (PV / T / TEG) à haute efficacité énergétique représenté à la (Figure III.1) comprend : le boîtier 1, le panneau solaire 2, la pâte thermique 3, l'absorbeur 4, les TEG (20) 5

Serpenta 6, entrée fluide chaud 10, sortie fluide chaud 11, absorbeur8

Le serpentin dans ce système hybride énergétique joue un rôle clé dans la récupération et le transfert de la chaleur générée par le panneau photovoltaïque. Concrètement, il s'agit d'un échangeur thermique en aluminium, souvent constitué d'un tube enroulé en spirale (d'où le terme "serpentin"), qui est placé à l'arrière du panneau photovoltaïque. Ce serpentin contient un fluide caloporteur (souvent de l'eau) qui circule à l'intérieur

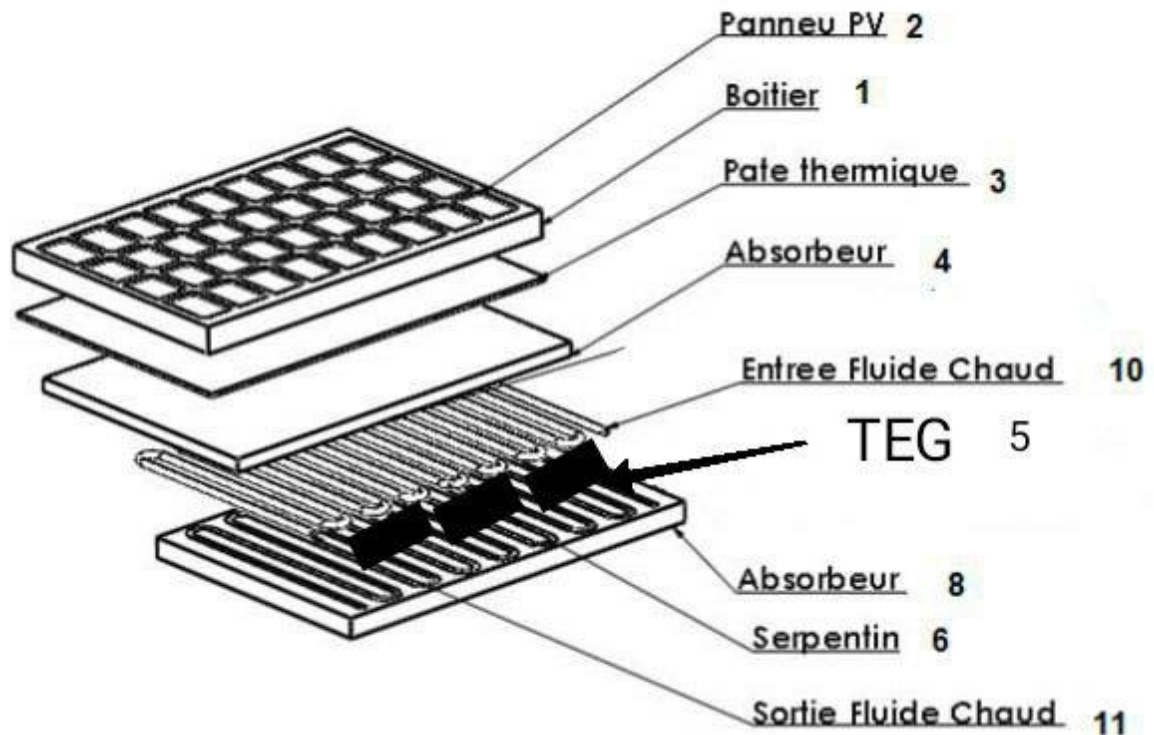


Figure III.1 : Dessin approximatif du système hybride PV/T/TEG

III. 3 La simulation de système hybride PV-TEG

III. 3. 1 Série/Parallèle

Le schéma (Figure III.2) représente un générateur PV associé avec un générateur thermoélectrique (20 TEG série/parallèle)

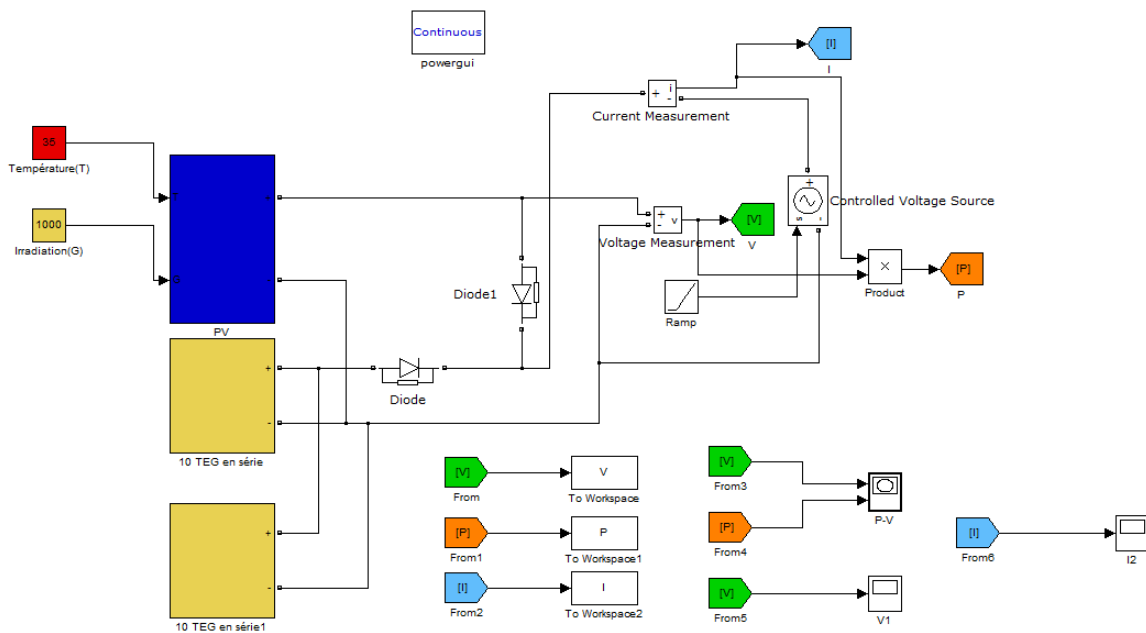


Figure III.2 : Schéma d'un GPV associé avec un champ des TEG (série/parallèle)

III. 3. 1. 1 Les résultats de la simulation

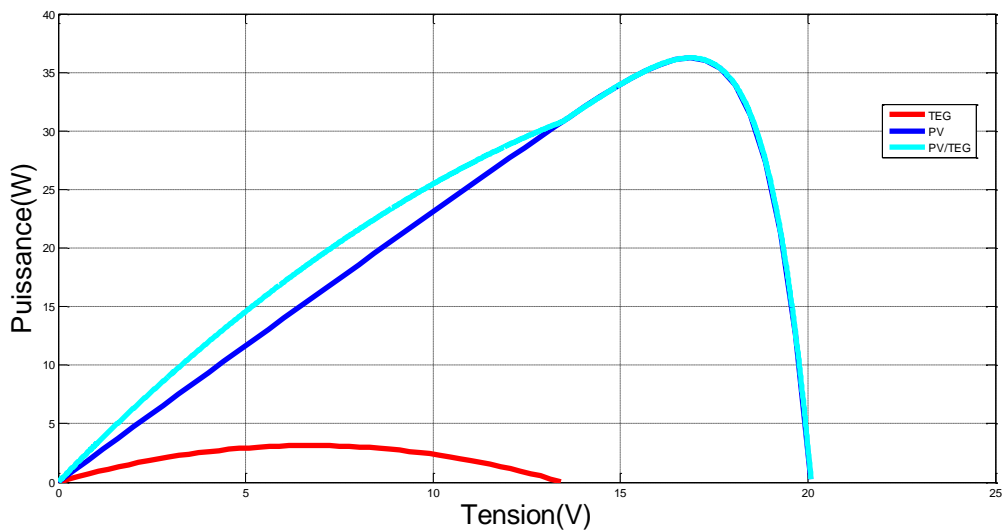


Figure III.3 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle)

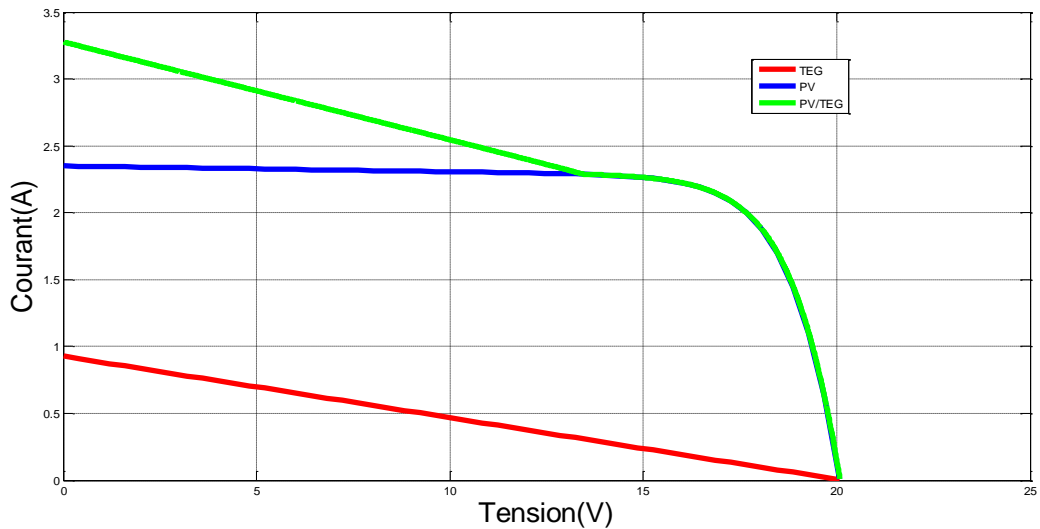


Figure III.4 : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle)

On remarque que l'augmentation de puissance indique que la puissance PV sommé avec la puissance TEG donc le générateur thermoélectrique ont un bon fonctionnement,

III. 3. 2 Série/Sérié

Le schéma représente un générateur PV associé avec un générateur thermoélectrique (20 TEG série/série)

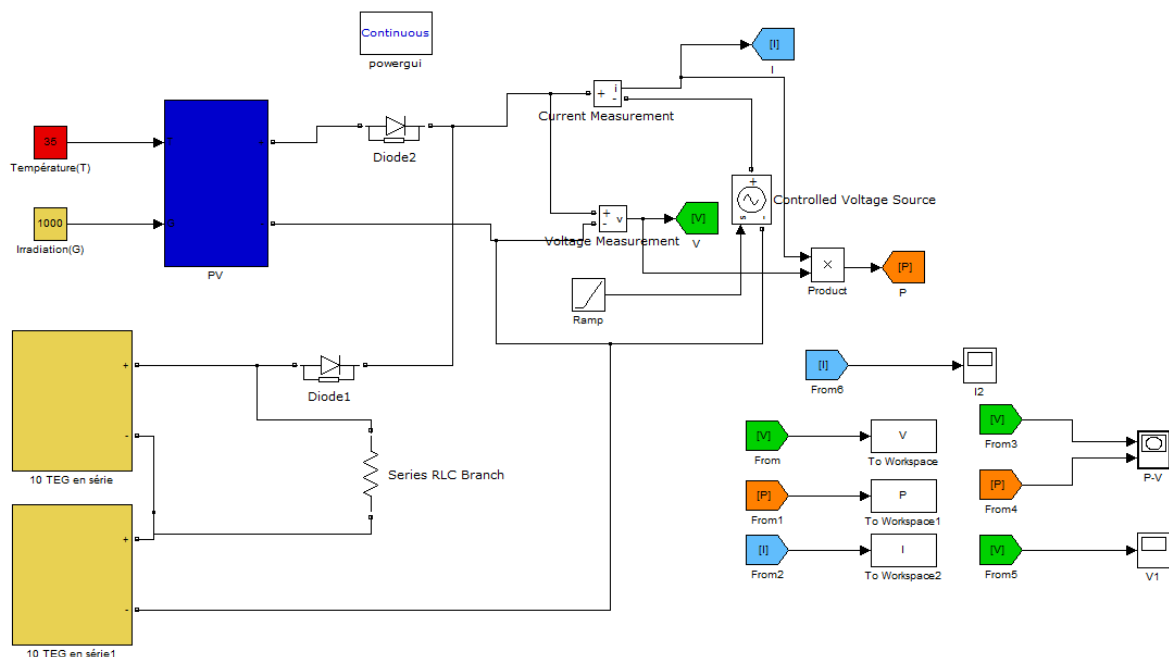


Figure III.5 : Schéma d'un GPV associé avec un champ des TEG (série/série)

III. 3. 2. 1 Les résultats de simulation

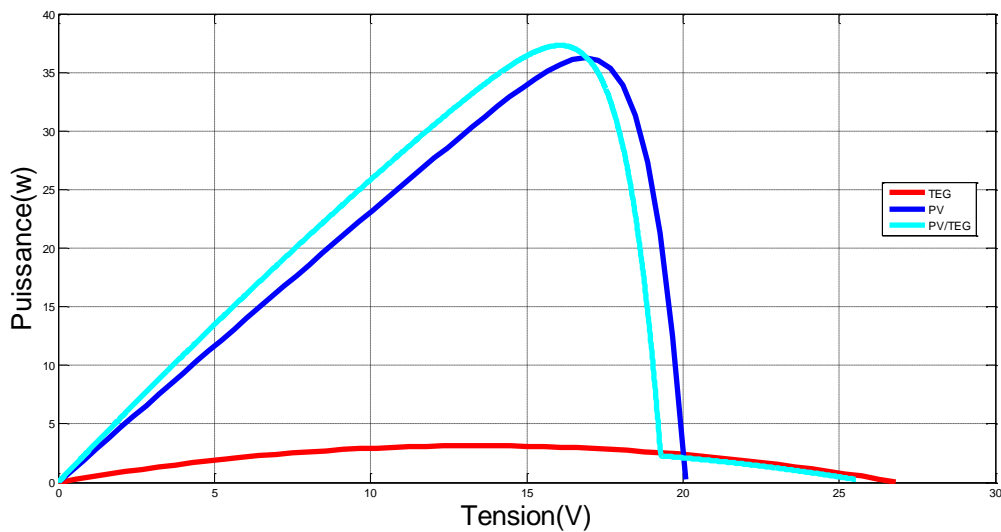


Figure III.6 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/série)

III. 4 Caractéristiques réels d'un panneau photovoltaïque

Afin de déterminer les performances réelles du module photovoltaïque dans des conditions climatiques naturelles, cette expérience a été effectuée en plein soleil. L'objectif principal de cette phase est d'identifier les caractéristiques électriques du panneau, telles que la tension à vide (VOC), le courant de court-circuit (ISC), la puissance maximale (P max) ainsi que le rendement global.

Pour cela, nous avons mis en place un banc de test simple mais fonctionnel. Le dispositif expérimental comprend :

- Un voltmètre numérique pour mesurer la tension en continu aux bornes du module.
- Un ampèremètre pour l'intensité du courant généré.
- Une résistance variable (rhéostat) permettant de tracer la courbe puissance-tension (P-V) et d'identifier le point de puissance maximale (MPP).
- Un luxmètre professionnel, utilisé pour estimer l'irradiation solaire en lux, laquelle est ensuite convertie en W/m^2 à l'aide d'un facteur de conversion adapté.

L'angle d'inclinaison du panneau a été maintenu constant afin de garantir la stabilité du flux lumineux incident. Cette méthode nous permet d'évaluer de manière fiable le comportement réel du panneau photovoltaïque et de le comparer ultérieurement aux résultats simulés sous MATLAB/Simulink. (Figure III.6)



Figure III.7 : Étude expérimentale des caractéristiques électriques d'un module solaire photovoltaïque

III. 4. 1 Présentation des résultats expérimentaux du panneau photovoltaïque

Cette expérience nous a permis de mesurer la tension en circuit ouvert (VOC) et le courant de court-circuit (ISC) avec le changement de valeur de rhéostat, ainsi que de déterminer avec précision les valeurs de l'irradiation solaire et de la température ambiante dans des conditions réelles de fonctionnement.

- Le tableau ci-dessous (Table 4) présente les valeurs mesurées de la tension (VOC) et du courant (ISC) d'un panneau photovoltaïque. Chaque point de tension correspond un point de courant mesuré

Chapitre III : Amélioration de système hybride PV/T/TEG

Tension (V)	Courant (A)
0.00	0.000
2.31	1.884
3.49	1.884
7.45	1.883
10.19	1.875
12.89	1.865
15.11	1.855
15.65	1.826
15.66	1.824
16.10	1.786
17.00	1.647
17.08	1.645
17.56	1.544
17.70	1.469
17.71	1.461
18.04	1.382
18.22	1.288
18.24	1.285
18.25	1.283
18.26	1.280
18.35	1.254
18.49	1.195
18.51	1.164
18.64	1.116
18.65	1.117
18.66	1.090
18.79	1.028
18.80	1.024
18.89	0.981
18.98	0.929
18.99	0.922
19.01	0.920
19.02	0.917
19.03	0.916
19.45	0.664
19.46	0.663
19.62	0.562
19.76	0.517
19.77	0.465
19.86	0.426
19.87	0.398
19.89	0.386
19.90	0.380
19.99	0.337
20.01	0.304
20.03	0.300
20.09	0.270
20.10	0.238
20.11	0.228
20.15	0.198
20.16	0.191

20.19	0.173
20.20	0.160
20.21	0.156
20.22	0.147
20.23	0.140
20.24	0.131
20.25	0.125
20.26	0.121
20.27	0.112
20.29	0.098
20.30	0.086
20.32	0.074
20.33	0.068
20.34	0.056
20.35	0.053
20.36	0.047
20.37	0.038
20.38	0.032
20.39	0.027
20.40	0.020

Table 4: les valeurs mesurées de la tension (VOC) et du courant (ISC) d'un panneau Photovoltaïque

À partir de ces valeurs mesurées de la tension (VOC) et du courant (ISC), nous les avons intégrées dans le logiciel MATLAB afin de tracer les caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque, notamment la courbe puissance-tension (P-V). Ces courbes permettent d'analyser le comportement du panneau en conditions réelles et d'identifier le point de puissance maximale (MPP)

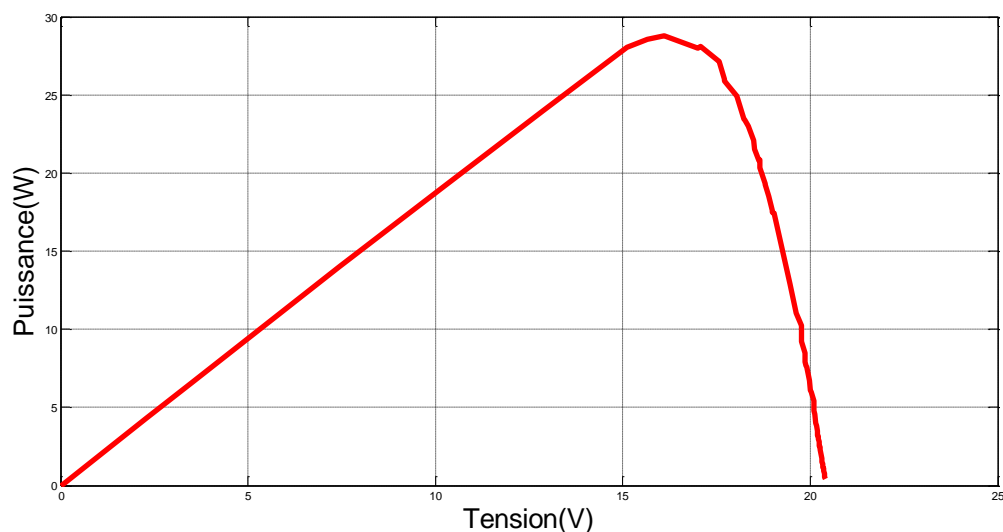


Figure III.8 : Caractéristique réel de la puissance en fonction de tension d'un panneau solaire

Le graphique (Figure III.8) e présente la relation entre la tension (axe des abscisses) et la puissance (axe des ordonnées), La puissance augmente de manière quasi linéaire avec la tension jusqu'à environ 16 V, atteignant un maximum d'environ 28,75 w à ce point , le point de puissance maximale (MPP) est clairement identifié à 16,1 V et 28,75 unités de puissance. Ce point est crucial dans l'optimisation de systèmes tels que les panneaux photovoltaïques ou les convertisseurs d'énergie, où il est essentiel de fonctionner à ce maximum pour une efficacité optimale. Au-delà de 16 V, la puissance commence à diminuer rapidement

- Les valeurs de l'irradiation et de température :

L'éclairement lux	110000 Lux
Température	47°C

Table 5: Les valeurs de l'irradiation et de température

- L'irradiation peut être estimée à partir de le lux mesurée en utilisant la relation suivant :

$$Irradiation = \frac{lux}{126} = \frac{110000}{126} = 873 \text{ W/m} \quad \text{(III—1)}$$

III. 4. 2 Comparaison des caractéristiques expérimentales et simulées de sortie PV

Dans cette section, nous présentons une comparaison détaillée entre les résultats issus de la simulation théorique sous MATLAB/Simulink et les données expérimentales obtenues sur le module photovoltaïque. L'objectif recherché est l'amélioration de la précision de l'identification des paramètres de panneau photovoltaïque

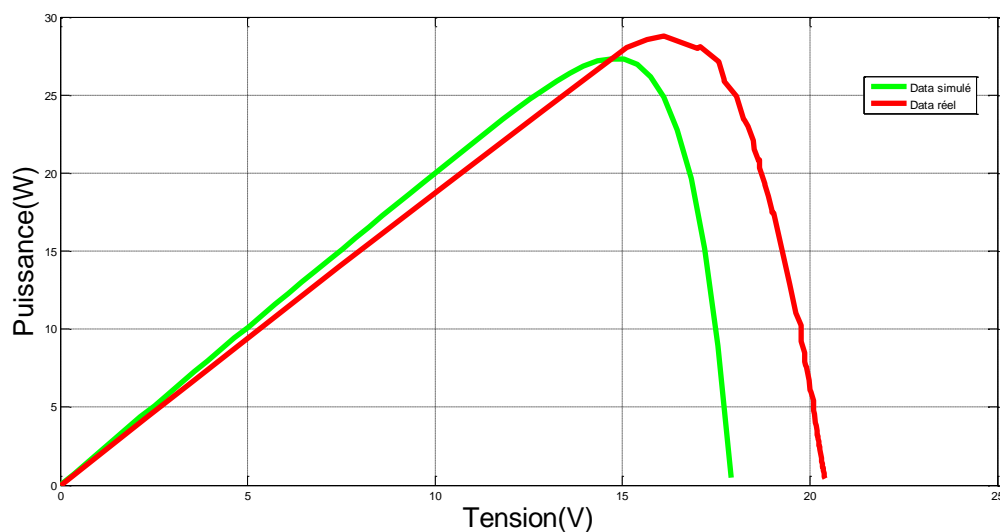


Figure III.9 : Courbe caractéristique Puissance-Tension (P-V) d'un module photovoltaïque : 'comparaison entre résultats réels et simulés'

La Figure III.9 présente deux courbes de puissance en fonction de la tension, première courbe (en rouge) présente la performance réelle et l'autre Simulé par MATLAB

Le modèle simulé ne correspond pas parfaitement aux résultats réels, Pour améliorer la simulation, il faut améliorer les paramètres de module

Parmi les effets qui réduisent l'efficacité de modèle photovoltaïque les paramètres électrique comme la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}), L'énergie de gap du semi-conducteur (E_g), et le facteur d'idéalité d'une diode (n), Ces paramètres influence sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$, cette influence est très importante aux forts niveaux de polarisation au voisinage de V_{co} .

$R_s=0.1 \Omega$, $R_{sh}=240 \Omega$, $E_g=1.3 \text{ ev}$, $n=1.1$, ce sont les valeurs pour le panneau solaire qui étudie

III. 5 Optimisation du modèle électrique

L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant le meilleur élément d'un ensemble selon certains critères prédéfinis. De ce fait, l'optimisation est omniprésente dans tous les domaines et évolue sans cesse depuis Euclide [28].

Les techniques d'optimisation telles que P&O (Perturb and Observe), PSO (Particle Swarm Optimization), ainsi que l'élargissement au cadre de l'optimisation combinatoire, sont des méthodes académiques utilisées pour maximiser la performance des systèmes photovoltaïques (PV), notamment dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Autre que ces technique nous avons utilisé une autre méthode qui est (la variation manuel des paramètres) pour avoir les meilleurs résultats

Après plusieurs tests on a trouvé les meilleurs paramètres suivants : $R_s=0.8\Omega$, $R_{sh}=100\Omega$, $E_g=0.36\text{ev}$

Les deux courbes sont identiques après l'amélioration des paramètres R_s , R_{sh} , E_g comme le montre la Figure III.9 ci-dessous

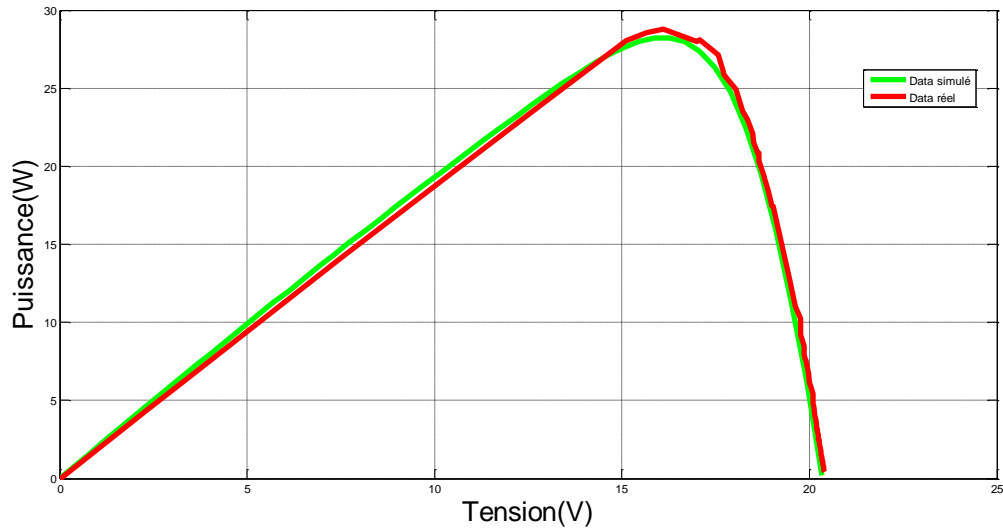


Figure III.10 : Courbe caractéristique Puissance-Tension (P-V) d'un module photovoltaïque : 'après estimation'

Les résultats indiquent le comportement de R_s en fonction de la température. Il est observé que l'accroissement de la température entraîne une hausse de R_s

Les résultats montrent aussi le comportement de R_{sh} en fonction de la température. On constate que l'augmentation de la température mène à une diminution de R_{sh}

On remarque aussi que l'augmentation de la température mène à une décroissance de la Bande interdite (E_g) donc I_{ph} augment

III. 6 La simulation PV/TEG dans les Termes réels

L'étude intègre l'application des nouvelles paramètres estimés de résistance série (R_s) et de résistance shunt (R_{sh}) et (E_g) afin de caractériser le comportement électrique système dans les conditions de $G=870W/m$, $T=47^\circ C$ (Figure III.10)

Ou :

$$R_s=0.7\Omega, R_{sh}=100\Omega, E_g=0.36 \text{ eV}$$

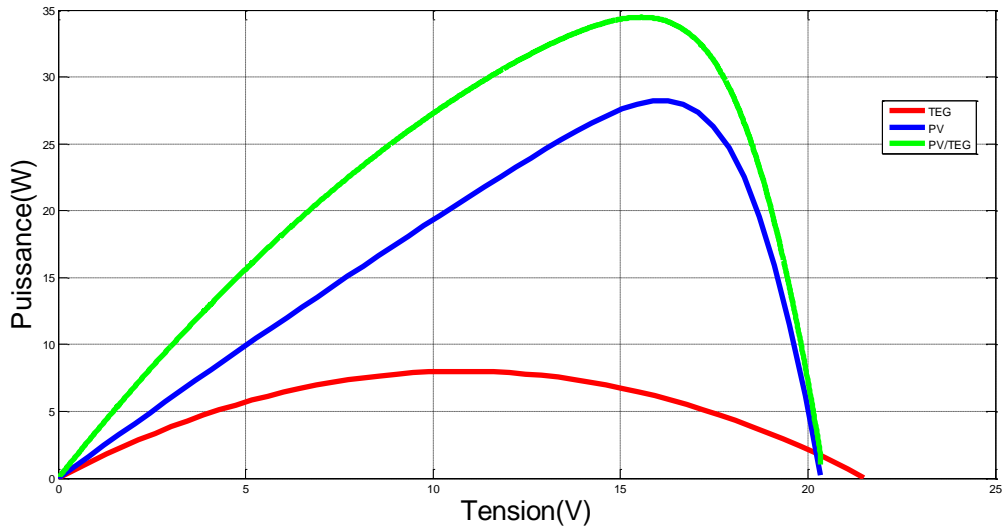


Figure III.11 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle) dans les Termes 870/47

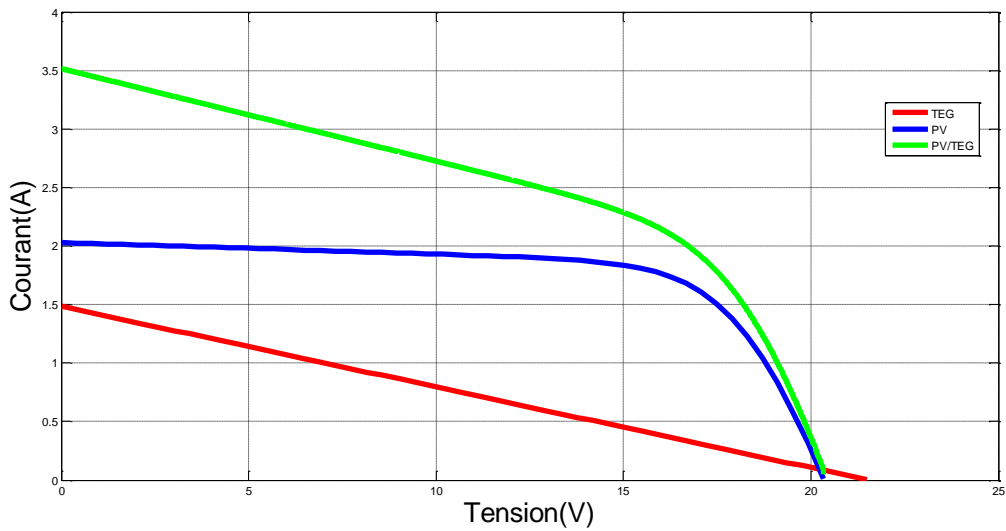


Figure III.12 : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle) dans les termes de 870/47

On remarque que l'augmentation de puissance indique que la puissance PV sommé avec la puissance TEG donc le générateur thermoélectrique ont un bon fonctionnement,

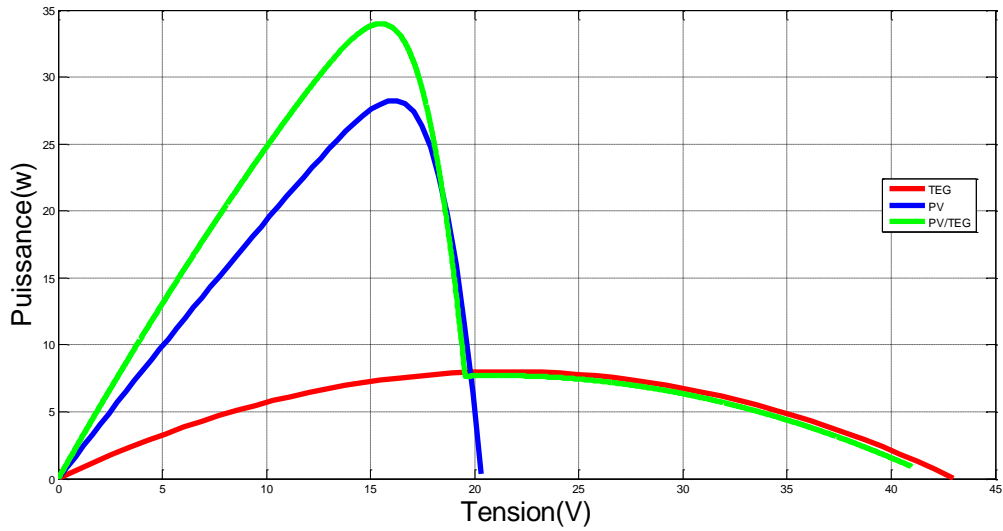


Figure III.13 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/série) dans les Termes 870/47

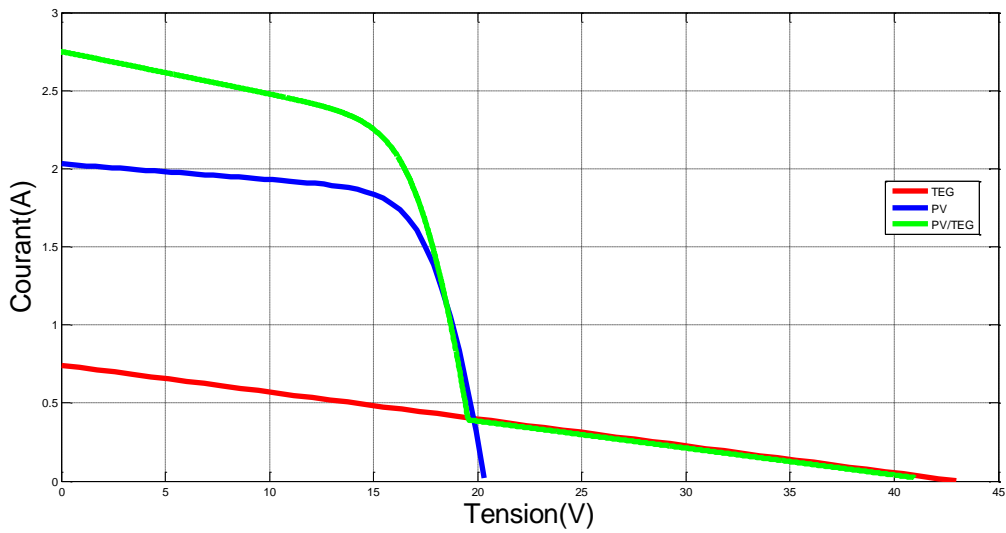


Figure III.14 : Caractéristique de courant en fonction de la tension du système hybride PV/TEG (série/parallèle) dans les termes de 870/47

III. 7 Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur l'amélioration des syst photovoltaïques/thermoélectriques (PV/T/TEG) en vue d'une utilisation optimale de l'énergie solaire. Nous avons d'abord examiné la conception technique de ces systèmes, soulignant l'intégration des générateurs thermoélectriques (TEG) à l'arrière des panneaux photovoltaïques pour récupérer la chaleur résiduelle et générer de l'électricité supplémentaire. La simulation de ce système hybride PV/TEG sous MATLAB Simulink a démontré une augmentation significative de la puissance, confirmant l'efficacité des TEG dans l'amélioration du rendement global. Parallèlement, une étude expérimentale a été menée pour caractériser les performances réelles d'un panneau photovoltaïque dans des conditions climatiques naturelles. Les mesures de tension, de courant, d'irradiation solaire et de température ont permis de tracer les courbes P-V réelles, révélant un point de puissance maximale (MPP) crucial pour l'optimisation. La comparaison entre les résultats simulés et expérimentaux a mis en évidence des écarts, soulignant la nécessité d'une optimisation du modèle mathématique.

Enfin, Ce chapitre a porté sur la conception, la modélisation et l'optimisation d'un système hybride PV/T/TEG visant à valoriser au maximum l'énergie solaire. L'ajout de générateurs thermoélectriques a permis de récupérer la chaleur résiduelle pour produire une électricité complémentaire, augmentant ainsi le rendement global. Les résultats issus de la simulation sous MATLAB/Simulink ont été validés par des mesures expérimentales. Bien que l'algorithme PSO soit mentionné, l'optimisation a surtout reposé sur des ajustements manuels des paramètres. Ce système hybride représente une solution prometteuse pour une transition énergétique durable, avec plusieurs perspectives d'amélioration.

Conclusion Générale

Dans un contexte mondial marqué par des enjeux énergétiques et environnementaux critiques, ce travail s'est inscrit dans une démarche de recherche de solutions durables, efficaces et adaptées à l'exploitation des énergies renouvelables. L'étude menée s'est focalisée sur un système hybride innovant combinant des cellules photovoltaïques (PV), un système thermique (T) pour refroidissement de température de 15° C et des générateurs thermoélectriques (TEG), visant à maximiser la conversion de l'énergie solaire en électricité.

Dans un premier temps, une revue approfondie des différentes sources d'énergies renouvelables a permis de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque filière, tout en soulignant l'importance stratégique de l'énergie solaire. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques a ensuite été étudié, en détaillant les phénomènes physiques impliqués, les modèles mathématiques représentatifs et les facteurs influençant leur performance.

La partie centrale de ce mémoire a porté sur la modélisation, la simulation et l'optimisation du système hybride PV/T/TEG. Grâce à l'outil MATLAB/Simulink, une analyse fine a été réalisée afin d'évaluer le comportement électrique et thermique du système, ainsi que l'interaction entre les différentes composantes. Les résultats ont montré une amélioration significative du rendement global par l'ajout des TEG, capables de convertir la chaleur résiduelle — habituellement perdue — en électricité supplémentaire. Cette intégration a permis d'exploiter plus efficacement le spectre énergétique du rayonnement solaire.

Des expérimentations en conditions réelles ont permis de comparer les résultats simulés avec les données mesurées, révélant une bonne concordance et validant la pertinence du modèle. Une optimisation basée sur (la variation manuel des paramètres) a été implémentée afin d'affiner les paramètres du système et d'en améliorer la précision de prédiction.

En conclusion, le système hybride PV/T/TEG représente une avancée prometteuse dans la valorisation de l'énergie solaire, en combinant de manière synergique la conversion photovoltaïque et thermoélectrique. Les résultats obtenus confirment son potentiel en matière de rendement énergétique, de compacité et de durabilité, et ouvrent la voie à de futures recherches sur l'intégration intelligente de ces systèmes dans des applications domestiques, industrielles ou isolées. Le développement de telles technologies constitue une réponse concrète aux enjeux de transition énergétique vers un modèle plus propre, résilient et efficace.

Perspectives :

Plusieurs pistes de développement peuvent être envisagées pour renforcer les performances et la viabilité de ce type de système :

1. **Optimisation thermique avancée** : L'intégration de dissipateurs de chaleur ou de systèmes de refroidissement à base de matériaux à changement de phase (PCM) pourrait améliorer encore la gestion thermique, favorisant à la fois le rendement des cellules PV et des TEG.
2. **Nouveaux matériaux thermoélectriques** : L'utilisation de matériaux à haut facteur de mérite (ZT), notamment à base de nanostructures ou composites, permettrait d'accroître sensiblement l'efficacité des TEG.
3. **Systèmes PV/T/TEG à concentration** : En concentrant le rayonnement solaire à l'aide de miroirs ou lentilles (CPV), il est possible d'augmenter les températures disponibles et donc le gradient thermique pour les TEG, tout en réduisant la surface des modules.
4. **Approche intelligente (Smart PV/TEG)** : En combinant ce système avec des capteurs, des régulateurs intelligents et une supervision en temps réel, il serait possible d'implémenter une gestion optimisée de l'énergie (MPPT multivoies, contrôle adaptatif, stockage intelligent).

Référence et Bibliographie

- 1 EL-LOUH, L. (2025). Les énergies renouvelables [Mini projet]. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Meknès.
- [2]Arbouche, R., & Aichi, M. (2022). Identification des paramètres d'un module photovoltaïque (Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie)
- [3] Benamrouche, N., & Hassaine,L. (2008). Étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau [Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]. Algérie.
- [4] Jaouen, M. (2005, juin). Les énergies renouvelables : État des lieux et perspectives en Italie. Avec la collaboration de C. Racault. Algérie.
- [5] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). Wiley
- [6]<https://www.affinicia.com/energie/guides/energie-eolienne-source-energie-renouvelable/>
- [7]<https://www.edf.fr/collectivites/le-mag/strategie-energetique-territoriale/energie-eolienne-5-avantages-pour-les-collectivites>
- [8] Amiri, D., & Bouabdellah, M. (2012). Modélisation et simulation d'un panneau solaire photovoltaïque [Mémoire de master, Université Saad Dahlab de Blida 1]. Algérie.
- [9] Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne. (2009, 23 avril). Directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. Journal officiel de l'Union européenne.
- [10] International Energy Agency. (2021). Bioenergy. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/bioenergy>
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable energy and climate change mitigation:Benefits for health, economy and energy security. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2023/Mar/Renewable-energy-and-climate-change-mitigation>
- [12] Makki, S. Omer, H. Sabir, "Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance," Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 41, pp. 658-684, Jan. 2015
- [13] Y. Zhang, J. Fang, C. He, H. Yan, Z. Wei, Y. Li, "Integrated energy-harvesting system by combining the advantages of polymer solar cells and thermoelectric devices" , J. Phys. Chem. C, Vol. 47, pp.

24685-24691, Nov. 2013.

[14] Nižetić, S., Marinić-Kragić, I., Grubišić-Čabo, F., Papadopoulos, A.

M., & Xie, G. (2020). Analysis of novel passive cooling strategies for free-standing silicon photovoltaic panels.

Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.

<https://doi.org/10.1007/s10973-020-09410-7>

[15] Coskun, C., Toygar, U., Sarpdag, O., & Oktay, Z. (2017).

Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic

module temperature: A review. *Journal of Cleaner*

Production, 164, 1474–1485.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.080>

[16] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). Wiley.

[17] Yamamoto, T., & Takahashi, Y. (2023). Marine renewable energy technologies: State of the art and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112518.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.112518>

[18] Geoffrey R. Walker, IEEE and Paul C. Sernia, “cascaded dc- dc converter connection of photovoltaic modules”, 2004.

[19] Naseem, M. B., Lee, J., & In, S.-I. (2024). Radioisotope thermoelectric generators (RTGs): A review of current challenges and future applications. *Chemical Communications*, 60, 14155–14167. <https://doi.org/10.1039/D4CC03980>

[20] Saima Siouane. Systeme thermoelectrique pour la recuperation d'energie :

modelisation electrique et continuite de service de la circuiterie electronique. Micro et nanotechnologies/ Microelectronique. Universite de Lorraine, 2017. Francais. NNT : 2017 LORR0201. Tel-01906188

[21] Du, M., et al. (2024). A polymer film with very high Seebeck coefficient... *Advanced Functional Materials*, 35(1), 2411815. <https://doi.org/10.1002/adfm.202411815>

[22] Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., & Tounsi, F. (2020). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator

[23] Tappura, K., & Jaakkola, K. (2018). A thin-film thermoelectric generator for large-area applications. *Proceedings*, 2(13), 779. <https://doi.org/10.3390/proceedings2130779>

[24] Padmanabhan Ramesh, V., Sargolzaeiaval, Y., Neumann, T., Misra, V., Vashae, D., Dickey, M. D., & Öztürk, M. C. (2021). Flexible thermoelectric generator with liquid metal

- interconnects and low thermal-conductivity silicone filler. *npj Flexible Electronics*, 4, Article 10. <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00101-3>
- [25] MathWorks. (2025). Simulink [Logiciel]. The MathWorks, Inc. Récupéré du site <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [26] Yamamoto, T., & Takahashi, Y. (2023). Marine renewable energy technologies: State of the art and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112518. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.112518>
- [27] Werner, J. M. (2017). *Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43881-5>
- [27] Zheng, Y., & Wang, L. (2019). Bifacial Photovoltaic Technology: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- [28] Arbouche, R., & Aichi, M. (2022). Identification des paramètres d'un module photovoltaïque (Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie)
- [29] FZ. Zerhouni. « Etude de l'influence de différents agents sur les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque ». *Revue Technologique et Scientifique 'COST', ENSET, N°4*, pages 39-44, Oran, 2006

Résumé

Dans un contexte mondial de défis énergétiques et environnementaux, cette étude explore un système hybride innovant combinant des cellules photovoltaïques (PV), un système thermique (T) pour le refroidissement, et des générateurs thermoélectriques (TEG) afin de maximiser la conversion de l'énergie solaire en électricité. Après une revue des énergies renouvelables et une analyse approfondie du fonctionnement des cellules PV, le cœur du travail a porté sur la modélisation, la simulation et l'optimisation du système PV/T/TEG à l'aide de MATLAB/Simulink. Les résultats ont démontré une amélioration significative du rendement global grâce à l'intégration des TEG, qui convertissent la chaleur résiduelle en électricité supplémentaire, exploitant ainsi plus efficacement le spectre énergétique solaire. Des expérimentations réelles ont validé le modèle, et une optimisation basée sur la variation manuelle des paramètres a affiné les paramètres du système. En conclusion, le système hybride PV/T/TEG représente une avancée prometteuse pour la valorisation de l'énergie solaire, offrant un potentiel élevé en termes de rendement énergétique, de compacité et de durabilité, et ouvrant la voie à de futures applications intelligentes pour une transition énergétique plus propre et résiliente.

Abstract

In a global context marked by critical energy and environmental challenges, this study explores an innovative hybrid system combining photovoltaic (PV) cells, a thermal (T) system for cooling, and thermoelectric generators (TEG) to maximize the conversion of solar energy into electricity. After a review of renewable energies and an in-depth analysis of PV cell operation, the core of the work focused on the modeling, simulation, and optimization of the PV/T/TEG system using MATLAB/Simulink. The results demonstrated a significant improvement in overall efficiency through the integration of TEGs, which convert residual heat into additional electricity, thus more effectively exploiting the solar energy spectrum. Real-world experiments validated the model, and optimization based on manual parameter variation refined the system parameters. In conclusion, the hybrid PV/T/TEG system represents a promising advance in solar energy utilization, offering high potential in terms of energy efficiency, compactness, and durability, and paving the way for future intelligent applications for a cleaner and more resilient energy transition.

ملخص

في سياق عالمي يتسم بتحديات الطاقة والبيئة الحرجة، تستكشف هذه الدراسة نظامًا هجينًا مبتكرًا يجمع بين الخلايا الكهروضوئية لزيادة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء. بعد مراجعة (TEG) للتبريد، ومولدات كهروحرارية (T)، ونظام حراري (PV) شاملة لمصادر الطاقة المتجددة وتحليل متعمق لعمل الخلايا الكهروضوئية، ركز جوهر العمل على نمذجة ومحاكاة وتحسين نظام ، TEG أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في الكفاءة الكلية بفضل دمج مولدات MATLAB/Simulink باستخدام PV/T/TEG التي تحول الحرارة المتبقية إلى كهرباء إضافية، وبالتالي تستغل طيف الطاقة الشمسية بشكل أكثر فعالية. وقد أثبتت التجارب الواقعية صحة النموذج، و عملت عملية التحسين القائمة على التباين اليدوي للمعلمات على تحسين معلمات النظام. في الختام، تقدمًا واعدًا في استغلال الطاقة الشمسية، حيث يوفر إمكانات عالية من حيث كفاءة الطاقة، PV/T/TEG يمثل النظام الهجين والضغط، والمتانة، ويمهد الطريق لتطبيقات ذكية مستقبلية من أجل انتقال طاقتي أنظف وأكثر مرونة.