



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCE

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Par :

M^{elle} BOUHASSOUNE Zohra

Sur le thème

**Intégration et optimisation des systèmes
photovoltaïques et hybrides PV(a-Si: H)–TEG (Bi₂Te₃)
en environnements industriels à haute température.**

Soutenu publiquement le 15 juin 2026 à Tlemcen devant le jury composé de :

Dr KAZI-TANI Wassila
Dr SARI-ALI Inchirah
Dr ZIDANI Chafika

MCA
MCA
MCA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Présidente
Encadrante
Examinatrice

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Au bon dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a éclairé mon chemin tout au long de mes études, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*Je tiens, en premier lieu, à remercier profondément et sincèrement tous mes enseignants, pour le savoir qu'ils ont pu m'apporter durant mon passage à l'université, et je suis vraiment reconnaissant pour tous leurs conseils, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon encadreur **Dr SARI-ALI Inchirah** pour sa guidance experte, sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien constant tout au long de mon parcours de recherche.*

*Mes remerciements s'adressent aux membres du jury **Dr KAZI-TANI Wassila** et **Dr ZIDANI Chafika**, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner mon travail.*

Je tiens à remercier toute ma famille pour leurs aides uniques. Ainsi que tous mes proches pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Je présente aussi mes remerciements à tous mes amis pour leurs soutiens et leurs suggestions. Sans oublier tous ceux qui m'ont encouragé, de près ou de loin à réaliser mon projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ce qui les plus chers au monde, mes parents, aux quels je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, pour leurs amours, leurs soutiens tout au long de mes études afin de faire de moi ce que je suis aujourd'hui, que DIEU mes les protègent toujours.

Ma chère sœur Djamila, source de bonheur je t'aimes beaucoup, Je te souhaite une vie pleine de joie et de bonheur.

Mes chers frères Rachid et Mohammed, merci pour votre présence précieuse, pour votre affection sincère et votre soutien constant.

Ma chère cousine Meriem, merci pour ta présence constante, votre soutien sincère et les moments de réconfort que tu m'as offert.

Mes amies proches, merci pour votre accompagnement et votre présence à mes côtés tout au long de ce parcours.

Sommaire

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Contexte générale et fondements théoriques

Introduction	4
I.1. Présentation des systèmes photovoltaïques.....	4
I.1.1. Une cellule solaire PV et son principe de fonctionnement	4
I.1.2. Différentes technologies de cellules solaires PV	5
I.1.3. Le choix de silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H)	9
I.2. Limitation des PV en environnements à haute température.....	11
I.2.1. Effet de la température sur les cellules PV.....	11
I.2.2. Effet de la température sur le silicium amorphe.....	12
I.3. Présentation des modules TEG (Bi ₂ Te ₃) et le principe thermoélectrique	12
I.3.1. Introduction à la thermoélectricité	12
I.3.2. Les effets thermoélectriques.....	13
I.3.3. Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques	15
I.3.4. Matériau (Bi ₂ Te ₃)	16
I.3.5. Structure et fonctionnement des TEG	19
I.4. Intérêt des systèmes hybrides PV-TEG	20
I.4.1. Le principe du couplage PV-TEG	20
I.4.2. Le concept d'hybridation PV-TEG.....	20
I.5. Environnements industriels à haute température	21
I.5.1. La chaleur industrielle	21
I.5.2. Les fours industriels	21
I.5.3. Les cheminées industrielles.....	22
Conclusion.....	23
Références	24

Chapitre II : Modélisation et couplage des systèmes PV et TEG

Introduction	27
II.1. Caractéristiques et configurations des panneaux PV	27
II.1.1. Les paramètres d'un panneau PV	27
II.1.2. Association des panneaux PV	28
II.1.3. Modèle idéal de la cellule PV	30

II.1.4.	Circuit équivalent de la cellule PV	30
II.2.	Modèle Single-Diode pour les panneaux a-Si :H.....	31
II.2.1.	Présentation du modèle Single-Diode	31
II.2.2.	Circuit équivalent du modèle Single-Diode	31
II.3.	Etudes des matériaux thermoélectriques	34
II.3.1.	L'efficacité thermoélectrique.....	34
II.3.2.	Propriétés thermoélectriques de Bi ₂ Ti ₃	34
II.3.3.	Optimisation des matériaux thermoélectriques	36
II.3.4.	Groupement des couples thermoélectriques.....	37
II.4.	Modélisation du générateur thermoélectrique (TEG)	38
II.4.1.	Les générateurs thermoélectriques	38
II.4.2.	Conversion d'énergie par effets thermoélectriques.....	38
II.4.3.	Modèle électrique équivalent	39
II.4.4.	Modèle thermique équivalent.....	41
II.4.5.	Circuit équivalent du TEG	41
II.5.	Couplage photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TEG).....	42
II.5.1.	Intégration de PV avec le TEG.....	42
II.5.2.	Objectifs de conception	42
II.5.3.	Modèle électrique du PV-TEG	43
II.5.4.	Modèle thermique	43
II.5.5.	Circuit équivalent du système hybride (PV-TEG).....	44
	Conclusion.....	44
	Références	45

Chapitre III : Simulation et intégration industrielle

	Introduction	48
III.1.	Simulation de l'effet des différentes caractéristiques sur les performances PV	48
III.1.1.	Présentation du logiciel PVsyst.....	48
III.1.2.	Influence des différents paramètres sur le système PV :.....	52
III.2.	Simulation des performances du générateur thermoélectrique (TEG).....	61
III.2.1.	Caractéristiques électriques du TEG	61
III.2.2.	Effet de la température sur les performances du TEG	63
III.3.	Simulation et analyse du système hybride PV-TEG.....	64
III.3.1.	Caractéristiques électriques du système hybride PV-TEG.....	64

III.3.2.	Comparaison des performances des systèmes : PV seul et Hybride PV-TEG	67
III.4.	Étude de la puissance produite dans deux environnements industriels.....	69
III.4.1.	Cas d'une cimenterie (haute température).....	69
III.4.2.	Cas d'une industrie agroalimentaire (température modérée)	70
III.4.3.	Discussion et comparaison des résultats	70
Conclusion.....		71
Références		72
Conclusion générale		72

Liste des figures

Chapitre I : Contexte générale et fondements théoriques

Figure I. 1: Principe du fonctionnement d'une cellule solaire PV	5
Figure I. 2 : Cellules solaires PV monocristallines et poly cristallines	6
Figure I. 3 : Cellule solaire PV en silicium amorphe	7
Figure I. 4 : Cellule solaire à base de CdTe.....	7
Figure I. 5 : Cellule solaire à base de CIGS	8
Figure I. 6 : Cellule solaire organique	9
Figure I. 7 : Un schéma de la structure du silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H).....	10
Figure I. 8 : Effet de la température sur la caractéristique I-V	11
Figure I. 9 : Effet de la température sur la caractéristique P-V	12
Figure I. 10 : Schéma descriptif de l'effet Seebeck	13
Figure I. 11 : Schéma descriptif de l'effet Peltier.....	14
Figure I. 12 : Les propriétés thermoélectriques en fonction de la concentration de porteurs de charge (n) [17]	16
Figure I. 13 : Structure cristalline du tellure de bismuth (Bi_2Te_3)	16
Figure I. 14 : Convertisseur thermoélectrique à base de Bi_2Te_3 massif	17
Figure I. 15 : Miniaturisation du Micropelt par rapport à un Peltier massif commercial et son agrandissement	17
Figure I. 16 : Dispositifs Micropelt au stade de wafer après dépôt du matériau thermoélectrique sur les électrodes déposées préalablement	18
Figure I. 17 : État de l'art des dispositifs Micropelt et évolution de la surface A des faces froides.....	18
Figure I. 18 : Convertisseurs thermoélectriques réalisés à base de μ -poudre de Bi_2Te_3	19
Figure I. 19 : Illustration schématique du module TEG (a) et (b) une structure détaillée d'une paire individuelle de thermocouples à l'intérieur du module	20
Figure I. 20 : Schéma d'un module hybride photovoltaïque-thermoélectrique	21

Chapitre II : Modélisation et couplage des systèmes PV et TEG

Figure II. 1 : Caractéristique J (V) d'une cellule solaire définitions les paramètres photovoltaïques [2].....	28
Figure II. 2 : Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série [1].....	29
Figure II. 3 : Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle [1].....	29
Figure II. 4 : Caractéristique d'un groupement mixte [2]	29

Figure II. 5 : Le circuit équivalent de la cellule PV idéale [4]	31
Figure II. 6 : Schéma équivalent du modèle 3-p [6].....	32
Figure II. 7 : Schéma équivalent du modèle 4-p [6].....	33
Figure II. 8 : Schéma équivalent du modèle 5-p [6].....	33
Figure II. 9 : Evolution de coefficient de Seebeck en fonction de la température [8]	35
Figure II. 10 : Evolution de la conductivité thermique et électrique en fonction de la température [8]	35
Figure II. 11 : Evolution de facteur de mérite en fonction de la température [8].....	36
Figure II. 12 : Groupement de N_s couples thermoélectriques en série [10]	37
Figure II. 13 : Groupement de N_p couples thermoélectriques en parallèle [10].....	38
Figure II. 14 : Schéma explicative de l'effet de Seebeck [13]	39
Figure II. 15 : Schéma du circuit électrique du banc d'essai [14].....	40
Figure II. 16 : Le circuit équivalent du TEG [12]	42
Figure II. 17 : Circuit électrique équivalent d'un dispositif hybride PV-TEG [17]	44

Chapitre III : Simulation et intégration industrielle

Figure III. 1 : Menu principal de logiciel PVsyst.....	50
Figure III. 2 : Influence de la température sur la caractéristique I(V).....	53
Figure III. 3 : Influence de la température sur la caractéristique P(V).....	53
Figure III. 4 : Influence de la température sur l'efficacité	54
Figure III. 5 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V)	54
Figure III. 6 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V).....	55
Figure III. 7 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)	56
Figure III. 8 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P(V)	56
Figure III. 9 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I(V)	57
Figure III. 10 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique P(V)	58
Figure III. 11 : Influence des dégradations (de 20% à 70%) à $G=1000 \text{ W/m}^2$	59
sur la caractéristique I(V).....	59
Figure III. 12 : Influence des dégradations (de 20% à 70%) à $T=25^\circ\text{C}$	60
sur la caractéristique I(V).....	60
Figure III. 13 : Caractéristiques I-V du générateur thermoélectrique TEG	62
Figure III. 14 : Caractéristiques P-V du générateur thermoélectrique TEG.....	63
Figure III. 15 : Effet théorique de la différence de température sur la puissance du TEG.....	63
Figure III. 16 : Caractéristiques I-V des systèmes : PV, TEG et hybride PV-TEG	64

Figure III. 17 : Comparaison entre les caractéristiques I-V du : PV, TEG et PV-TEG	65
Figure III. 18 : Caractéristiques P-V des systèmes : PV, TEG et hybride PV-TEG	66
Figure III. 19 : Rendement énergétique en fonction de : température et irradiation solaire	67
Figure III. 20 : Influence de la température sur les performances du : PV, TEG et PV-TEG ..	68
Figure III. 21 : Évolution de la puissance de: PV, TEG et hybride PV–TEG en fonction de la température dans une cimenterie	69
Figure III. 22 : Évolution de la puissance de: PV, TEG et hybride PV–TEG en fonction de la température dans une industrie agroalimentaire.....	70
Figure III. 23 : Architecture du système hybride PV–TEG pour la récupération de chaleur industrielle	71

Résumé

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) dans les environnements industriels à haute température représente un défi majeur en raison de la forte dégradation des performances des modules sous des conditions thermiques extrêmes. Ce travail vise à évaluer et optimiser l'utilisation des modules photovoltaïques en silicium amorphe (a-Si:H), connus pour leur meilleure stabilité thermique, ainsi que leur couplage avec des modules thermoélectriques (TEG) basés sur le matériau Bi_2Te_3 afin de former un système hybride PV-TEG. Une modélisation thermique et électrique est réalisée afin de comprendre l'impact de la température sur le rendement global et d'estimer le gain énergétique apporté par le TEG grâce à la récupération du gradient thermique. Les simulations sont effectuées sous **PVsyst/Python** en tenant compte de différents scénarios industriels. Les résultats montrent que le système hybride PV-TEG permet d'améliorer l'efficacité globale, en particulier lorsque le gradient thermique est significatif. Ce mémoire propose ainsi une approche intégrée d'optimisation et d'analyse pour améliorer la production énergétique dans des environnements industriels chauds.

Mots-clés : Silicium amorphe (a-Si:H), générateur thermoélectrique (TEG), système hybride PV-TEG, efficacité énergétique, industrie à haute

Abstract :

The integration of photovoltaic (PV) systems into high-temperature industrial environments represents a major challenge due to the significant degradation of module performance under extreme thermal conditions. This work aims to evaluate and optimize the use of amorphous silicon (a-Si) photovoltaic modules, which are known for their superior thermal stability, as well as their coupling with thermoelectric generators (TEGs) based on Bi_2Te_3 material to form a hybrid PV-TEG system.

A comprehensive thermal and electrical modeling approach is developed to investigate the impact of temperature on the overall system efficiency and to estimate the additional energy contribution provided by the TEG through the recovery of thermal gradients. Simulations are carried out using PVsyst and Python under various industrial operating scenarios. The results demonstrate that the hybrid PV-TEG system enhances the overall energy conversion efficiency, particularly under conditions where significant temperature gradients are available. This thesis therefore proposes an integrated optimization and analysis framework for improving energy production in high-temperature industrial environments.

Keywords: Amorphous silicon (a-Si:H), Thermoelectric generator (TEG), Hybrid PV-TEG system, , Energy efficiency, High-temperature environments

المخلص

في البيئات الصناعية ذات درجات الحرارة المرتفعة تحديًا كبيرًا بسبب التدهور الملحوظ في أداء (PV) يمثل دمج الأنظمة الكهروضوئية الوحدات الكهروضوئية تحت الظروف الحرارية القاسية. يهدف هذا العمل إلى تقييم وتحسين استخدام الوحدات الكهروضوئية المصنوعة من تعتمد على مادة (TEG) ، المعروف باستقراره الحراري الجيد، بالإضافة إلى دمجها مع مولدات كهروحرارية (a-Si:H) السيليكون غير المتبلور PV-TEG لتشكيل نظام هجين (Bi_2Te_3) لتوليد البزموت.

تم تطوير نموذج حراري وكهربائي لدراسة تأثير درجة الحرارة على الكفاءة الإجمالية للنظام، وتقدير الزيادة في إنتاج الطاقة الناتجة عن استرجاع جزء من الطاقة الحرارية المهدورة بواسطة المولد الكهروحراري من خلال استغلال التدرج الحراري. أجريت عمليات المحاكاة باستخدام برنامجي مع الأخذ بعين الاعتبار عدة سيناريوهات صناعية مختلفة MATLAB/Python و PVsyst.

يساهم في تحسين الكفاءة الإجمالية لتحويل الطاقة، خاصة في الحالات التي يكون فيها التدرج PV-TEG أظهرت النتائج أن النظام الهجين الحراري كبيرًا. وعليه، يقدم هذا العمل منهجية متكاملة للتحليل والتحسين تهدف إلى تعزيز إنتاج الطاقة في البيئات الصناعية ذات درجات الحرارة المرتفعة.

الكلمات المفتاحية:

، الاستقرار PV-TEG ، النظام الهجين (TEG) ، المولدات الكهروحرارية (a-Si:H) ، السيليكون غير المتبلور (PV) الأنظمة الكهروضوئية الحراري، استرجاع الحرارة المهدورة، كفاءة الطاقة، البيئات الصناعية ذات درجات الحرارة المرتفعة

Introduction Générale

Introduction générale :

Ces dernières années, la demande énergétique mondiale a considérablement augmenté en raison de la croissance industrielle et des progrès technologiques constants. Cette situation a engendré une recherche de sources d'énergie propres et durables, capables de répondre à ces besoins croissants tout en atténuant l'impact environnemental de l'utilisation des combustibles fossiles. Dans ce contexte, l'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes et les plus répandues. Les cellules photovoltaïques sont largement utilisées pour convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Cependant, leur rendement est affecté par plusieurs facteurs opérationnels, notamment la température élevée des cellules, qui entraîne une réduction de leur efficacité et de la puissance de sortie.

Pour pallier ce problème, de nombreuses études se sont concentrées sur la valorisation de la chaleur résiduelle produite par les panneaux solaires, grâce à leur intégration à des générateurs thermoélectriques (TEG). Ces générateurs exploitent l'effet thermoélectrique pour convertir directement les différences de température en électricité. Cette intégration permet le développement de systèmes hybrides PV-TEG capables d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et d'accroître le rendement global du système en produisant de l'énergie supplémentaire à partir de la chaleur auparavant perdue.

Ces systèmes sont particulièrement importants dans les environnements industriels à haute température, où d'importantes quantités de chaleur résiduelle peuvent être récupérées et converties en électricité. Les industries du ciment et de l'agroalimentaire se distinguent par leurs sources de chaleur facilement accessibles, exploitables dans des systèmes hybrides combinant énergie solaire et technologies thermoélectriques.

Cette étude vise à analyser les performances des systèmes photovoltaïques et thermoélectriques et à explorer le potentiel d'amélioration de la production d'énergie par l'intégration de ces deux technologies dans un système hybride PV-TEG.

- À cette fin, le premier chapitre aborde les concepts fondamentaux des cellules photovoltaïques, leurs limitations en environnements à haute température et présente les générateurs thermoélectriques, en soulignant l'importance des systèmes hybrides et leurs applications industrielles pertinentes.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des modèles mathématiques utilisés pour caractériser les panneaux photovoltaïques et les générateurs thermoélectriques, en présentant des modèles de simulation et les mécanismes de connexion des deux systèmes.
- Le troisième chapitre se concentre sur la simulation et l'analyse des performances des systèmes étudiés, en examinant l'impact de divers facteurs opérationnels sur leur rendement et en évaluant la puissance de sortie dans deux environnements industriels différents : l'industrie du ciment et l'industrie agroalimentaire.

Cette recherche vise à souligner l'importance de récupérer la chaleur résiduelle et de la convertir en énergie électrique supplémentaire, contribuant ainsi au développement de solutions énergétiques plus efficaces et durables, notamment dans les applications industrielles qui nécessitent une utilisation optimale des ressources énergétiques disponibles.

Chapitre I :
Contexte générale
Et
Fondements théoriques

Introduction :

Ce mémoire porte sur l'étude des systèmes hybrides qui combinent des cellules photovoltaïques et des modules thermoélectriques (PV-TEG) pour récupérer la chaleur perdue dans les environnements industriels. L'objectif est d'explorer comment cette intégration peut améliorer l'efficacité globale de la conversion d'énergie en utilisant à la fois le rayonnement solaire et les émissions thermiques des processus industriels.

Ce premier chapitre vise à poser les fondements théoriques et contextuels nécessaires à la compréhension du système hybride étudié. Il établit une base scientifique solide en présentant les technologies des cellules photovoltaïques, les phénomènes thermoélectriques et la possibilité de les relier, tout en définissant le cadre d'application industrielle qui justifie cette étude.

Ce chapitre se compose de cinq sections principales. La première section donne un aperçu des technologies des cellules photovoltaïques, avec un accent sur le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H). La deuxième section analyse les limitations des systèmes photovoltaïques dans les environnements à haute température, un aspect qui est d'une importance capitale pour notre contexte d'application. La troisième section présente les unités de génération d'énergie thermoélectriques (TEG) à base de (Bi_2Te_3) et le principe physique de l'effet Seebeck. La quatrième section explore l'importance des systèmes photovoltaïques hybrides, qui combinent énergie photovoltaïque et thermoélectrique, ainsi que l'intégration potentielle de ces deux modes de conversion. La cinquième section décrit les environnements industriels à haute température (fours, cheminées) qui constituent le cadre de notre étude.

Nous commencerons par examiner en détail les différentes technologies de cellules photovoltaïques disponibles, justifiant ainsi notre choix du silicium amorphe pour notre étude.

I.1. Présentation des systèmes photovoltaïques

I.1.1. Une cellule solaire PV et son principe de fonctionnement :

Les cellules solaires sont des génératrices de l'électricité à partir de l'irradiation solaire captée par les semi-conducteurs (effet PV), qui représentent la partie indispensable d'un système photovoltaïque (PV) [1]. Les panneaux solaires sont formés par des combinaisons des cellules.

Le fonctionnement d'une cellule PV repose sur l'effet photovoltaïque, donc elle peut être ressembler à une diode photosensible.

La conversion d'énergie en électricité par effet photovoltaïque au sein d'un semi-conducteur se déroule en 3 étapes :

- A L'absorption lumineuse :** quand le photon de la lumière est capté par la cellule solaire avec une énergie supérieure à l'énergie du gap, il libère un électron et crée deux types de charges : l'électron (charge négative), et le trou (considérée comme une charge positive).

- B La séparation des charges :** la cellule contient une jonction PN créée par le dopage, qui produit un champ électrique permanent. Sous l'effet de ce champ, les électrons et les trous sont conduits vers leurs zones respectives (N et P). Cette séparation permet d'éviter leur recombinaison et rend possible la circulation du courant électrique.
- C La collecte du courant :** Lorsque les deux faces de la cellule sont reliées par un circuit conducteur, les électrons circulent dans le circuit extérieur afin de rejoindre les trous. Ce mouvement de charges génère alors un courant électrique continu [2] [3].

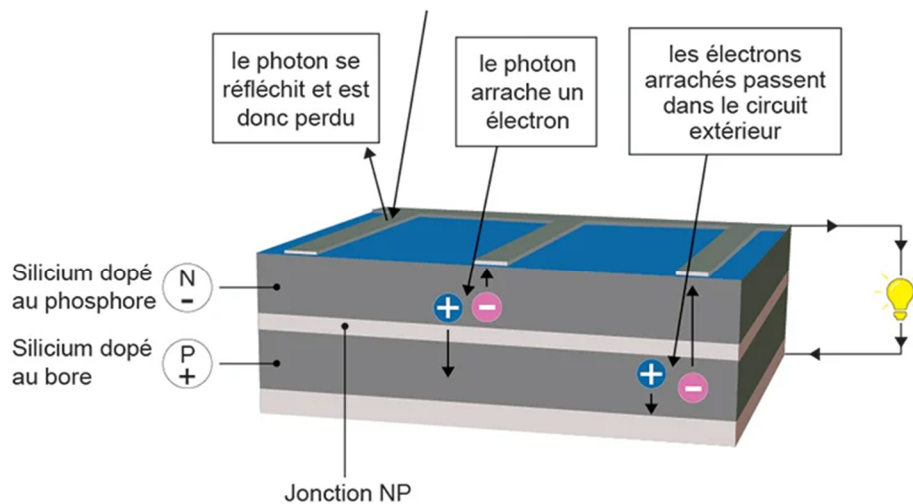


Figure I. 1: Principe du fonctionnement d'une cellule solaire PV

I.1.2. Différentes technologies de cellules solaires PV :

Les cellules photovoltaïques se répartissent en plusieurs catégories, principalement en fonction du matériau semi-conducteur qui les compose. Le rendement d'une cellule désigne sa capacité à convertir la lumière qui la frappe en énergie électrique. Actuellement, la grande majorité des cellules disponibles dans le commerce sont fabriquées à base de silicium.

A La première génération : Silicium cristallin

Cette génération de cellules photovoltaïques, qui représente actuellement la technologie dominante sur le marché, se divise en deux catégories principales : le silicium monocristallin et le silicium poly cristallin. Le silicium monocristallin reste plus cher que le silicium poly cristallin, mais il présente un rendement supérieur, d'environ 19.8% contre 24.7% lors des tests en laboratoire [4].

A Silicium monocristallin :

La cellule monocristalline se caractérise par sa grande similitude avec le modèle théorique idéal. Son procédé de fabrication consiste à solidifier du silicium fondu pour former

un seul cristal de grande dimension. Ce cristal est ensuite découpé en fines feuilles qui forment les cellules photovoltaïques. Cependant, cette méthode de production est complexe et consomme de grandes quantités d'énergie. En conséquence, le rendement de conversion actuel se situe entre 14 et 16% [4].

B Silicium poly cristallin :

À l'inverse de la cellule monocristalline, la cellule poly cristalline ne nécessite pas de silicium de haute pureté ni une structure cristalline fine. Son procédé de fabrication consiste à refondre les déchets issus de la production de cellules monocristallines, puis à solidifier le matériau obtenu sous forme de lingots, qui sont ensuite découpés en plaquettes. En termes de performance, les rendements de conversion industriels, qui se situaient entre 8 et 10% avant 1980, est passés à niveau compris entre 16 et 17%. Cette technologie occupe actuellement une position de premier plan sur le marché des cellules photovoltaïques, grâce à sa combinaison des rendements compétitifs et d'un coût de production inférieur à celui des cellules monocristallines [4].

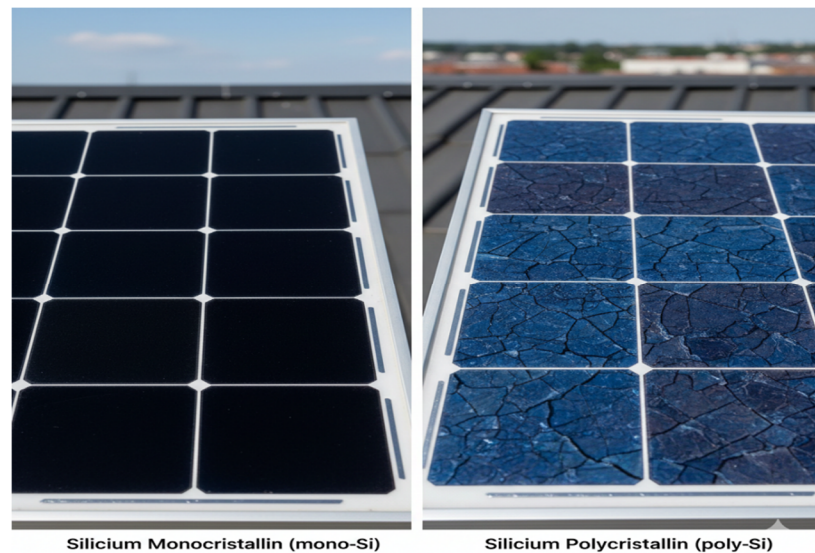


Figure I. 2 : Cellules solaires PV monocristallines et poly cristallines

B La deuxième génération : Couches minces

Les couches minces sont obtenues par dépôt de semi-conducteurs sur un substrat, qu'il soit rigide ou flexible. Trois technologies dominent cette famille, bien qu'elles ne représentent pas plus que 20% du marché photovoltaïque : le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe) et le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) [5].

- **Le silicium amorphe (a-Si) :**

Les cellules en silicium amorphe sont constituées d'une couche de silicium hydrogéné (non cristallin) sur un substrat en verre. Leur coefficient d'absorption élevé les rend particulièrement adaptées aux applications grand public, telles que les calculatrices et les montres solaires. L'un de ses avantages les plus importants est leur capacité à fonctionner dans des conditions de faible luminosité, y compris en intérieur ou partiellement ombragées.

Toutefois, leur rendement de conversion reste modeste, avec des valeurs comprises entre 5 et 8% en laboratoire, et pouvant atteindre 13% dans des conditions d'utilisation réelles. Cependant, la faible épaisseur de la couche de principe actif et leur coût de production extrêmement bas constituent deux atouts concurrentiels majeurs [6].



Figure I. 3 : Cellule solaire PV en silicium amorphe

- **Le tellure de cadmium (CdTe) :**

Le tellure de cadmium (CdTe) représente une technologie photovoltaïque très prometteuse, avec des rendements en laboratoire atteignant 16.5%, une performance tout à fait acceptable. Sa bande interdite de 1.45 eV, parfaitement alignée sur le spectre solaire, associée à un très fort coefficient d'absorption, permet la création d'un matériau extrêmement opaque qui absorbe une large partie de spectre pour une épaisseur de seulement 2 μm . Cependant, le développement des panneaux CdTe est fortement freiné par les préoccupations environnementales liées à l'utilisation du cadmium, un métal toxique dont l'emploi est déjà restreint dans d'autres applications telles que les piles [7].

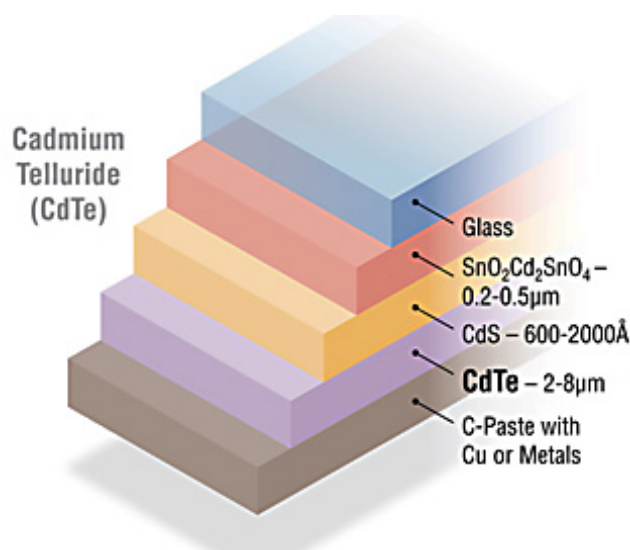


Figure I. 4 : Cellule solaire à base de CdTe

- **Le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) :**

La technologie CIGS est basée sur le dépôt d'une fine couche de chalcopyrite tricalcique (cuivre, indium, gallium et sélénium) sur des substrats rigides (vitreux) ou flexibles (plastiques). Grâce à un coefficient d'absorption exceptionnel, l'épaisseur de la couche active est réduite à un centième de celle des cellules cristallines traditionnelles. L'utilisation des métaux alcalins lourds, tels que le césium et le rubidium, en remplacement du sodium et du potassium, a amélioré la qualité de la couche et a permis d'atteindre des rendements records : 20.8% sur des substrats flexibles et 22.3% sur des substrats rigides. Bien que la technologie CIGS soit plus coûteuse à produire que la technologie CdTe, elle offre une alternative moins toxique, une stabilité supérieure et une plus grande durabilité, ce qui suscite un intérêt croissant pour les applications spatiales [8].

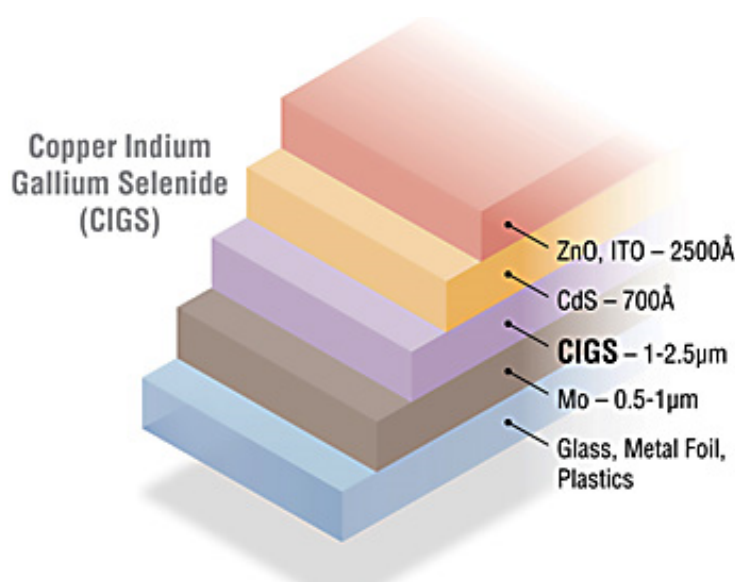


Figure I. 5 : Cellule solaire à base de CIGS

C La troisième génération : Cellules organiques

Les cellules photovoltaïques organiques constituent une technologie révolutionnaire qui exploite les propriétés optiques des semi-conducteurs et des colorants organiques. Bien que ses débuts aient été caractérisés par des performances modestes, les travaux pionniers de Tang en 1986 ont confirmé les prédictions de Merrit (1978) d'atteindre un rendement de conversion de 0.95% via une structure bicouche. Cette filière est divisée en deux branches principales : les cellules « humides » et les cellules à polymères organiques « plastiques ». Malgré le progrès rapide de l'efficacité, qui approche désormais les 6% en laboratoire, la durabilité à long terme de ces dispositifs reste limitée en raison de leur instabilité intrinsèque et leur courte durée de vie (environ 1000 heures) [9].

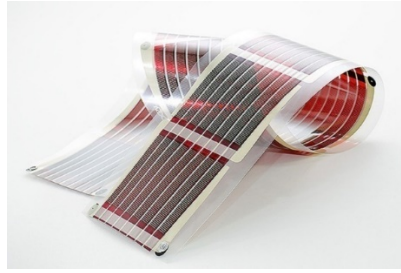


Figure I. 6 : Cellule solaire organique

I.1.3. Le choix du silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) :

A Le silicium amorphe hydrogéné :

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) est un matériau appartenant à la famille des semi-conducteurs. Il a été découvert au début des années 1960 et a d'abord été jugé inutilisable en raison de nombreux défauts de structure. Cependant, vers la fin de cette décennie, le chercheur Chittick a noté qu'en déposant du silicium amorphe à l'aide d'un plasma de silane (SiH_4), plus de 99.9% des défauts étaient saturés d'hydrogène. Cette découverte a rendu le matériau utilisable comme semi-conducteur et a immédiatement suscité l'intérêt de la communauté scientifique, donnant lieu à des recherches intensives [10].

B La structure du silicium amorphe hydrogéné :

La différence entre la matière amorphe et la matière cristalline réside dans leur structure atomique : la première est caractérisée par un désordre structurel, c'est-à-dire l'absence d'ordre à longue portée, tandis qu'un certain ordre subsiste à courte distance.

Le silicium amorphe conserve une structure tétraédrique à celle du silicium cristallin, chaque atome de silicium étant situé au centre de quatre liaisons covalentes. Cependant, en raison de distorsions aléatoires dans sa structure, des liaisons insaturées (ou rompues) apparaissent.

Ces liaisons rompues présentent un comportement oscillatoire, lié à la présence d'un seul électron sur l'atome de silicium en question. Cette propriété influe grandement sur les propriétés électroniques du matériau. En effet, un deuxième électron peut se lier à cette liaison insaturée, formant un centre chargé négativement : la liaison insaturée agit alors comme un piège à électrons. Inversement, un électron isolé peut quitter l'atome, laissant derrière lui un centre chargé positivement : la liaison insaturée agit alors comme piège à trous [11].



Figure I. 7 : Un schéma de la structure du silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H)

C Principe du silicium amorphe hydrogéné :

- **Rôle de l'hydrogène :**

L'introduction d'hydrogène affecte les propriétés électroniques du silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) de plusieurs manières. Premièrement, le silicium amorphe présente moins de défauts et est donc plus utilisable, notamment en réduisant le nombre de liaisons insaturées. Deuxièmement, en se liant aux atomes de silicium, il provoque la disparition de certains états localisés, ce qui entraîne une augmentation de la bande interdite optique et une diminution de la pente des queues de bande.

En l'absence de l'hydrogène, la densité des liaisons insaturées serait d'environ 10^{19} cm^{-3} , la bande interdite optique serait d'environ 1.2 eV et le dopage serait impossible. On a également observé que la bande interdite optique varie entre environ 1.2 et 2 eV lorsque la concentration atomique d'hydrogène passe de 0% à 50%. Cet effet a été exploité dans les cellules solaires à base de silicium amorphe (a-Si :H) pour ajuster leur sensibilité spectrale. La concentration en hydrogène doit être comprise entre 6% et 35%, ce qui dépasse largement la densité requise pour passiver les liaisons insaturées à elles seules.

Cependant, une introduction excessive d'hydrogène peut entraîner la rupture de liaisons et la formation de nouvelles liaisons insaturées. L'équilibre est ainsi atteint [11].

D Les avantages et les inconvénients du (a-Si :H) :

- **Les avantages :**

- Il peut être placé sur de grandes surfaces.
- Il peut être déposé sur des surfaces non planes ou souples : il est utile pour le dépôt sur des cylindres ou des sphères (axe de symétrie).
- Facilité de fabrication [12].
- Coefficient d'absorption élevé de la lumière visible.
- Il fonctionne même à des niveaux de luminosité extrêmement faibles.

- **Les inconvénients :**

- Nombreux défauts structurels.

- En raison de la réduction du mouvement libre du porteur, il souffre d'un problème de dégradation des performances causé par l'exposition à la lumière : c'est l'effet Staebler-Wronski.
- Le rendement est bien inférieur à celui de silicium cristallin (entre 5% et 7% disponibles dans le commerce).
- L'industrie reste à la traîne par rapport aux technologies cristallines [12].

I.2. Limitation des PV en environnements à haute température :

I.2.1. Effet de la température sur les cellules PV :

La température est un facteur crucial dans le comportement des cellules solaires, car elles sont exposées au rayonnement solaire.

La haute température entraîne une montée du courant de court-circuit (I_{cc}), tout en ayant un impact négatif sur la tension en circuit ouvert. Plus la température augmente, plus la tension en circuit ouvert diminue. Identiquement à cette dernière, la puissance maximale du générateur diminue avec l'augmentation de la température [13].

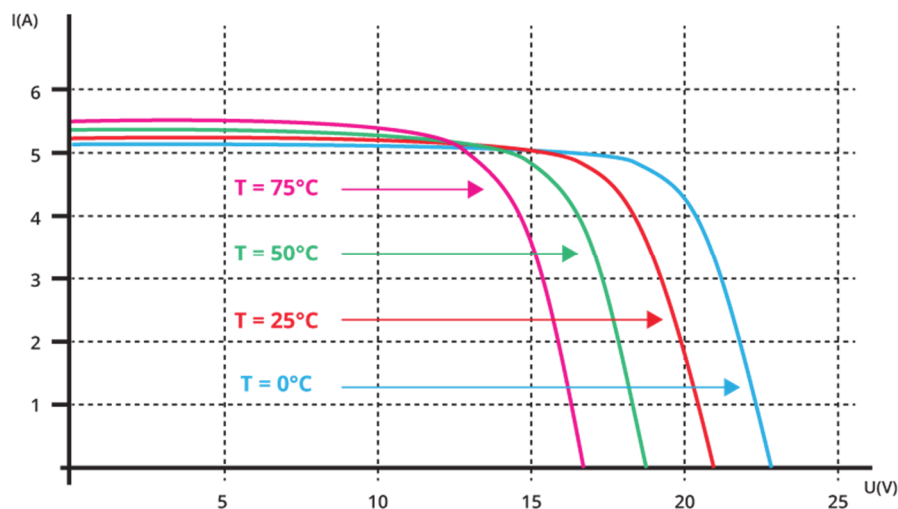


Figure I. 8 : Effet de la température sur la caractéristique I-V

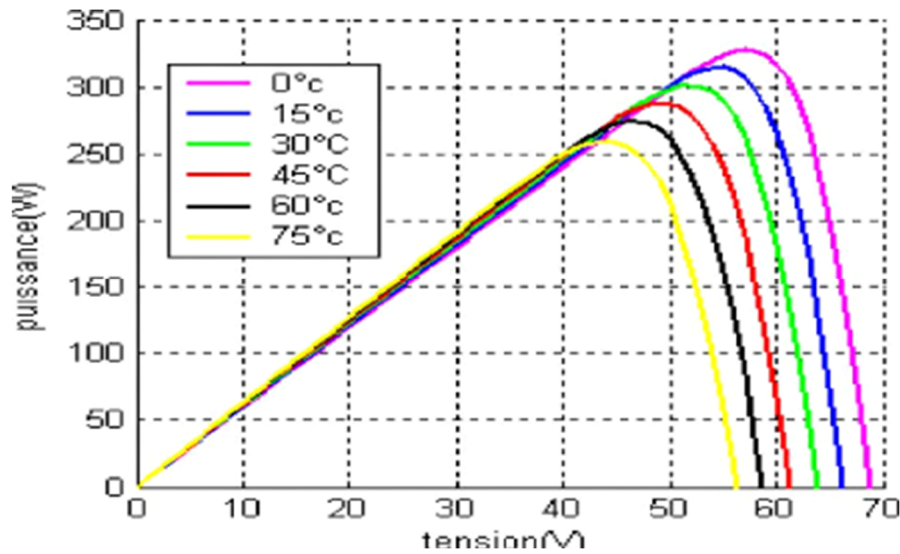


Figure I. 9 : Effet de la température sur la caractéristique P-V

I.2.2. Effet de la température sur le silicium amorphe :

Le silicium cristallin présente une perte d'énergie d'environ 0.4% par °C, ce qui équivaut à une diminution de 16% pour une différence de température de 40°C (par exemple entre 25°C et 65°C). En comparaison, le silicium amorphe est affecté par une température plus basse : grâce à sa bande interdite plus large (1.77 eV), son énergie maximale ne diminue que de 0.2% par °C.

Cette différence a un impact significatif sur la production d'énergie. Cela explique pourquoi, même dans les régions très ensoleillées, le silicium amorphe produit plus de KWh par Wc installé que le silicium cristallin. Ce dernier est fortement affecté par les températures élevées, ce qui réduit son efficacité.

De nombreuses études récentes confirment cette observation. Dans les climats désertiques, malgré l'ensoleillement intense, les températures élevées permettent au silicium amorphe de produire plus d'énergie tout au long de l'année, à capacité installée égale [12].

I.3. Présentation des modules TEG (Bi₂Te₃) et le principe thermoélectrique :

I.3.1. Introduction à la thermoélectricité :

L'effet thermoélectrique désigne un phénomène physique propre à certains matériaux, qui permet le transfert d'énergie. En utilisant un élément thermoélectrique, la chaleur peut être transformée directement en énergie électrique (pour produire de l'énergie), ou inversement, la chaleur peut être transférée en appliquant un courant électrique (dans les applications de

refroidissement). Ce procédé permet donc une conversion mutuelle entre énergie thermique et énergie électrique [14].

I.3.2. Les effets thermoélectriques :

Les effets thermoélectriques ont d'abord été observés dans les métaux, puis dans les semi-conducteurs.

A Effet Seebeck :

Lorsque deux matériaux distincts, A et B, sont mis en contact tout en maintenant des températures différentes à leurs points de contact, une force électromotrice est générée : c'est ce qu'on appelle l'effet Seebeck. La tension résultante est directement proportionnelle à la différence de température entre le point de contact chaud et le point de contact froid. Le coefficient Seebeck, aussi connu sous le nom de pouvoir thermoélectrique, est la constante qui fait le lien entre ces deux valeurs, et il est exprimé en volts par kelvin (V/K), et noté α_{AB} ou S [15].

$$S = \alpha_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (I.1)$$

Avec :

S ou α_{AB} : coefficient Seebeck du couple de matériau.

ΔV : différence de potentiel mesurée.

ΔT : différence de température appliquée.

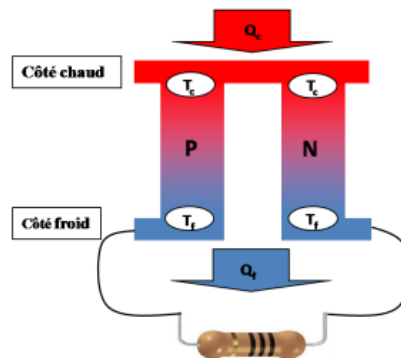


Figure I. 10 : Schéma descriptif de l'effet Seebeck

B Effet Peltier :

Jean-Charles Peltier, physicien français, a fait une découverte en 1834 concernant l'effet Peltier, un phénomène thermoélectrique qui autorise le déplacement de chaleur via un courant électrique. Le dispositif est basé sur le flux d'un courant électrique I à travers deux substances, A et B, reliés par deux jonctions. Ce flux produit de la chaleur Q à l'une des jonctions, tout en provoquant à l'autre une absorption de chaleur. Le coefficient de Peltier π_{AB} représente le rapport entre la chaleur émise et l'intensité du courant électrique [15].

$$\pi_{AB} = \frac{dQ}{dI} \quad (I.2)$$

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B \quad (I.3)$$

Avec :

π_{AB} : coefficient Peltier du couple.

Q : chaleur mesurée.

I : courant électrique.

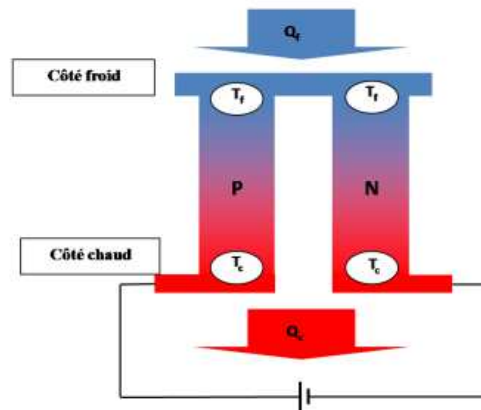


Figure I. 11 : Schéma descriptif de l'effet Peltier

L'effet Peltier concerne le transfert d'entropie effectué par les porteurs de charge (électrons ou trous) à l'intérieur du matériau. Quand un courant électrique passe à travers une jonction constituée de deux matériaux distincts, un transfert thermique se produit à la surface de la jonction. Ainsi, à l'une des jonctions, les porteurs de charge absorbent de la chaleur en gagnant de l'entropie lorsqu'ils passent d'un matériau à l'autre, tandis qu'à l'autre jonction, ils libèrent de la chaleur en perdant de l'entropie. Ce phénomène explique la présence simultanée d'une absorption de chaleur à une jonction et de sa libération à l'autre [15].

C Effet Thomson :

Lord Kelvin, de son vrai nom William Thomson, a découvert l'effet Thomson en 1851. Cette découverte établit la relation entre la diffusion thermique et le passage le courant électrique au sein d'un même matériau thermoélectrique. Lord Kelvin a ainsi démontré la relation entre les effets de Seebeck et de Peltier. Cette corrélation se produit quand un courant électrique de densité J passe à travers un conducteur uniforme exposé à un gradient de température $dT(x)/dx$ (avec x indiquant une coordonnée spatiale) [15]. La relation suivante exprime la quantité de chaleur générée ou capturée par le conducteur :

$$Q = \mu \cdot J \cdot \frac{dT(x)}{dx} \quad (I.4)$$

Avec : μ le coefficient de Thomson.

Les relations suivantes établissent un lien entre le coefficient de Thomson, le coefficient de Seebeck et le coefficient de Peltier :

$$\mu = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (I.5)$$

$$\pi = \alpha \cdot T \quad (I.6)$$

En comparaison avec les effets Seebeck et Peltier, l'effet Thomson est unique en ce qu'il ne nécessite pas de connexion entre deux matériaux différents, mais peut être observé au sein d'un seul matériau. Ces trois phénomènes décrivent ensemble la caractéristique des matériaux thermoélectriques, c'est-à-dire leur capacité à convertir une source de chaleur en énergie électrique, ou inversement, à convertir un courant électrique en énergie thermique [15].

I.3.3. Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques :

Les propriétés d'un matériau thermoélectrique sont mesurées par un nombre sans dimension appelé le facteur de mérite ZT , qui est donné par la relation suivante [16]:

$$ZT = T \cdot S^2 \cdot \frac{\sigma}{\lambda} \quad (I.7)$$

Avec :

T : la température absolue (K).

S : coefficient de Seebeck (V/K).

σ : conductivité électrique ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$).

λ : conductivité thermique (W/m.K).

L'amélioration des matériaux thermoélectrique implique un compromis fondamental. Pour améliorer la conductivité électrique, il est nécessaire d'accroître la concentration des porteurs de charge. Cependant, cette augmentation entraîne généralement deux effets négatifs : une réduction du coefficient de Seebeck et une hausse de la conductivité thermique. En conséquence, le facteur de mérite se fige, voire diminue. La Figure 1.12 illustre cette corrélation en traçant la progression de ces trois paramètres en fonction du logarithme de la concentration des porteurs de charge, pour trois classes de matériaux : isolants, semi-conducteurs et métaux [16].

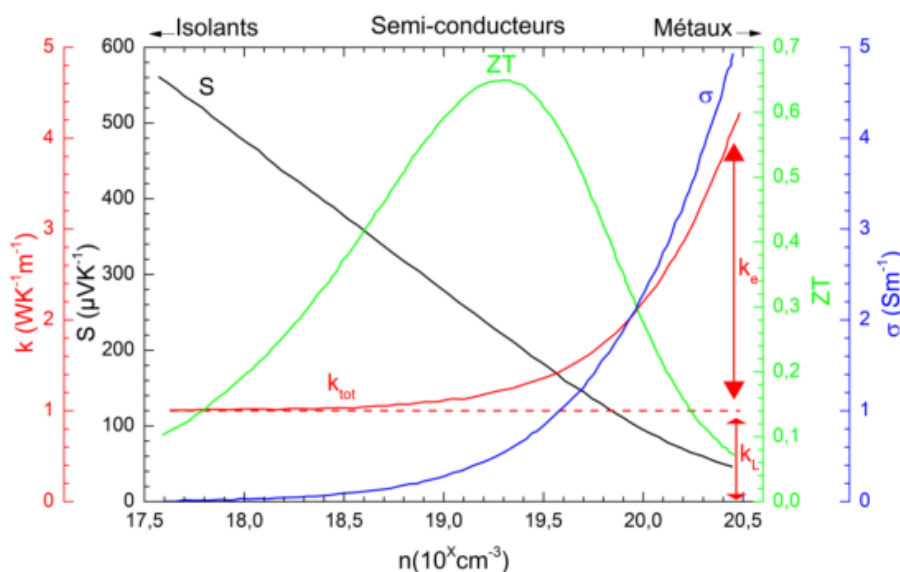


Figure I. 12 : Les propriétés thermoélectriques en fonction de la concentration de porteurs de charge (n) [17]

I.3.4. Matériau (Bi_2Te_3) :

Le tellure de bismuth (Bi_2Te_3) a été le premier matériau utilisé dans la fabrication de composants thermoélectriques en raison de ses bonnes performances à température ambiante. Aujourd'hui encore, la plupart des dispositifs thermoélectriques repose sur cet alliage, disponible sous différents états : massif, couches minces ou micro-poudre [18].

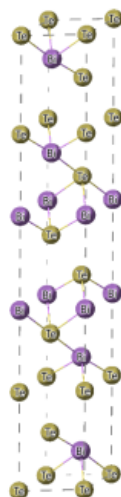


Figure I. 13 : Structure cristalline du tellure de bismuth (Bi_2Te_3)

A Dispositifs à base de Bi_2Te_3 massif :

Grâce aux progrès réalisés dans les technologies de coupe et d'usure, il est désormais possible de fabriquer des tampons très petits à partir de tellure de bismuth (Bi_2Te_3). Par exemple l'entreprise "Thermix" propose une gamme de refroidisseurs micro-thermiques aux

caractéristiques diverses. Dans ces unités fabriquées en tellurure de bismuth massif, la longueur de chaque coussinet varie entre 0.7 et 1 mm, tandis que son épaisseur varie entre 0.7 et 1.6 mm. Les dimensions globales du dispositif varient entre 1 et 1.6 mm, et le nombre de jonctions (ou couples) varie entre 4 et 128 [18].



Figure I. 14 : Convertisseur thermoélectrique à base de Bi_2Te_3 massif

Les performances de ces transformateurs permettent d'obtenir :

- **En mode refroidisseur**, une différence de 68 K pour un courant maximal allant de 0.4 à 1.8 A selon les dispositifs.
- **En mode générateur de puissance**, il peut fournir une puissance maximale de 12 W pour une différence de température de 68 K [18].

B Dispositifs à base de couches minces de Bi_2Te_3 :

L'explosion de la microélectronique à la fin du siècle passé a déclenché un changement radical dans le progrès des matériaux et leur insertion dans des transformateurs. Bi_2Te_3 a suivi cette tendance sans exception [18].

- **Modules Micropelt :**

L'objectif consiste à élaborer des matériaux du type n sur un substrat de silicium (wafer) et des matériaux de type p sur un second substrat, qui est distinct du substrat initial (Voir Figure 1.15) [18].

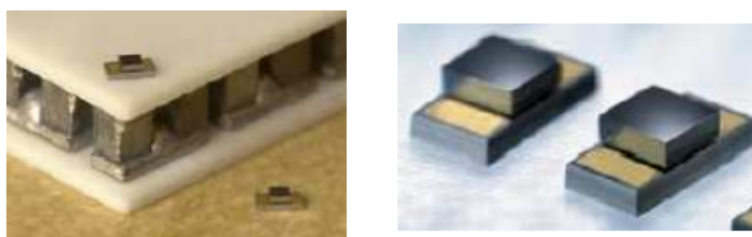


Figure I. 15 : Miniaturisation du Micropelt par rapport à un Peltier massif commercial et son agrandissement

La Figure 1.16 représente un wafer contenant un type de matériau, avant l'étape de découpage et d'assemblage.

Les dimensions de cet appareil sont : 0.72 mm^2 pour la partie froide (partie supérieure), et 1.47 mm^2 pour la partie chaude (partie inférieure), avec une épaisseur totale de 0.45 mm [18].

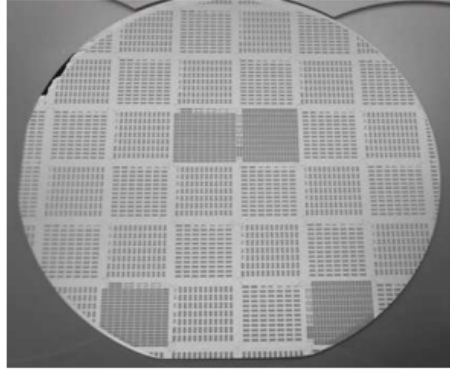


Figure I. 16 : Dispositifs Micropelt au stade de wafer après dépôt du matériau thermoélectrique sur les électrodes déposées préalablement

De plus, la Figure 1.17 illustre les développements qui ont été réalisés et qui sont prévus en ce qui concerne l'ingénierie et la forme de ces dispositifs [18].

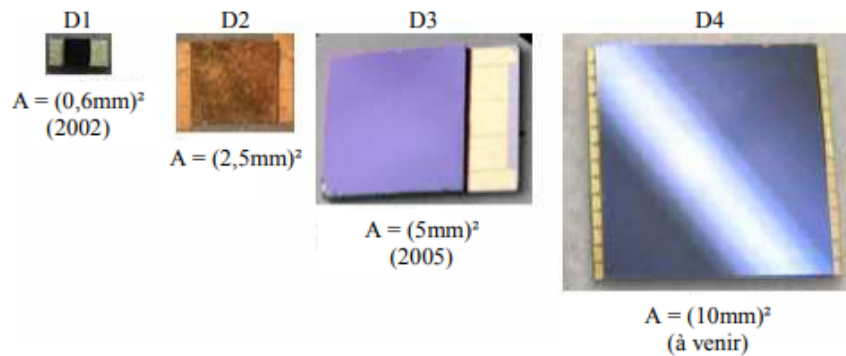


Figure I. 17 : État de l'art des dispositifs Micropelt et évolution de la surface A des faces froides

- **En mode refroidisseur** (dispositif D1 de la Figure 1.17, 12 jonctions), une variation thermique de 32 K peut être effectuée avec un courant de 1.8 A . Pour une différence de température de 20 K , la capacité de refroidissement est de 300 mW .
- **En mode générateur de puissance** (dispositif D3 de la Figure 1.17, 450 jonctions), une tension électrique d'à peu près 2 V est générée pour une variation de température de 20 K , en plus d'une puissance de 1.7 mW [18].

- **Modules JPL :**

Par ailleurs, le Jet Propulsion Laboratory (JPL) a développé un module thermoélectrique basé sur Bi_2Te_3 / $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ (dispositif D2). Le substrat utilisé est de verre ou de l'oxyde contenant 63 jonctions. Le dispositif a des dimensions de 1.7 mm^2 . Les unités ont une épaisseur de $20 \mu\text{m}$ et sont connectées électriquement entre eux par des connecteurs métalliques [18].

Les performances de cet appareil sont :

- **En mode refroidissement**, une différence de température de 2 K est atteinte à un courant de 110 mA.
- **En mode générateur de puissance**, $1 \mu\text{W}$ de puissance est généré à une différence de température de 1.25 K [18].

C Dispositifs à base de micro-poudre de Bi_2Te_3 :

L'une des idées novatrices consistait à fabriquer des dispositifs Bi_2Te_3 sous forme de poudre micronisée. Cette idée était innovante en raison de la rareté des études menées sur les poudres de Bi_2Te_3 , ainsi que du fait qu'aucun dispositif n'avait été fabriqué de cette manière auparavant.

Ces composants ont permis de démontrer la viabilité de ce convertisseur à base de μ -poudre de Bi_2Te_3 .

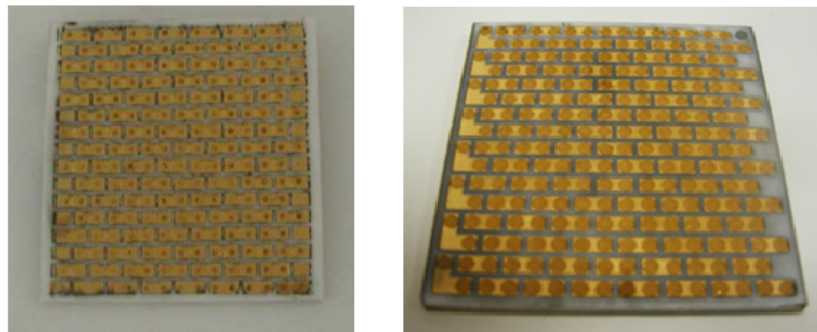


Figure I. 18 : Convertisseurs thermoélectriques réalisés à base de μ -poudre de Bi_2Te_3

I.3.5. Structure et fonctionnement des TEG :

Un module thermoélectrique (TEG) est un générateur à semi-conducteurs qui utilise les effets thermoélectriques pour générer de l'énergie ou pour le refroidissement. Il est constitué de plusieurs paires thermoélectriques (paires de matériaux de type n et de type p) connectées électriquement en série et en parallèle au niveau thermique. Cet ensemble est placé entre deux substrats électriquement isolants et thermiquement conducteurs [17].

Les phénomènes thermoélectriques mentionnés ci-dessus sont principalement utilisés dans deux modes de conversion de l'énergie : la production d'électricité via un flux thermique (effet Seebeck) et la génération de froid ou de chaleur via un courant électrique (effet Peltier). Ces fonctions sont assurées par un dispositif spécial : le module thermoélectrique [19].

Cependant, leur mode de fonctionnement diffère selon l'application : en mode générateur de chaleur (effet Seebeck), l'unité produit un courant électrique lorsqu'une différence de température est maintenue entre ses deux faces. En mode pompe à chaleur, l'unité est alimentée par un générateur électrique ; selon le sens du courant, il peut refroidir ou chauffer l'une de ses faces [19].

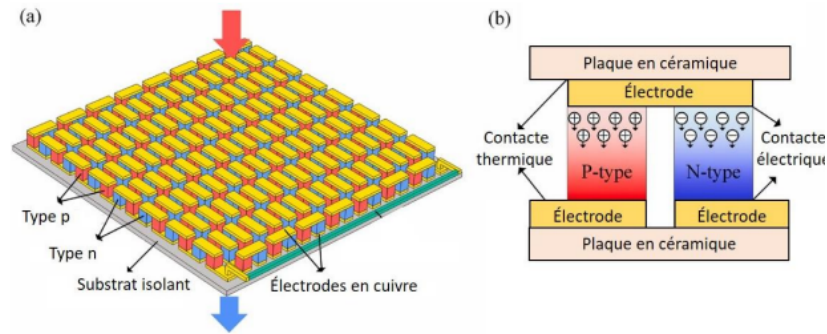


Figure I. 19 : Illustration schématique du module TEG (a) et (b) une structure détaillée d'une paire individuelle de thermocouples à l'intérieur du module

I.4. Intérêt des systèmes hybrides PV-TEG :

Les panneaux photovoltaïques exposés à des niveaux élevés de rayonnement solaire constatent leur performance diminuer puisque la température sur leur surface captant la lumière peut augmenter jusqu'à 60 à 80°C. On intègre des mécanismes de refroidissement afin de diminuer cette chaleur, cependant ces dispositifs consomment l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques [20].

I.4.1. Le principe du couplage PV-TEG :

L'approche la plus efficace consiste à intégrer le système de cellules photovoltaïques avec un module thermoélectrique (TEG) monté à l'arrière. Cet appareil fonctionne en mode génération (effet Seebeck), où la chaleur traversant le panneau est convertie en électricité supplémentaire. Ainsi, ce couplage PV-TEG permet d'utiliser la chaleur résiduelle, généralement nocive, et d'augmenter la production globale d'énergie sans consommation externe [20].

I.4.2. Le concept d'hybridation PV-TEG :

Cette hybridation offre un double avantage : une production d'électricité accrue et réduction des contraintes thermiques sur les cellules, améliorant ainsi l'efficacité globale du système. L'amélioration de ces systèmes fait l'objet de nombreuses études, tant expérimentales que numériques.

Cette étude propose une analyse complète des dernières découvertes scientifiques concernant les fondements théoriques des cellules photovoltaïques et thermoélectriques, identifie les architectures d'intégration les plus importantes pour les systèmes hybrides et analyse les travaux récents visant à maximiser leur efficacité énergétique [21].

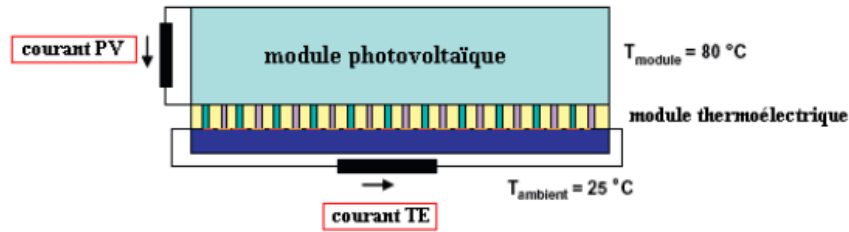


Figure I. 20 : Schéma d'un module hybride photovoltaïque-thermoélectrique

I.5. Environnements industriels à haute température :

I.5.1. La chaleur industrielle :

Le secteur industriel représente 21% de l'usage final global d'énergie à l'échelle nationale. Les combustibles, notamment ceux importés issus de combustibles fossiles, représentent la source majeure d'énergie employée pour la génération de chaleur dans l'industrie. Cette chaleur se produit pendant l'exécution d'un processus. Par exemple, quand le four est en marche, seulement 20 à 40% de l'énergie provenant du combustible utilisé se transforme en chaleur utile, ce qui signifie que 60 à 80% est de la chaleur résiduelle récupérable [22].

Cette chaleur est également appelée chaleur fatale ou résiduelle, elle s'agit de la chaleur produite par les machines lors de la fabrication de produits et de sous-produits. Cette chaleur peut être produite intentionnellement ou émise par un simple processus de fabrication industrielle [23].

Heureusement, de nombreux professionnels de l'énergie et de l'industrie étudient des moyens de capter cette chaleur. Le principe de base de cette technologie repose sur la conversion de la chaleur en électricité grâce à des procédés thermoélectriques. Bien que son développement ne soit pas encore achevé, ce système repose sur plusieurs éléments clés : des capteurs thermiques captent la chaleur, qui est ensuite transférée, et éventuellement stockée, par un réseau de tuyaux vers des transformateurs pour la convertir en énergie électrique [23].

I.5.2. Les fours industriels :

Un four industriel est essentiellement défini comme une chambre thermiquement isolée conçue pour exposer des matériaux à des températures élevées. Cependant, sa fonction va bien au-delà de celle d'un simple générateur de chaleur ; c'est un instrument de précision essentiel dans de nombreux secteurs. De l'électronique aux industries lourdes, en passant par l'industrie pharmaceutique et agroalimentaire, cet appareil permet des transformations chimiques et physiques précises au sein des matières premières [24].

A Fondamentaux et rôle des fours industriels :

Les fours industriels sont conçus pour fonctionner à haute température et sont des chambres spécialisées utilisées dans de multiples applications. Ces fours sont indispensables pour des procédés de base tels que le durcissement, le séchage et la cuisson. Sa fonction principale est de fournir des conditions thermiques contrôlées avec précision, permettant

d'atteindre les propriétés physiques requises et garantissant que les produits finaux répondent aux normes de qualité les plus élevées.

Pour répondre aux exigences spécifiques de chaque processus de fabrication, cet équipement peut fonctionner avec différentes sources d'énergie (électricité, gaz, carburant alternatif). Il est équipé d'unités de contrôle de température avancées, qui assurent une montée en température uniforme et constante, préservant ainsi l'uniformité et l'intégrité des pièces traitées [25].

B Les applications des fours industriels :

Les fours industriels sont utilisés dans une vaste gamme d'applications à travers divers secteurs. Voici quelques exemples :

- **Industrie automobile :** les fours industriels assurent le séchage des peintures, le traitement thermique des métaux et le durcissement des adhésifs afin de garantir la qualité, la résistance et la durabilité.
- **Industrie aérospatiale :** les fours industriels sont utilisés pour durcir les matériaux composites, traiter thermiquement les pièces métalliques afin de répondre aux normes et sécher les peintures et les revêtements sur les composants d'aéronefs.
- **Industrie alimentaire :** les fours industriels permettent de cuire uniformément des produits comme le pain et les biscuits, et assurent le séchage des fruits et les légumes afin d'allonger leur durée de conservation.
- **Industrie pharmaceutique :** les fours industriels assurent le séchage précis des principes actifs, la stérilisation des équipements et le durcissement des enrobages des comprimés afin de garantir leur efficacité et stabilité.
- **Industrie électronique :** les fours industriels sont essentiels à la fabrication de produits électroniques. Ce procédé consiste à renforcer les revêtements protecteurs des composants sensibles, à sécher les circuits imprimés après la soudure et à traiter thermiquement les matériaux ; autant d'étapes qui garantissent la longévité, les performances et la fiabilité des dispositifs.
- **Industrie chimique :** les fours industriels sont utilisés pour sécher les produits afin d'éliminer l'humidité, durcir les revêtements et traiter thermiquement les matériaux pour leur conférer des propriétés chimiques spécifiques [25].

I.5.3. Les cheminées industrielles :

Une cheminée est une structure contenant un ou plusieurs conduits conçus pour évacuer les gaz d'échappement dans l'atmosphère.

Lorsqu'un site comprend une chaudière (pour la production d'eau chaude ou de vapeur), une station de combustion ou un ou plusieurs fours, il y aura une cheminée industrielle.

A Fonctionnement d'une cheminée :

Une cheminée industrielle remplit deux fonctions principales. La première méthode consiste à extraire les vapeurs en le plaçant au fond de la chaudière, on génère une pression négative qui permet d'extraire le gaz de combustion. La seconde consiste en la libération de ces

vapeurs et leur dispersion dans l'atmosphère. Dans ce contexte, la hauteur de la cheminée contribue à une meilleure dilution de la concentration des polluants, réduisant ainsi leur impact environnemental [26].

B Domaines d'application des cheminées industrielles :

Les cheminées industrielles sont principalement utilisées dans les secteurs qui produisent de grandes quantités de fumée. On les trouve dans :

- **L'industrie chimique** : phytosanitaire, pharmaceutique, oléo-chimie.
- **Le stockage** : produits pétroliers, gaziers et d'huile.
- **Le secteur d'énergie et des utilités** : nucléaire, thermique, énergies renouvelables, gestionnaire de réseaux).
- **L'agro-industrie** : agroalimentaire, papier-carton, bioénergie, biomatériaux, huiles essentielles, cosmétiques).
- **La pétrochimie** : fabrication de composés à partir du pétrole ou du gaz naturel.
- **Les industries de transformation** : acier, métaux, bois, caoutchouc, polymères [26].

Conclusion :

Ce premier chapitre pose les bases théoriques et contextuelles nécessaires à l'étude des systèmes des cellules photovoltaïques thermoélectriques hybrides. Nous avons introduit les technologies des cellules photovoltaïques, en particulier le silicium amorphe (a-Si:H), et analysé leurs limitations dans les environnements à haute température. L'introduction des modules thermoélectriques (Bi_2Te_3) et du principe Seebeck a mis en évidence l'intégration des deux technologies. La description des environnements industriels chauds (fours, cheminées) a confirmé l'importance de ce cadre d'application. Ces fondements théoriques nous permettent désormais d'aborder la modélisation et l'analyse des performances du système photovoltaïque thermoélectrique hybride dans le chapitre suivant.

Références

- [1] H. & S. Z. Abdallah, Amélioration d'Efficacité Energétique d'un Système Hybride PV/T/TEG, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj : Doctoral dissertation, Faculté des sciences et de la technologie, 2025.
- [2] O. Nichiporuk, *Simulation, élaboration et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigués.*, Villeurbanne (France).: Institut National des Sciences Appliquées (INSA), 2005.
- [3] D. I. Benredjem Sami, *Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque*, Guelma : Département de Génie Electrotechnique et Automatique , 2021.
- [4] A. m. e. h. Fergani med el amine, *Production de l'énergie électrique par un panneau*, Annaba: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, 2020.
- [5] T. Mambrini, *Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies*, Paris: Université Paris Sud, 2015.
- [6] M. F. Zahra, *Modélisation et simulation des panneaux à couches minces à base de a-Si-H sous l'effet de l'ombrage partiel*, Tlemcen: UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN , 2022.
- [7] O. T. A. M. Y. KHEDIM Belhadj Abdelkarim, *Etude de fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques*, Tlemcen: UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, 2015.
- [8] P. M. R. Sharma, «Étude exhaustive sur la génération de cellules photovoltaïques et les facteurs influençant leurs performances : une revue,» *Mater Renew Sustain Energy*, vol. 14, n° 114, pp. 1-25, 2025.
- [9] A. Aida, *Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si*, Tlemcen: UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN, 2018.
- [10] A. Zohir, *Etude comparative par simulation numérique des cellules photovoltaïques à simple jonction à base de silicium*, Tlemcen: Université Aboubakr Belkaïd -Tlemcen-, 2017.
- [11] H. M. MECHEHOUD Hicham, *Simulation numérique d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H)*, Biskra: Université Mohamed Khider - Biskra, 2018.
- [12] M. S. DJELLOUT Thileli, *Etude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe.*, Tizi-ouzou: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017.
- [13] D. Meriem, *Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV*, Oum El Bouaghi: UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI -OUM EL BOUAGHI-, 2019.
- [14] B. Hafida, *Etude et appliactions des effets thermoélectriques des matériaux*, Bordj Bou Arreridj : Université Mohamed El Bachir Elibrahimi, 2018.

- [15] Z. Belkacem, *Etude et réalisation d'un dispositif hybride Photovoltaïque-Thermoélectrique*, Tizi-ouzou: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2019.
- [16] S. Ibtissem, *Etude et modélisation d'un générateur thermoélectrique*, Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen-, 2013.
- [17] B. Ahlam, *Simulation de nouveaux matériaux pour des modules générateurs thermoélectriques*, Mostaganem: Université Abd El Hamid Ibn Badis – Mostaganem, 2024.
- [18] A. O. BENCHAA Batoul, *Simulation et étude d'un module générateur thermoélectrique par le code COMSOL*, Mostaganem: Université Abdelhamid Ibn Badis -Mostaganem-, 2020.
- [19] E. YVENOU, *Développement de modules thermoélectriques imprimés et flexibles pour des applications à température ambiante*, Saint-Martin-d'Hères: Université Grenoble Alpes, 2017.
- [20] Z. Belkacem, *Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité*, Tizi-ouzou: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU , 2012.
- [21] U. J. M. J. S. R. M. .. W. J. W. Saleh, «Évaluation d'une configuration de système hybride PV-TEG pour une production d'énergie améliorée,» *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10, n° 12, pp. 385-400, 2021.
- [22] ADEME, «La chaleur fatale industrielle : enjeux et potentiel de récupération.,» *Actu-Environnement.*, Mars 2015. [En ligne]. Available: <https://www.actu-environnement.com>. [Accès le 27 Février 2026].
- [23] Spacewell, «Utiliser la chaleur perdue comme source d'énergie dans votre usine,» 2023. [En ligne]. Available: <https://www.Spacewell.com>. [Accès le 27 Février 2026].
- [24] K. Furnace, «Qu'est-ce qu'un four industriel et quelles industries l'utilisent ? Découvrez des solutions de traitement thermique polyvalentes,» Février 2026. [En ligne]. Available: fr.kintekfurnace.com. [Accès le 27 Février 2026].
- [25] L. Environmental, «libtestchamber,» 28 Juillet 2024. [En ligne]. Available: <https://fr.libtestchamber.com/>. [Accès le 27 Février 2026].
- [26] S. Mayouf, «Focus réglementaire : Cheminée industrielle,» 03 Février 2022. [En ligne]. Available: <https://ealico.com>. [Accès le 28 Février 2026].

Chapitre II :
Modélisation et Couplage
Des systèmes PV et TEG

Introduction :

La transition des systèmes photovoltaïques conventionnels vers des systèmes hybrides avancés est impérative pour améliorer l'efficacité de la conversion énergétique, notamment compte tenu des défis thermiques posés par les technologies du silicium amorphe (a-Si :H).

L'objectif principal de ce chapitre est de développer un cadre analytique permettant d'optimiser efficacement le rendement énergétique des cellules photovoltaïques.

Nous commencerons par examiner les différentes structures et configurations des cellules photovoltaïques, en nous concentrant particulièrement sur les cellules en silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H) à l'aide d'un modèle à une seule diode (Single-Diode Model). Nous étudierons ensuite les matériaux thermoélectriques, notamment le tellure de bismuth (Bi_2Te_3), et analyserons le fonctionnement du générateur thermoélectrique (TEG) à l'aide des équations de Seebeck et des flux de chaleur qu'il favorise. Le cœur de cette recherche réside dans la formulation du modèle hybride (PV-TEG), qui représente l'essence même de ce travail.

II.1. Caractéristiques et configurations des panneaux PV :

II.1.1. Les paramètres d'un panneau PV :

Les caractéristiques de base d'un panneau photovoltaïque sont les suivantes :

A La tension en circuit ouvert V_{co} :

Elle s'agit du potentiel électrique aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge [1].

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II. 1})$$

B Le courant de court-circuit I_{cc} :

Il représente la valeur du courant en cas de court-circuit de la cellule. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant I_{ph} [1].

C La puissance maximale P_{max} :

La puissance maximale P_{max} fournie par la cellule solaire est le résultat du produit maximal de la tension maximale appliquée et du courant maximal mesuré aux bornes de la cellule. La puissance maximale mesurée dans des conditions de référence (STC : Standard Test Condition, c.à.d. sous la lumière du soleil $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et à une température $T = 25^\circ\text{C}$) [1].

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (\text{II. 2})$$

D Le rendement η :

Le rendement énergétique d'une cellule est déterminé comme le rapport entre la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire qui arrive à la cellule photovoltaïque [1].

$$\eta = \frac{P_{max}}{E.S} = \frac{V_{co} I_{cc}}{P_i} FF \quad (II. 3)$$

E Le facteur de forme FF :

Ce facteur représente le rapport entre la puissance maximale que la cellule peut **délivrer** et la puissance formée par le rectangle $V_{co} \cdot I_{cc}$. Il est déterminé par la relation suivante [1] :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (II. 4)$$

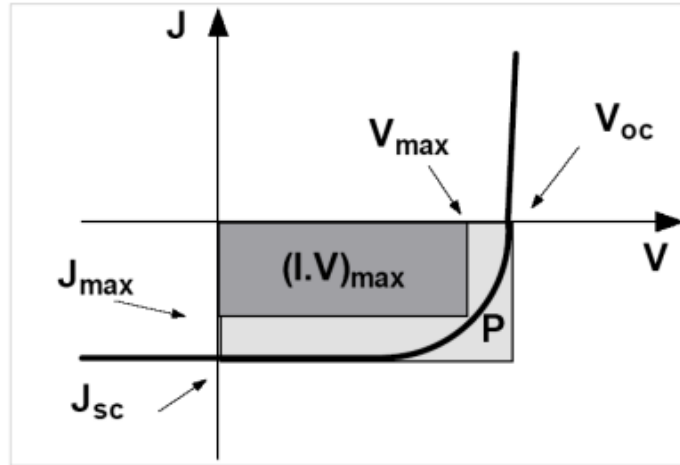


Figure II. 1 : Caractéristique J (V) d'une cellule solaire définitions les paramètres photovoltaïques [2]

II.1.2.Association des panneaux PV :

A Association en série :

Dans un montage en série (Figure II.2), le même courant passe à travers les cellules et la caractéristique obtenue du montage en série est déterminée par la somme des tensions à un courant spécifique [2].

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (II. 5)$$

$$V_{sco} = n_s \cdot V_{co} \quad (II. 6)$$

B Association en parallèle :

Dans un montage des cellules en parallèle (Figure II.3), les cellules sont exposées à la même tension et les courants se cumulent : la caractéristique obtenue est le résultat de l'addition des courants une certaine valeur de tension [2].

$$I_{pcc} = n_p \cdot I_{cc} \quad (II. 7)$$

$$V_{pco} = V_{co} \quad (II. 8)$$

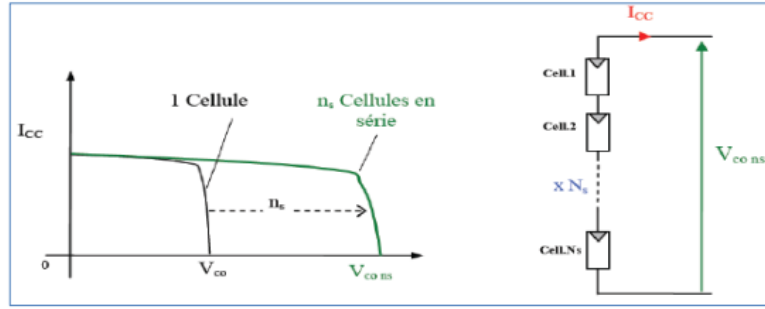


Figure II. 2 : Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série [1]

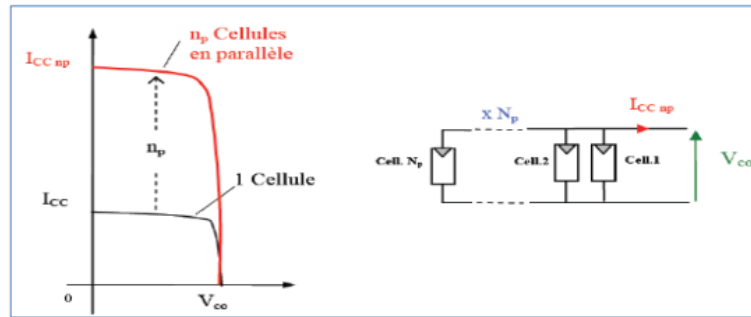


Figure II. 3 : Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle [1]

C Association mixte (série-parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est composé d'un assemblage de nombreux modules photovoltaïques montés aux panneaux photovoltaïques. Par conséquent, les caractéristiques globales de courant/tension électriques des cellules PV sont déduites théoriquement en combinant les propriétés des cellules primaires, supposées similaires, qui les constituent, à travers deux coefficients : n_s parallèle à l'axe de tension et n_p parallèle à l'axe de courant [2].

$$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc} \quad (\text{II. 9})$$

$$V_{co} = n_s \cdot V_{co} \quad (\text{II. 10})$$

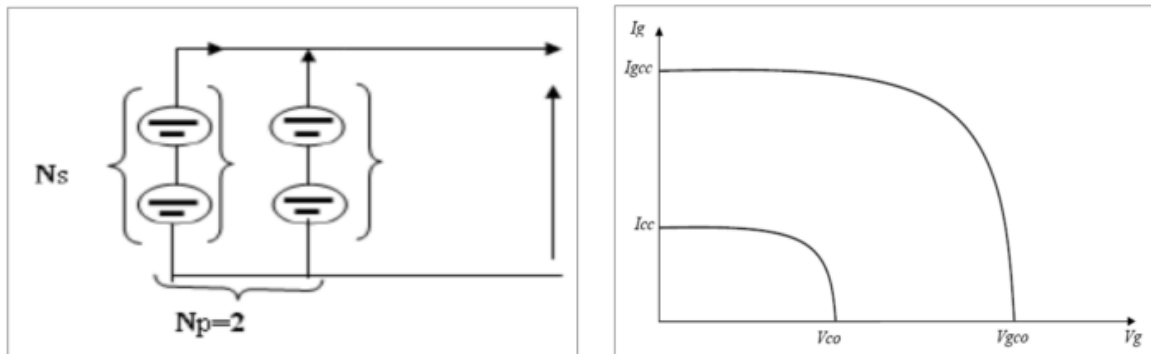


Figure II. 4 : Caractéristique d'un groupement mixte [2]

Les générateurs photovoltaïques sont conçus pour améliorer la tension (connexion en série) ou le courant (connexion en parallèle) en assemblant une multitude de cellules

élémentaires présentant la même technologie et des propriétés similaires. Les connexions en série et en parallèle sont utilisées afin d'acquérir un module PV (ou panneau PV) avec les spécifications nécessaires (courant et tension suffisants) [2].

II.1.3.Modèle idéal de la cellule PV :

La cellule solaire, dans sa conception, est basée sur un matériau semi-conducteur qui imite le comportement d'une jonction p-n, dont les caractéristiques courant-tension (I-V) sont décrites par l'équation de Shockley [3] :

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{q V_d}{a k T_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

I_d : est le courant généré par la diode.

V_d : est la tension aux bornes de la diode.

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode.

q : est la charge électronique ($q = -1.602 \times 10^{-19}$ Coulombs).

T_{cell} : est la température de la cellule en K.

a : est la diode facteur d'idéalité (sans dimension).

k : est la constante de Boltzmann ($k = 1.38065 \times 10^{-23}$ J/K).

La tension thermique de la diode est donnée par :

$$V_T = \frac{kT_{cell}}{q} \quad (\text{II. 12})$$

Alors l'équation (II.1) devient :

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{aV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 13})$$

II.1.4.Circuit équivalent de la cellule PV :

Dans des conditions idéales, la cellule solaire égalise électriquement un fournisseur de courant raccordé en parallèle avec une diode, comme illustrée sur la Figure II.5. Le courant produit par l'éclairage, appelé photo-courant, est représenté par le symbole I_{ph} , alors que le courant passe à travers la diode est représenté par le symbole I_d . Le courant et la tension de sortie aux bornes de la cellule sont respectivement désignés par les symboles I et V . Le courant de sortie I fourni par la cellule PV est défini par l'équation ci-dessous [3] :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II. 14})$$

En reportant I_d de l'équation (II.13) dans l'équation (II.14), il vient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{aV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 15})$$

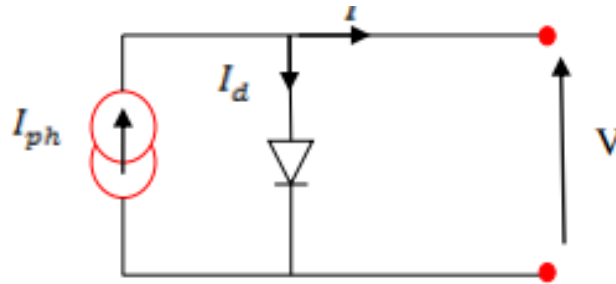


Figure II. 5 : Le circuit équivalent de la cellule PV idéale [4]

Le photo-courant I_{ph} croît linéairement avec l'éclairement solaire. Lorsque le courant de la diode I_d est faible, le courant fourni par la cellule photovoltaïque est élevé. Le facteur d'idéalité de la diode, noté a , prend la valeur 1 dans le cas d'un comportement parfaitement idéal. Inversement, une valeur de a supérieure à 1 indique un fonctionnement non optimal de la diode [3].

L'équation (II.13) montre que le modèle idéal de cellule idéale a trois paramètres qui doivent être déterminés : le photo-courant I_{ph} , le courant d'obscurité I_0 et le facteur d'idéalité de la diode a . Pour cette raison, ce modèle idéal est également appelé modèle à trois paramètres (modèle 3-p), comme illustré dans la Figure II.5 [3].

Bien que ce modèle de la cellule idéale permette de décrire le principe de fonctionnement de base d'une cellule photovoltaïque, il n'est jamais utilisé pour simuler des conditions de fonctionnement réelles ni pour fournir des informations sur la puissance maximale qu'une cellule peut fournir [3].

II.2. Modèle Single-Diode pour les panneaux a-Si :H :

II.2.1.Présentation du modèle Single-Diode :

Le modèle Single-Diode (SDM) est un circuit équivalent couramment utilisé pour décrire le comportement électrique des cellules solaires. Ce modèle permet la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) dans diverses conditions. Ce circuit est composé d'une source, d'une diode et de deux résistances connectées en série et en parallèle pour représenter les pertes internes. La diode imite le comportement d'une jonction p-n, tandis que les deux résistances prennent en compte les inconvénients pratiques du dispositif [5].

Bien que le modèle SDM soit largement utilisé, il repose sur l'hypothèse d'un comportement binaire idéal et ne rend pas pleinement comptes des mécanismes de recombinaison complexes présents dans la cellule solaire. De plus, sa précision diminue en conditions de faible luminosité et à proximité d'une tension de circuit ouvert [5].

II.2.2. Circuit équivalent du modèle Single-Diode :

A Modèle à 3 paramètres (modèle 3-p) :

Le modèle à trois paramètres représente le modèle idéal pour une cellule photovoltaïque. Dans ce modèle, la cellule PV est électriquement équivalente à une source de courant **associée**

en parallèle avec une diode. Le courant généré par l'éclairement, noté photo-courant, est désigné par I_{ph} , tandis que I_d représente le courant qui traverse la diode. Les trois paramètres caractéristiques de ce modèle sont : le courant de saturation inverse de la diode I_0 (équivalent au courant d'obscurité), le facteur d'idéalité a et le photo-courant I_{ph} [6].

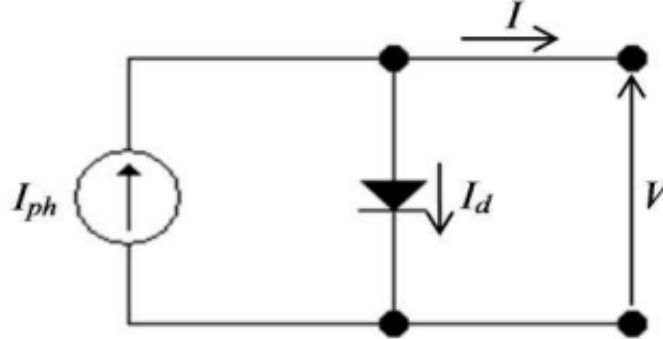


Figure II. 6 : Schéma équivalent du modèle 3-p [6]

En appliquant les lois de Kirchhoff, le courant I produit par la cellule PV est donné par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II. 16})$$

Où le courant I_d est défini par :

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{aV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 17})$$

En reportant l'équation (II.17) dans l'équation (II.16), il vient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{aV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II. 18})$$

B Modèle à 4 paramètres (modèle 4-p) :

Afin d'obtenir une visualisation plus exacte du fonctionnement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal à trois paramètres (modèle 3-p), un deuxième modèle a été développé. Il tient compte la résistance du matériau ainsi que les pertes ohmiques résultant des contacts. Dans le circuit équivalent, ces pertes sont exprimées par une résistance série R_s (Figure II.7), conduisant à un modèle à quatre paramètres, communément appelé modèle 4-p [6].

Ce modèle est constitué d'une source de courant qui est dépendante de la lumière, associée en parallèle avec un diode, est l'ensemble est connecté en série avec une résistance R_s [6].

D'après les lois de Kirchhoff, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II. 19})$$

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (\text{II. 20})$$

Où V_d est la tension de la diode.

Pour une résistance R_s non négligeable, le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{a V_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II. 21})$$

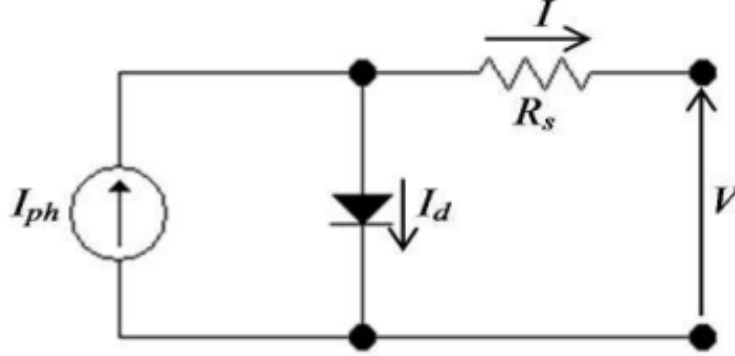


Figure II. 7 : Schéma équivalent du modèle 4-p [6]

En portant cette expression dans l'équation (II.19), on obtient la relation courant-tension suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{a V_T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II. 22})$$

C Modèle à 5 paramètres (modèle 5-p) :

Les cellules solaires étant fabriquées à partir d'un composant semi-conducteur en couche mince présentant une grande surface, des pertes par résistance shunt apparaissent au niveau de la couche N de la jonction P-N. La forme la plus courante de ces pertes est le court-circuit localisé ou le court-circuit au bord de la cellule (Castaner et Silvestre, 2002). Ces pertes sont généralement modélisées par une résistance agglomérée, noté R_{sh} , connectée en parallèle avec le modèle à quatre paramètres (modèle 4-p). Ensemble, ces transactions forment le modèle à cinq paramètres, également appelé modèle 5-p [6].

La Figure (II.8) montre le circuit équivalent correspondant : une source de courant connectée en parallèle avec une diode, plus les deux résistances R_s (série) et R_{sh} (parallèle) [6].

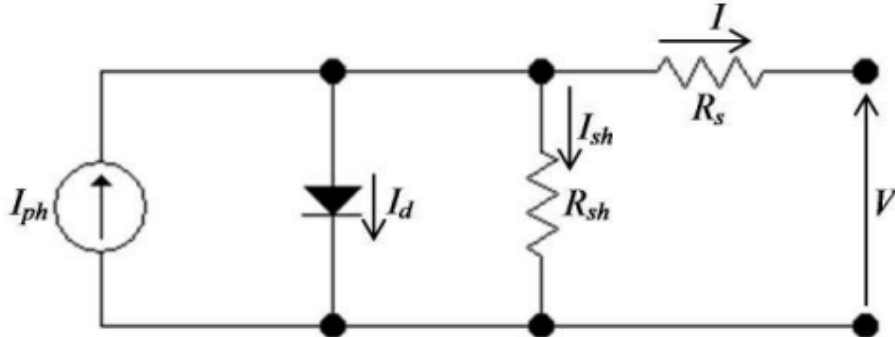


Figure II. 8 : Schéma équivalent du modèle 5-p [6]

On applique les lois de Kirchhoff, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II. 23})$$

$$I_{sh}R_{sh} = V + I.R_s \quad (\text{II. 24})$$

Donc le courant traversant la résistance shunt est défini par :

$$I_{sh} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II. 25})$$

Le courant I_d est déterminé à l'aide de la même expression que celle utilisée dans l'équation précédente (équation II.21).

En remplaçant les équations (II.21 et II.25) dans l'équation (II.23), on aboutit à l'expression suivante de la caractéristique courant-tension de ce modèle :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{aV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II. 26})$$

II.3. Etudes des matériaux thermoélectriques :

II.3.1.L'efficacité thermoélectrique :

Les matériaux thermoélectriques sont déterminés par trois critères :

- Le coefficient Seebeck S (V/K)
- La conductivité électrique σ ($\Omega^{-1}.\text{m}^{-1}$)
- La conductivité thermique λ (W/m.k)

Pour qu'un matériau thermoélectrique soit considéré comme une substance de haute qualité, il doit avoir un coefficient de Peltier ou de Seebeck élevé pour obtenir les effets souhaités. De plus, sa conductivité électrique élevée afin de réduire au minimum les pertes de chaleur dues à l'effet Joule. Une faible conductivité thermique est également nécessaire pour assurer une importante différence à travers le matériau [7].

Ces trois propriétés sont liées entre elles par un facteur sans dimension appelé facteur de mérite ZT . Un facteur de mérite élevé indique une qualité du matériau supérieure. Les meilleurs matériaux actuellement disponibles ont des valeurs de ZT légèrement supérieures à 1. En conséquence, l'efficacité de conversion d'énergie des modules thermoélectriques est limitée à environ de 7 à 15%. Cela signifie qu'entre 7 et 15% de la chaleur traversant le module thermoélectrique est transformée en énergie électrique, ou entre 7 et 15% d'électricité traversant le module est utilisée pour le refroidissement [7].

II.3.2.Propriétés thermoélectriques de Bi_2Te_3 :

Le tellurure de bismuth est un caractère semi-conducteur à faible bande interdite ($E_g = 0.12\text{V}$). Les Figures (II.9, II.10, II.11) illustrent l'évaluation des paramètres distincts, à savoir la conductivité thermique λ , la conductivité électrique σ , le coefficient de Seebeck S ainsi que le facteur de mérite ZT de Bi_2Te_3 par rapport à la température [8].

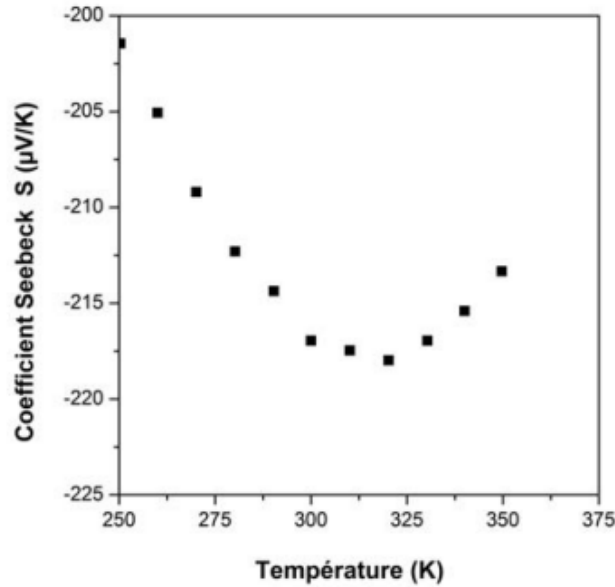


Figure II. 9 : Evolution de coefficient de Seebeck en fonction de la température [8]

Le tellure de bismuth a un coefficient de Seebeck négatif, atteignant une valeur maximale de $-218 \mu\text{V/K}$ à 320 K. Les valeurs négatives indiquent que le tellure de bismuth se comporte comme un semi-conducteur de type n [8].

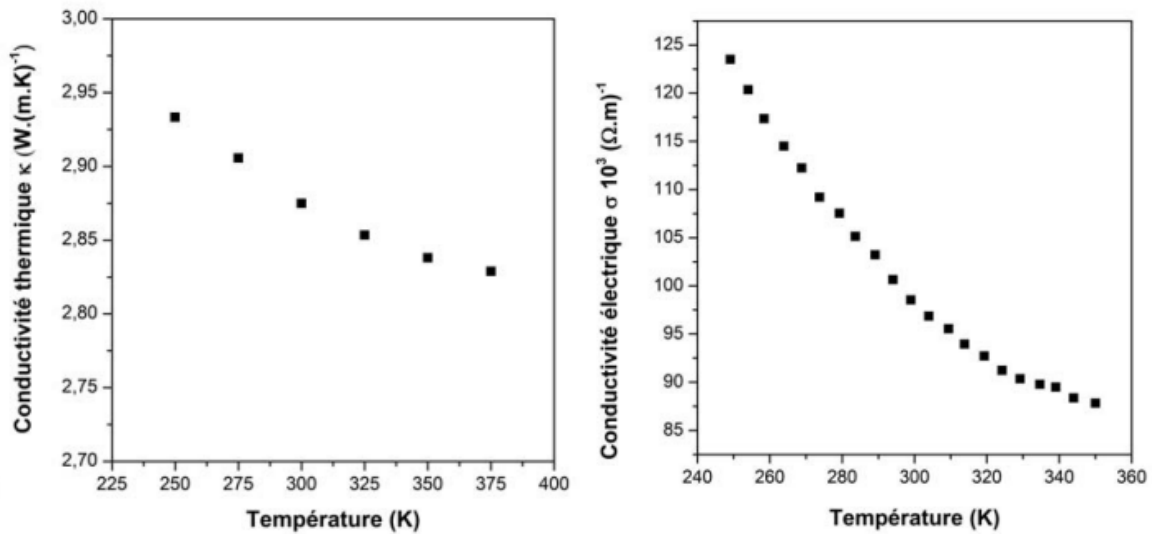


Figure II. 10 : Evolution de la conductivité thermique et électrique en fonction de la température [8]

Le tellure de bismuth possède une conductivité thermique particulièrement élevée, variant de 3 et 2.80 W/m.K et diminue avec l'augmentation de la température. Cette réduction de la contribution k_e , qui est proportionnelle à la conductivité électrique σ [8].

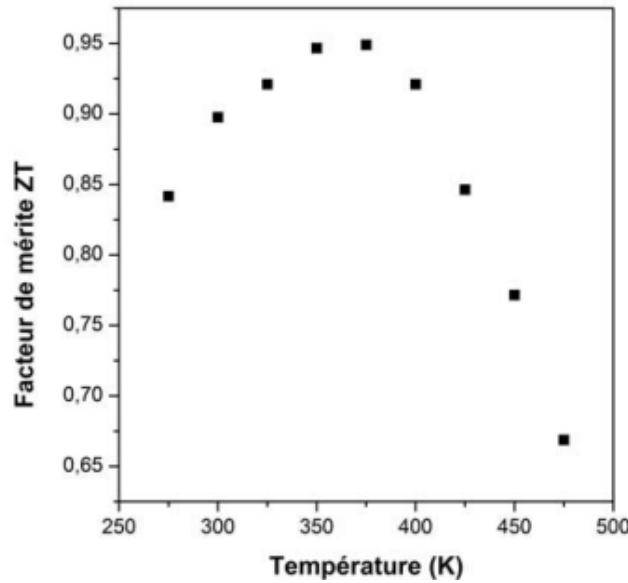


Figure II. 11 : Evolution de facteur de mérite en fonction de la température [8]

La courbe de facteur du mérite ZT selon de la température indique que le facteur de mérite du tellurure de bismuth atteint sa valeur maximale de 0.93 à 400 K et de 0.73 à 300 K, le plaçant parmi les matériaux les plus performants à température ambiante [8].

II.3.3.Optimisation des matériaux thermoélectriques :

Les propriétés des matériaux thermoélectriques sont étroitement liées aux performances de l'échangeur de chaleur, une optimisation est donc souvent nécessaire. Par exemple, en cas de fortes variations de température, l'utilisation de différents types de matériaux thermoélectriques est importante. Par exemple, à des températures supérieures à 300°C, le matériau Bi_2Te_3 commence à se dégrader. Espinoza et al, ont étudié la structure d'un générateur thermoélectrique simple composé de $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Zn}_4\text{Sb}_3$ (pour les hautes températures) suivi de matériaux à base de tellurure de bismuth le long d'un échangeur de chaleur fixe. Ils ont amélioré le rapport des matériaux utilisés à haute température, ainsi que les nombres de thermo-éléments, afin de maximiser les performances du générateur thermoélectrique [9].

Les paramètres d'entrée utilisés ont été dérivés d'un ensemble de points de fonctionnement tirés d'un cycle d'un moteur de camion typique. En présentant deux types différents de connections des modules thermoélectriques (en série ou séparés), ils ont pu analyser l'effet de ces connections. Kumar et al, ont conçus plusieurs échangeurs de chaleur améliorés pour les applications automobiles en utilisant une configuration hybride (un mélange de tellurure de bismuth avec les Skutterudites) pour augmenter la production électrique du système à une température constante à l'intérieur du TEG. Cependant, malgré l'utilisation répandue de modèles pour comprendre les différents phénomènes se produisant dans les générateurs thermoélectriques, on ne peut pas en dire autant de leur utilisation dans l'optimisation réelle de ces générateurs [9].

Des améliorations ont déjà été apportées, mais elles n'ont pas pris en compte les variations des propriétés thermoélectriques en fonction de la température, bien que ces

variations puissent devenir substantielles des certaines conditions, par exemple, dans le cas de forts gradients de température [9].

II.3.4. Groupement des couples thermoélectriques :

Le couple thermoélectrique de base est un générateur de très faible par rapport aux nécessités de la majorité des applications à l'échelle domestique ou industrielle. Un couple de base d'une surface de quelques dizaines de centimètres carrés peut générer, au maximum, quelques watts à une tension inférieure à un volt, qui est généralement la tension associée à la tension de jonction PN [10].

A Groupement en série :

Une connexion de N_s couples thermoélectriques en série augmente la tension du générateur thermoélectrique (TEG). Chaque couple transporte un courant égal, et les caractéristiques résultantes de cette connexion sont calculées en additionnant les tensions principales de chaque paire, comme indiqué sur la Figure (II.12). L'équation (II.27, II.28) résume les propriétés électriques d'une connexion en série de N_s couples thermoélectriques [10].

$$V_{sco} = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{II. 27})$$

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (\text{II. 28})$$

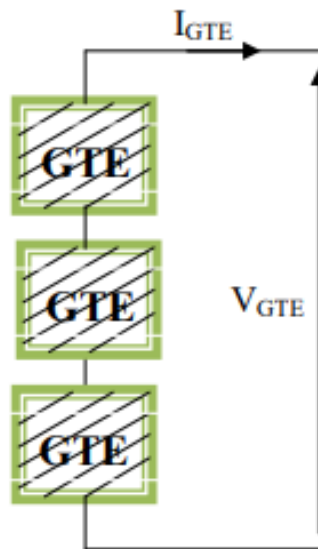


Figure II. 12 : Groupement de N_s couples thermoélectriques en série [10]

B Groupement en parallèle :

Il est possible de connecter N_p couples en parallèle, ce qui permet une augmentation du courant sortant du générateur résultant. Dans un ensemble de couples similaires associés en parallèle, les couples sont soumis à la même tension, et la caractéristique obtenue de l'ensemble est provenant de l'addition des courants, comme indiqué sur la Figure (II.13). L'équation (II.29,

II.30) résume les caractéristiques électriques de la connexion des N_p couples thermoélectriques en parallèle [10].

$$V_{pco} = V_{co} \quad (\text{II. 29})$$

$$I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (\text{II. 30})$$

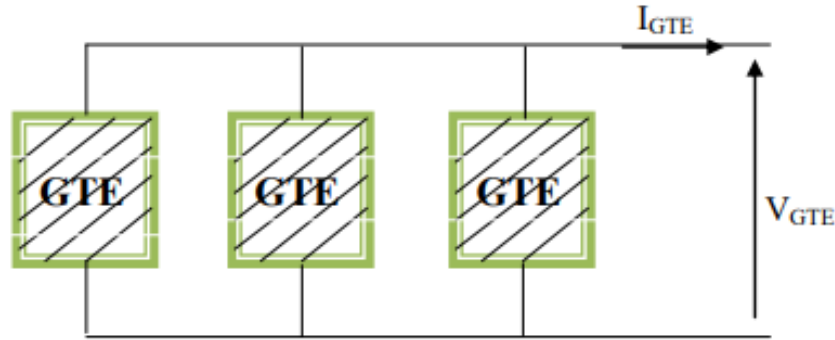


Figure II. 13 : Groupement de N_p couples thermoélectriques en parallèle [10]

II.4. Modélisation du générateur thermoélectrique (TEG) :

II.4.1. Les générateurs thermoélectriques :

Les générateurs thermoélectriques assurent la transformation directe la chaleur en électricité. Ils sont composés d'un ensemble de modules thermoélectriques placés entre deux convertisseurs thermiques. Chaque dispositif thermoélectrique est composé de plusieurs dizaines à des centaines de paires de matériaux semi-conducteurs, qui permettent la transformation directe d'une partie de la chaleur traversant en énergie électrique [11].

II.4.2. Conversion d'énergie par effets thermoélectriques :

Les applications exploitant les effets thermoélectriques se répartissent en deux catégories selon le type de conversion d'énergie : d'une part, la réfrigération par effet de Peltier, et d'autre part, la production d'énergie électrique par effet de Seebeck [11].

A Réfrigération par effet de Peltier :

En utilisant l'effet Peltier, la réfrigération thermique crée un cycle de pompage de chaleur entre les deux côtés d'un module thermoélectrique [11].

B Production d'énergie par effet de Seebeck :

La production d'électricité par un module thermoélectrique repose sur l'effet Seebeck, qui convertit la différence de chaleur appliquée en courant électrique. Le générateur thermoélectrique se compose d'une collection de thermocouples reliés électriquement en série et en parallèle sur le plan thermique. Chaque thermocouple est composé de deux matériaux différents, reliés par un connecteur métallique. Les deux plaques en céramique servent de collecteurs et d'évacuateurs de chaleur, l'une à l'extrémité chaude et l'autre à l'extrémité froide. Ces deux plaques transfèrent la chaleur tout en étant électriquement isolants, afin d'éviter tout

court-circuit entre les thermocouples. Le rendement de ce genre de module dû à sa conception, de la qualité des matériaux thermoélectriques utilisés et de la charge connectée à ses sorties [11].

$$S = \alpha_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (\text{II. 31})$$

Avec :

S ou α_{AB} : coefficient Seebeck du couple de matériau.

ΔV : différence de potentiel mesurée.

ΔT : différence de température appliquée.

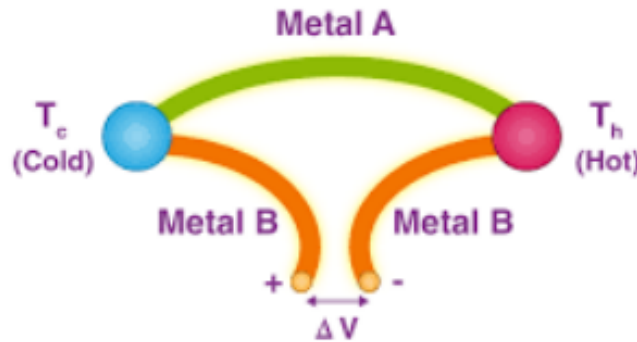


Figure II. 14 : Schéma explicative de l'effet de Seebeck [13]

C Explication du phénomène (effet Seebeck) :

Supposons qu'il existe deux matériaux semi-conducteurs A et B, de type n et de type p respectivement. Lorsqu'un écart de température est imposé entre ces deux substances, l'effet Seebeck apparaît. Ce processus découle du déplacement des porteurs de charge de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide du matériau : électrons (e^-) dans les semi-conducteurs de type n, alors que les trous (e^+) dans les semi-conducteurs de type p. Dans un circuit ouvert, les électrons se concentrent dans la zone froide d'un semi-conducteur de type n, alors que les trous se regroupent dans la partie froide d'un semi-conducteur de type p. Par conséquent, l'extrémité froide du matériau de type n se charge de manière négative, tandis que celle du matériau de type p reçoit une charge positive. Cette dissociation des charges crée un écart du potentiel entre les extrémités froides des deux dispositifs. [13].

II.4.3. Modèle électrique équivalent :

Un générateur thermoélectrique atteint sa puissance maximale lorsque sa résistance interne est égale à la résistance de la charge qui y est connectée. En pratique, on peut facilement mesurer cette puissance maximale lorsqu'il y a une variation de température au niveau du dispositif [14].

Pour obtenir une mesure précise de la puissance de sortie tout en minimisant les fluctuations causées par l'effet Peltier, un circuit électrique approprié a été conçu. Ce circuit est constitué de deux boucles connectées au module. La première mesure, lorsque l'interrupteur est en position (0), donne la tension en circuit ouvert V_{co} . La deuxième mesure, lorsque l'interrupteur est en position (1), donne une tension de court-circuit V_{cc} et un courant de court-circuit I_{cc} sous une résistance de charge R_L allant de $2\ \Omega$ à $22\ \Omega$. L'interrupteur ne permet d'activer qu'une seule boucle à la fois lorsqu'une boucle est fermée, l'autre s'ouvre automatiquement, et inversement (Figure II.15) [14].

Il convient de noter que V_{MTE} et R_m représentent respectivement la tension résultante de l'effet Seebeck et la résistance interne du module. Toutes les mesures ont été effectuées une fois l'état d'équilibre atteint [14].

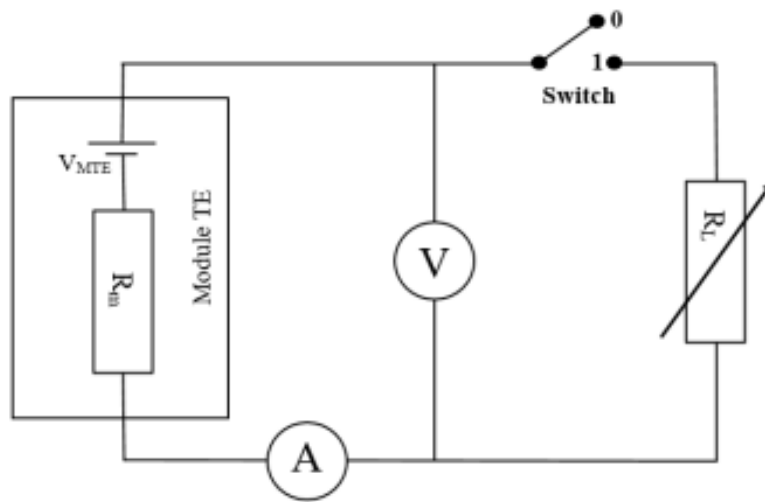


Figure II. 15 : Schéma du circuit électrique du banc d'essai [14]

A La résistivité électrique :

La résistivité électrique est une propriété fondamentale qui détermine la capacité d'un matériau à résister au passage du courant électrique. Une valeur de résistivité élevée indique que le matériau est un peu conducteur d'électricité. La résistivité est généralement symbolisée par ρ et se mesure en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$). Par exemple, un matériau ayant une résistivité de $1\ \Omega$ est équivalent à un cube de dimension $1m \times 1m \times 1m$, où la résistance mesurée entre deux faces opposées est de $1\ \Omega$ [14].

Par conséquent, la résistivité électrique ρ est définie par la formule suivante :

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\text{II. 32})$$

Où :

R : la résistance électrique (Ω).

A : la section transversale (m^2).

l : la longueur de la pièce (m).

B La conductivité électrique :

La conductivité électrique, également appelée conductivité spécifique, est l'inverse de la résistivité électrique. Elle détermine la capacité du matériau à conduire le courant électrique. Elle est généralement symbolisée par σ , et son unité de mesure est le siemens par mètre (S/m) [14]:

$$\sigma = 1/\rho \quad (\text{II. 33})$$

II.4.4.Modèle thermique équivalent :

A La conductivité thermique :

La conductivité thermique, notée λ ou k , est la propriété qui détermine la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Elle est principalement évaluée à l'aide de la loi de Fourier sur la conductivité thermique. Le transfert de chaleur est plus lent dans les matériaux à faible conductivité thermique que dans les matériaux à conductivité thermique élevée. Par conséquent, les matériaux à conductivité thermique élevée sont largement utilisés dans les applications de dissipateurs, tandis que les matériaux à faible conductivité thermique sont utilisés comme isolants thermiques. La conductivité thermique se mesure en watts par mètre-kelvin (W/m.k) et dépend souvent de la température [14].

L'effet de la température sur la conductivité thermique varie selon que le matériau est métallique ou non-métallique. Dans les métaux, la conductivité thermique est principalement déterminée par les électrons libres. Dans les non-métaux, cependant, cela est principalement attribué aux vibrations du réseau cristallin (phonons). En général, la conductivité thermique des semi-conducteurs se compose de deux composantes principales : la composante de réseau ou de phonon (λ_L) et la composante d'électron (ou de trou) (λ_e) [14].

II.4.5.Circuit équivalent du TEG :

Lors du processus de conversion d'énergie, le générateur thermoélectrique absorbe la chaleur par son extrémité chaude et la libère par son extrémité froide. Au cours de ce processus, l'effet Seebeck s'accompagne de deux autres phénomènes : l'effet Peltier, qui produit de la chaleur à partir du courant électrique, et l'effet Thomson, qui produit également de la chaleur en raison de l'effet combiné de la différence de température entre les bornes du générateur thermoélectrique et du courant électrique. Cependant, l'effet Thomson est généralement négligé en raison de son impact minimal sur la puissance résultante. L'équation d'énergie d'un TEG s'exprime comme suit [12] :

$$Q_{TEG} = q_H - q_C \quad (\text{II. 34})$$

Où q_H et q_C sont respectivement l'énergie aux extrémités chaude et froide du TEG, définies par :

$$q_H = \alpha T_H I - \frac{1}{2} R I^2 + K(T_H - T_C) \quad (\text{II. 35})$$

$$q_c = \alpha T_C I + \frac{1}{2} R I^2 + K(T_H - T_C) \quad (\text{II. 36})$$

Où :

α : coefficient de Seebeck.

T_H : température du côté chaude (k).

T_C : température du côté froid (k).

I : courant électrique (A).

R : résistance électrique interne (Ω).

K : conductance thermique du module (W/k).

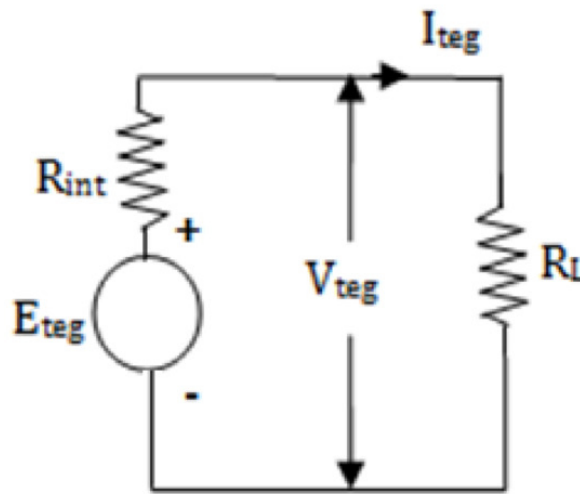


Figure II. 16 : Le circuit équivalent du TEG [12]

II.5. Couplage photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TEG) :

II.5.1.Intégration de PV avec le TEG :

Le groupe énergétique hybride PV-TEG est conçu pour convertir efficacement le rayonnement solaire incident en électricité. Les cellules PV classiques n'utilisent qu'une petite fraction du rayonnement solaire pour produire de l'électricité, tandis que la plus grande partie de l'énergie incidente est convertie en chaleur. Cette chaleur résiduelle augmente la température des cellules, réduisant ainsi le rendement du système d'énergie PV. Le système hybride proposé intègre un générateur thermoélectrique (TEG) équipé de dissipateurs thermiques pour récupérer cette chaleur perdue. Cela permet de générer l'énergie électrique supplémentaire tout en réduisant simultanément la température des cellules photovoltaïques [12].

II.5.2.Objectifs de conception :

La conception du système hybride répond à cinq objectifs clés. Le premier objectif est de maximiser la productivité énergétique globale en intégrant les contributions photovoltaïques, thermoélectrique et thermique. Le deuxième objectif est de réduire la perte d'efficacité des cellules photovoltaïques due aux températures élevées. Le troisième objectif est d'augmenter

la durée de vie des composants, notamment les cellules PV. Le quatrième objectif vise à récupérer et utiliser la chaleur qui serait autrement gaspillée. Enfin, le cinquième objectif concerne l'utilisation des composants disponibles localement pour faciliter la réplication du système dans d'autres contextes [15].

II.5.3. Modèle électrique du PV-TEG :

La température de surface des panneaux PV peut atteindre 80°C, ce qui diminue le rendement des cellules solaires. L'idée est de tirer une partie de cette chaleur intense en plaçant des modules thermoélectriques sur la face arrière des panneaux PV. Cette chaleur intense atteint les modules thermoélectriques d'un côté, tandis que l'autre côté est exposé à une température ambiante 25°C. Grâce à l'effet Seebeck, cette différence de température produit un courant électrique. Par conséquent, le courant total généré par le système hybride est le suivant [16] :

$$I_{total} = I_{PV} + I_{TEG} \quad (\text{II. 37})$$

Avec :

I_{PV} : courant photovoltaïque.

I_{TEG} : courant thermoélectrique.

La puissance totale fournie par le système est égale à la somme de puissance produite par le panneau PV et de puissance générée par le module thermoélectrique :

$$P_{total} = P_{PV} + P_{TEG} \quad (\text{II. 38})$$

Le rendement du système hybride (PV-TEG) est défini comme la suite :

$$\eta_{total} = \eta_{PV} + (1 - \eta_{PV})\eta_{TEG} \quad (\text{II. 39})$$

II.5.4. Modèle thermique :

Le modèle thermique du panneau est basé sur un bilan énergétique. L'énergie entrante correspond au rayonnement solaire incident. Une partie de cette énergie est convertie en énergie électrique (énergie utile), tandis que le reste est dissipé sous forme de chaleur transférée à l'absorbeur (énergie perdue) [15].

$$Q_{perdue} = G.S(1 - \eta_{PV}) \quad (\text{II. 40})$$

Avec :

Q_{perdue} : énergie thermique perdue par le panneau PV (W).

G : rayonnement solaire incident (W/m²).

S : surface du panneau PV (m²).

η_{PV} : rendement du panneau PV.

Cette chaleur résiduelle peut être récupérée à l'aide des modules thermoélectriques placés en contact direct avec la face arrière du panneau. Ces modules convertissent l'énergie thermique en électricité [15].

II.5.5. Circuit équivalent du système hybride (PV-TEG) :

La Figure (II.17) montre le circuit électrique équivalent du dispositif hybride PV-TEG. Dans ce schéma, I_{ph} représente le photo-courant, I_d le courant de saturation inverse de la diode et I_{sh} le courant traversant la résistance parallèle (shunt). R_{sh} fait référence à la résistance shunt de cellule PV, R_s à sa résistance série (résistance interne), tandis que R_{TEG} est la résistance interne du générateur thermoélectrique (TEG). Le courant traversant la charge est désigné par I . Enfin, la tension fournie par le système hybride (tension de sortie) est donnée par l'équation suivante [17] :

$$V_{total} = V_{PV} + V_{TEG} \quad (II. 41)$$

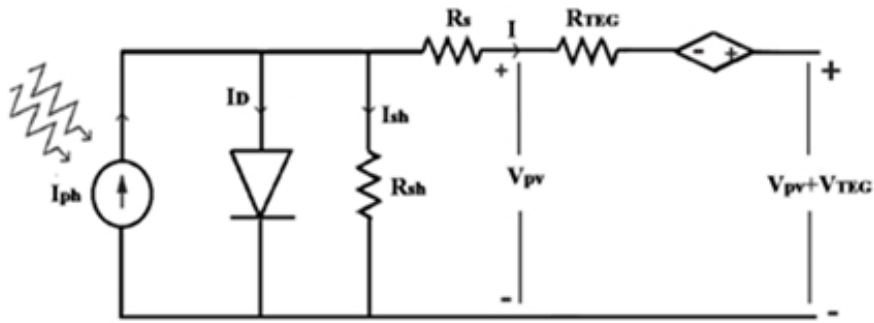


Figure II. 17 : Circuit électrique équivalent d'un dispositif hybride PV-TEG [17]

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a fourni une description analytique complète de tous les composants du système hybride. Cette modélisation a permis de mettre en évidence la relation étroite et l'interaction continue entre les données thermiques et électriques, confirmant le rôle primordial du gradient thermique dans la détermination de la puissance de sortie du générateur thermoélectrique.

Les équations et les modèles développés dans ce chapitre, notamment ceux relatifs à la connexion entre les panneaux photovoltaïques et les générateurs thermoélectriques, constituant désormais la base du processus de simulation. S'appuyant sur ces résultats théoriques, le chapitre suivant abordera la phase d'application numérique à l'aide de Python afin d'estimer les gains de puissance réels et d'analyser la réponse du système à diverses conditions climatiques, notamment le rayonnement solaire et les variations de température.

Références

- [1] D. Y. OTSMANE Ouisssem, *Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque à l'aide d'un algorithme de colonies de fourmis*, Blida: Université SAAD DAHLAB , 2020.
- [2] K. S. TARGAN Lyes, *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique*, TIZI-OUZOU: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, 2018.
- [3] D. I. Benredjem Sami, *Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque*, Guelma : Université 8 Mai 1945, 2021.
- [4] G. B. SAHOUR DOUNIA, *Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque*, Guelma: Université 8Mai 1945 , 2021.
- [5] E. Bellini, «New single-diode model tackles recombination losses in solar cells,» *pV magazine Australia*, 25 Février 2026.
- [6] B. Soumia, *Modélisation et simulation de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque*, TLEMCEN: UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID, 2017.
- [7] C. Saida, *Étude théorique des propriétés thermoélectriques des matériaux et leurs applications*, Bordj Bou Arreridj: Université Mohamed El Bachir Elibrahimi , 2023.
- [8] S. Jonathan, *Contribution à l'électrodéposition en milieu liquide ionique de tellurure de bismuth en vue de son dopage*, Villeneuve d'Ascq , France: Ecole doctorale SESAMES, 2013.
- [9] F. Camille, *Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité*, Pau, France: ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES EXACTES ET DE LEURS APPLICATIONS, 2014.
- [10] T. Asma, *Commande MPPT avancée d'un système de conversion d'énergie solaire : photovoltaïque et thermoélectrique*, Alger: Ecole Nationale Polytechnique, 2018.
- [11] K. K. Benchikouche Hadjira, *Commande MPPT D'un Générateur Hybride PV/TEG*, Bordj Bou Arreridj: Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi , 2022.
- [12] A. Z. KHELIFI, *Etude Numérique et Expérimentale d'un Générateur Thermoélectrique*, Blida: Université Saad Dahleb Blida -1-, 2024.
- [13] Z. M. Amine, *Conception et optimisation de la performance d'un module thermoélectrique pour génération d'énergie thermique ou électrique*, Adrar: Université Ahmed Draia , 2022.
- [14] N. Kanagaraj, «Photovoltaic and Thermoelectric Generator Combined Hybrid Energy System with an Enhanced Maximum Power Point Tracking Technique for Higher Energy Conversion Efficiency,» Mars 2021. [En ligne]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13063144>. [Accès le 14 Avril 2026].
- [15] G. Tapsobale, «"Système Hybride Solaire PV-T/Thermoélectrique",» 6 Octobre 2025. [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/928614092/chat-info>. [Accès le 15 Avril 2026].

- [16] Z. Belkacem, *Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité*, TIZI-OUZOU: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, 2012.
- [17] Z. Belkacem, *Etude et réalisation d'un dispositif hybride Photovoltaïque-Thermoélectrique*, TIZI-OUZOU : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI , 2019.

Chapitre III :
Simulation et Intégration
Industrielle

Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude et à la simulation des performances des systèmes énergétiques photovoltaïques (PV) et thermoélectriques (TEG), en mettant l'accent sur l'impact des facteurs physiques et thermiques sur leur rendement électrique. La simulation est un outil essentiel pour comprendre le comportement de ces systèmes et analyser leurs performances dans différentes conditions de fonctionnement, car elle permet une étude précise des caractéristiques électriques et thermiques sans recourir à des expériences complexes.

Dans un premier temps, l'impact de diverses caractéristiques opérationnelles, telles que l'irradiance solaire et la température, sur les performances d'un système PV sera étudié par l'analyse des courbes courant-tension et puissance-tension. Ensuite, la simulation des caractéristiques du TEG et de son comportement électrique sous l'effet des variations de température sera examinée. Le système hybride PV-TEG sera également étudié et ses performances analysées afin d'améliorer la valorisation de la chaleur résiduelle et d'accroître le rendement global du système.

Enfin, l'effet de la température sur la production d'énergie dans deux environnements industriels différents – l'industrie cimentière et l'industrie agroalimentaire – sera étudié afin de comparer les performances du système dans chaque environnement et d'analyser l'impact des conditions thermiques industrielles sur la production d'énergie.

III.1. Simulation de l'effet des différentes caractéristiques sur les performances PV :

III.1.1. Présentation du logiciel PVsyst :

Pvsyst est un logiciel qui s'installe sur les ordinateurs, et qui est utilisé pour gérer les panneaux solaires photovoltaïques.

Le programme permet notamment de saisir des données, de calculer les dimensions du système et d'analyser les résultats. Il peut être utilisé avec différents types de systèmes d'énergie solaire : ceux raccordés au réseau électrique, ceux qui fonctionnent de manière autonome, les pompes et même les réseaux à courant continu utilisés sans les transports publics. Le logiciel contient énormément bases de données de composants (panneaux, onduleurs) et de la météo, ainsi que des outils généreux pour l'énergie solaire.

Ce logiciel est conçu pour les professionnels (architectes, ingénieurs et chercheurs), mais il est également utilisé pour former des étudiants.

Pvsyst peut extraire des données météorologiques d'une dizaine de sources différentes, et vous pouvez également lui fournir vos propres données [1].

A Page principale du PVsyst :

La page d'accueil offre un aperçu des principales sections du logiciel, à savoir la Conception et la simulation de projet, les Utilitaires et la Documentation, ainsi que l'espace de travail de l'utilisateur et ses projets récents [2].

i. Conception et simulation du projet

La phase de conception et de simulation constitue une étape essentielle dans l'étude des systèmes photovoltaïques à l'aide du logiciel PVsyst. Cet outil permet de modéliser l'ensemble de l'installation en tenant compte des conditions climatiques du site, du dimensionnement des composants, des effets d'ombrage, des différentes sources de pertes énergétiques ainsi que des aspects technico-économiques du projet.

Les simulations sont généralement réalisées sur une période annuelle avec un pas de calcul horaire, ce qui permet d'obtenir une évaluation précise du comportement énergétique du système au cours de l'année. À l'issue de cette analyse, le logiciel génère un rapport détaillé regroupant les principaux indicateurs de performance et les résultats de production énergétique [2].

L'environnement de simulation proposé par PVsyst offre également la possibilité d'étudier plusieurs configurations d'installations photovoltaïques. Selon les besoins de l'utilisateur, il est possible de modéliser différents types de systèmes afin d'évaluer leur fonctionnement et leur rendement dans des conditions d'exploitation réelles.

Dans la section « Conception et simulation de projet », le logiciel PVsyst vous permet de créer et de simuler trois types de systèmes :

- **Couplé au réseau** : ce type vous permet de concevoir une installation connectée au réseau électrique. L'utilisateur peut également définir le modèle d'autoconsommation et ajouter un stockage de batterie selon différentes stratégies.
- **Isolé avec batterie** : ce type est destiné aux installations hors réseau, où un système de stockage est essentiel. Dans ce cas, la production excédentaire qui ne peut être utilisée ou stockée est réduite.
- **Pompage** : ce type est couramment utilisé dans certaines régions, où des panneaux solaires alimentent une pompe pour puiser l'eau d'un puits ou d'un lac. L'eau est ensuite stockée dans un réservoir surélevé pour une utilisation ultérieure dans diverses applications [2].

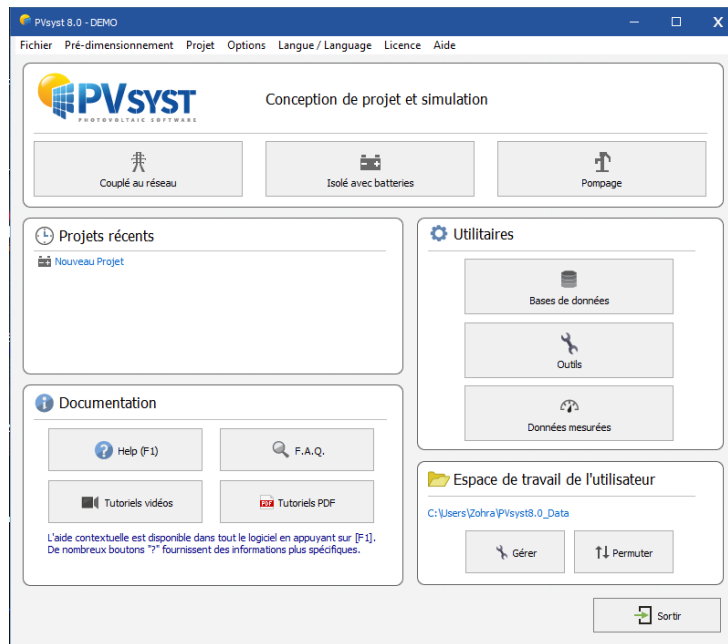


Figure III. 1 : Menu principal de logiciel PVsyst

i. Utilitaires :

Afin d'optimiser les études photovoltaïques, PVsyst propose un ensemble d'outils regroupés dans la section « Utilitaires ». Ces fonctionnalités offrent des moyens supplémentaires pour l'analyse, la vérification et l'amélioration des paramètres de simulation. Cette section est structurée en trois modules principaux couvrant différents aspects de l'étude des systèmes photovoltaïques.

- **Bases de données :** vous y trouverez tous les sites et composants précédemment enregistrés dans PVsyst. Vous pouvez également créer de nombreux sites, importer de données météorologiques et concevoir de nombreux composants.
- **Outils :** cette section présente des normes avancées pour l'ingénierie de l'énergie solaire, ainsi que des outils pour améliorer les performances électriques.
- **Données mesurées :** vous pouvez ajouter des données expérimentales et comparer les résultats de la simulation avec les mesures réelles [2].

ii. Documentation :

La section Documentation donne un accès direct à l'aide de PVsyst, ainsi qu'au manuel d'utilisation complète, également disponible en ligne sur pvsyst.com/help. L'aide contextuelle est accessible via la touche F1 ou via les petites icônes en forme de point d'interrogation dans les fenêtres et les boîtes de dialogue. Ces icônes fournissent des informations plus spécifiques, selon le contexte.

Appuyer sur F1 ou cliquer sur l'icône d'aide ouvre l'utilitaire PVsyst, qui fournit des articles contenant des informations précises, des explications détaillées et des descriptions étape par étape de l'utilisation des différentes fonctions du programme.

Vous pouvez également accéder au forum PVsyst, où vous pourrez poser vos questions. L'équipe PVsyst et les autres utilisateurs seront ravis de vous aider.

Les chaînes vidéo de PVsyst proposent des vidéos éducatives et des tutoriels. Il propose également des guides et des tutoriels imprimables pour les utilisateurs [2].

iii. Barre d'outils et espace de travail :

Les paramètres de l'espace de travail se configurent depuis la page d'accueil. Lorsque des fichiers sont enregistrés, ils sont automatiquement sauvegardés dans cet espace de travail selon une structure de dossiers définie. Vous trouvez également toute une gamme de modèles prédéfinis, qui peuvent être utilisés, par exemple, pour définir un profil d'autoconsommation. Les composants des cellules PV sont enregistrés dans le dossier « ComposPV », les fichiers du projet dans le dossier « Projet », etc...

- **Fichier** : cette liste propose des options pour importer et exporter des projets et des composants.
- **Pré-dimensionnement** : un outil de simulation simple et facile à utiliser pour les projets de petite taille et rationalisée.
- **Projet** : Cette rubrique permet de créer une nouvelle étude photovoltaïque à partir des paramètres définis par l'utilisateur. Elle donne également accès à différents types de projets, notamment le projet de réseau continu (DC Grid), destiné à certaines applications spécifiques telles que les infrastructures de transport public. L'utilisateur peut aussi ouvrir un projet déjà existant enregistré dans son espace de travail ou consulter des projets de démonstration proposés par PVsyst afin de découvrir diverses fonctionnalités du logiciel et des exemples d'applications.
- **Options** : Ce menu regroupe les paramètres généraux du logiciel. Il permet notamment de renseigner les informations relatives à l'utilisateur, de configurer les unités de mesure utilisées et de gérer les accès aux bases de données météorologiques via des clés API. Des réglages avancés sont également disponibles pour personnaliser certains paramètres de calcul, les seuils d'alerte et les valeurs par défaut. Toutefois, ces fonctionnalités sont principalement destinées aux utilisateurs expérimentés disposant d'une bonne maîtrise du logiciel.
- **Langue** : vous pouvez changer la langue depuis cette page ou en appuyant sur la touche F9.
- **Licence** : cette liste contient toutes les informations relatives à votre compte, clé d'activation, etc...
- **Aide** : cette option vous guide vers les différentes sources de documentations disponibles [2].

B Conception du système :

Dans nos travaux, nous avons utilisé un panneau de cellules photovoltaïques en silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H), composé de 22 cellules en série à triple jonction a-Si :H 136W de type Generic, dont les caractéristiques (aux STC $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$) sont présentées dans le tableau suivant :

Rayonnement de référence	$G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$
Température de référence	$T_{ref} = 25^\circ\text{C}$
Puissance maximale	$P_{mpp} = 136 \text{ W}$
Courant de puissance maximale	$I_{mpp} = 4.12 \text{ A}$
Tension de puissance maximale	$V_{mpp} = 33 \text{ V}$
Courant de court-circuit	$I_{cc} = 5.1 \text{ A}$
Tension de circuit ouvert	$V_{co} = 46.2 \text{ V}$
Résistance parallèle	$R_p = 60 \Omega$
Résistance série	$R_s = 0.7 \Omega$
Nombre de cellules	$N_{cell} = 22 \text{ cellules en série}$

III.1.2. Influence des différents paramètres sur le système PV :

A Influence de la température :

La température est un facteur critique qui affecte les performances des modules des cellules photovoltaïques [3].

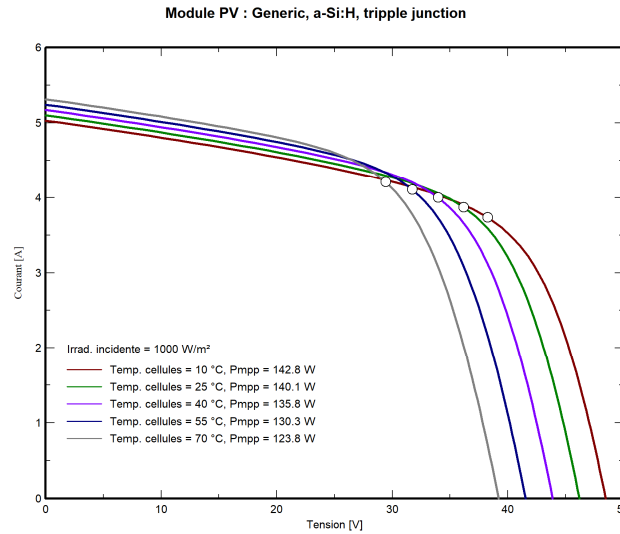


Figure III. 2 : Influence de la température sur la caractéristique I(V)

- La Figure (III.2) illustre le comportement du module sous une irradiation constante ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) pour des températures allant de 10°C à 70°C . La température du module influe grandement sur la tension en circuit ouvert du module : plus la température est élevée plus la tension en circuit ouvert V_{oc} est faible. Cependant, son effet sur le courant de court-circuit I_{cc} est bien moindre.

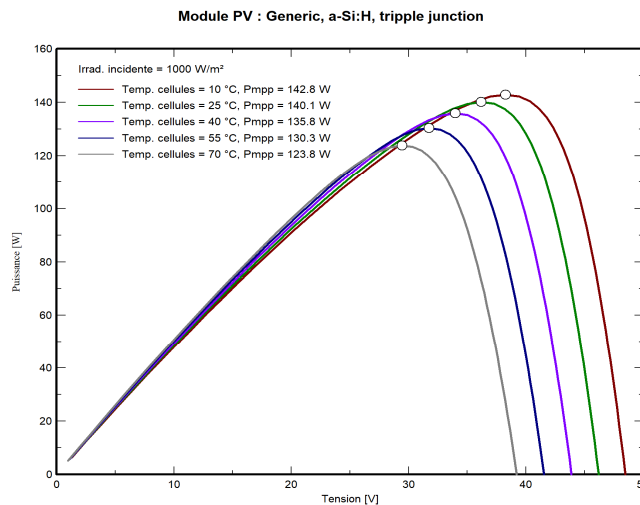


Figure III. 3 : Influence de la température sur la caractéristique P(V)

- La Figure (III.3) illustre l'effet de la température sur les performances des panneaux solaires : une augmentation de la température des cellules de 10°C à 70°C entraîne une diminution significative de la puissance de sortie maximale, qui passe de 142.8 W à 123.8 W. Cela signifie que des températures élevées des cellules PV entraînent une perte de production importante, soulignant l'importance de refroidir les panneaux dans les climats chauds afin de maintenir leurs performances.

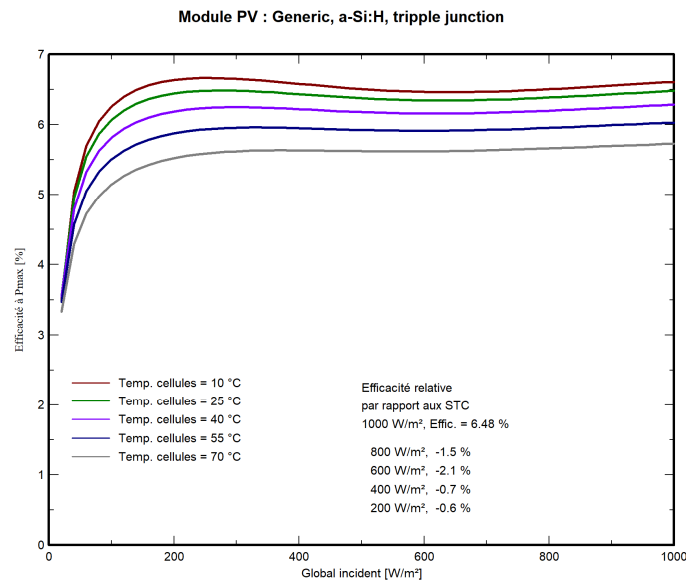


Figure III. 4 : Influence de la température sur l'efficacité

- La Figure (III.4) montre que le rendement des cellules augmente proportionnellement à l'intensité du rayonnement solaire, mais qu'il est affecté négativement par les hausses de températures, quel que soit le niveau de rayonnement.

B Influence de l'irradiation :

L'irradiation solaire est également l'un des principaux facteurs qui affectent les propriétés des panneaux solaires.

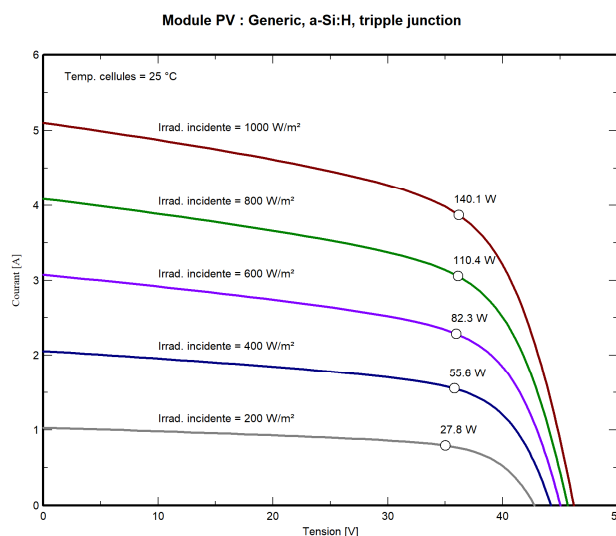


Figure III. 5 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I(V)

- La Figure (III.5) illustre la relation directe et étroite entre l'intensité du rayonnement solaire et le courant généré : une augmentation du rayonnement de 200 à 1000 W/m² entraîne une augmentation constante de la puissance de crête, passant de 27.8 W à

140.1W. Cette interaction confirme que l'utilisation d'un rayonnement solaire élevé est essentielle pour maximiser la productivité, tandis que le point de puissance maximale (MPPT) doit être ajusté avec précision à chaque niveau du rayonnement afin de garantir l'efficacité du système.

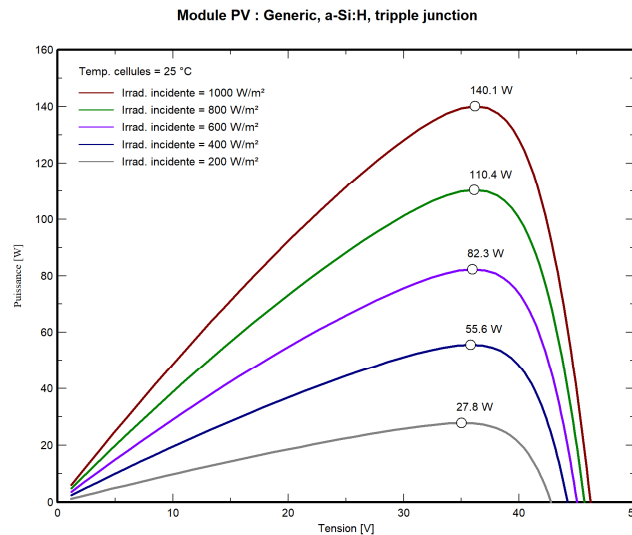


Figure III. 6 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique P(V)

- La Figure (III.6) illustre l'impact direct de l'intensité du rayonnement solaire sur la puissance de sortie maximale, cette dernière augmente significativement de 27.8 W à 140.1 W avec l'accroissement de l'éclairement. Cette corrélation souligne que le rendement d'un système photovoltaïque dépend fondamentalement de la disponibilité du rayonnement solaire, mettant en évidence la nécessité d'utiliser la technologie de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour garantir une extraction de puissance maximale quelles que soient les conditions atmosphériques.

C Influence de la résistance série :

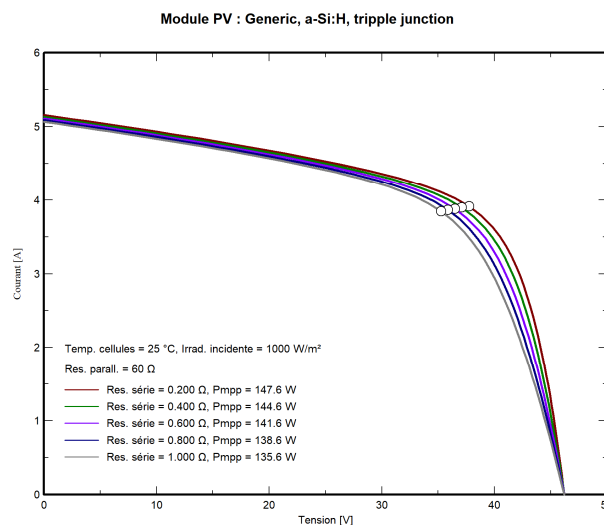


Figure III. 7 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I(V)

- La Figure (III.7) illustre clairement l'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique I(V) d'une cellule a-Si :H.
- On observe que lorsque la valeur de R_s augmente de 0.2Ω à 1Ω : la puissance maximale résultante P_{mpp} diminue d'un pourcentage significatif, réduisant ainsi l'efficacité de la conservation de l'énergie, aussi on observe que la tension en circuit ouvert V_{co} reste constante, confirmant que l'effet de la résistance série est principalement évident lorsque des courants importants circulent, où les chutes de tension $R_s \cdot I$ augmente.

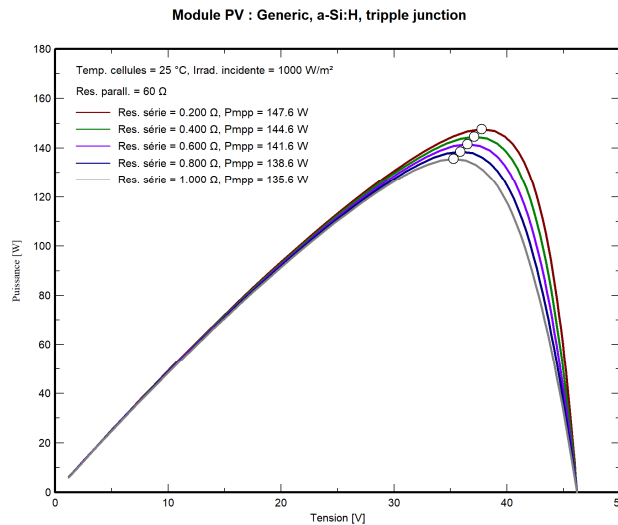


Figure III. 8 : Influence de la résistance série sur la caractéristique P(V)

- La Figure (III.8) représente les courbes puissance-tension (P-V) du panneau a-Si :H sous l'influence d'une résistance série variable (de 0.2Ω à 1Ω). Les résultats montrent qu'une augmentation de la résistance série entraîne une diminution directe de la puissance maximale extraite P_{mpp} . Cette diminution est due aux pertes par effet Joule au sein du matériau semi-conducteur et des conducteurs.
- On observe également que la tension optimale V_{mpp} est affectée négativement par l'augmentation de R_s . Par conséquent, en pratique, cette résistance doit être minimisée afin de garantir un transfert de puissance maximale du panneau à la charge. Cette analyse est cruciale pour l'étude des systèmes PV-TEG, car toute augmentation de la température du panneau peut entraîner une augmentation des résistances internes et, par conséquent, une diminution des performances de la section photovoltaïque, que l'on cherche à compenser à l'aide d'un générateur thermoélectrique.

D Influence de la résistance parallèle (shunt) :

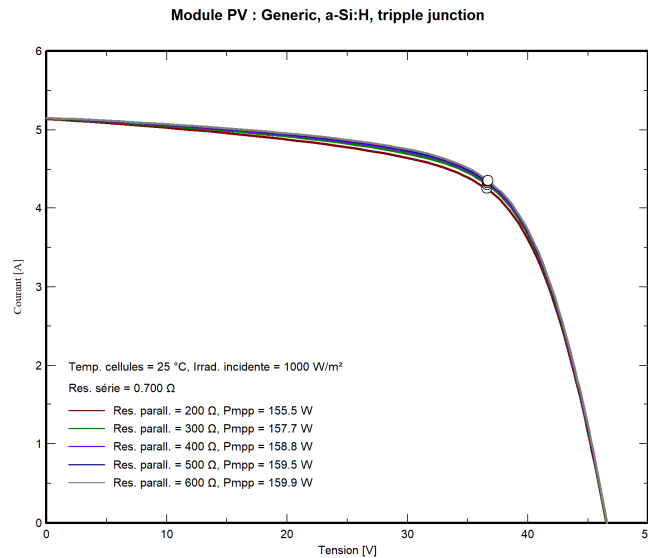


Figure III. 9 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique I(V)

- La Figure (III.9) montre l'influence de la résistance shunt R_p sur les caractéristiques courant-tension (I-V).
- On observe qu'à mesure que la valeur de R_p augmente, la puissance crête P_{mpp} augmente et la courbe devient plus fine. Physiquement, la résistance parallèle reflète la qualité de l'isolation interne de la cellule photovoltaïque, une faible résistance entraîne des fuites de courant, réduisant ainsi le rendement de la cellule. Dans le cas de silicium amorphe a-Si :H, des valeurs élevées de R_p indiquent une bonne fabrication de la couche mince et l'absence de chemins de conduction parasites. Cette analyse complète notre modélisation d'une cellule à une seule diode, où la résistance R_p apparaît comme un élément crucial pour maintenir la stabilité du courant dans des conditions de fonctionnement variables.

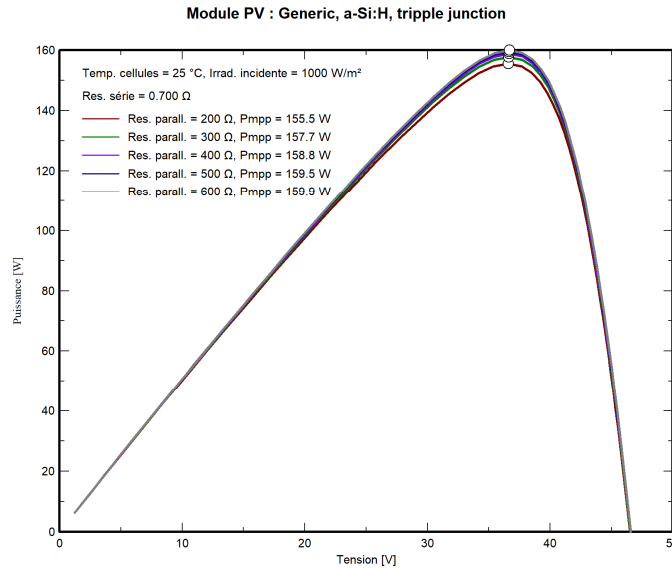


Figure III. 10 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique P(V)

- La Figure (III.10) illustre l'influence de la résistance parallèle R_p sur les courbes puissance-tension (P-V) d'un module photovoltaïque a-Si :H, dans des conditions de test standard ($G= 1000 \text{ W/m}^2$, $T= 25^\circ\text{C}$) et pour une résistance série constante (0.7Ω).
- On observe que la puissance maximale augmente significativement lorsque R_p passe de 200Ω à 600Ω , passant de 155.5W à 159.9W . Cette amélioration s'explique par le fait qu'une résistance shunt plus élevée réduit les courants de fuites à travers la jonction, préservant ainsi le courant disponible pour la charge externe et améliorant le rendement de la cellule.
- Par conséquent, lors de la conception ou du choix de panneaux photovoltaïques, la valeur de R_p doit être élevée plus possible afin d'obtenir une extraction d'énergie maximale, notamment pour les applications fonctionnant dans des environnements chauds ou ombragés.

E Influence de la dégradation :

- **Sous irradiation constante ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) :**

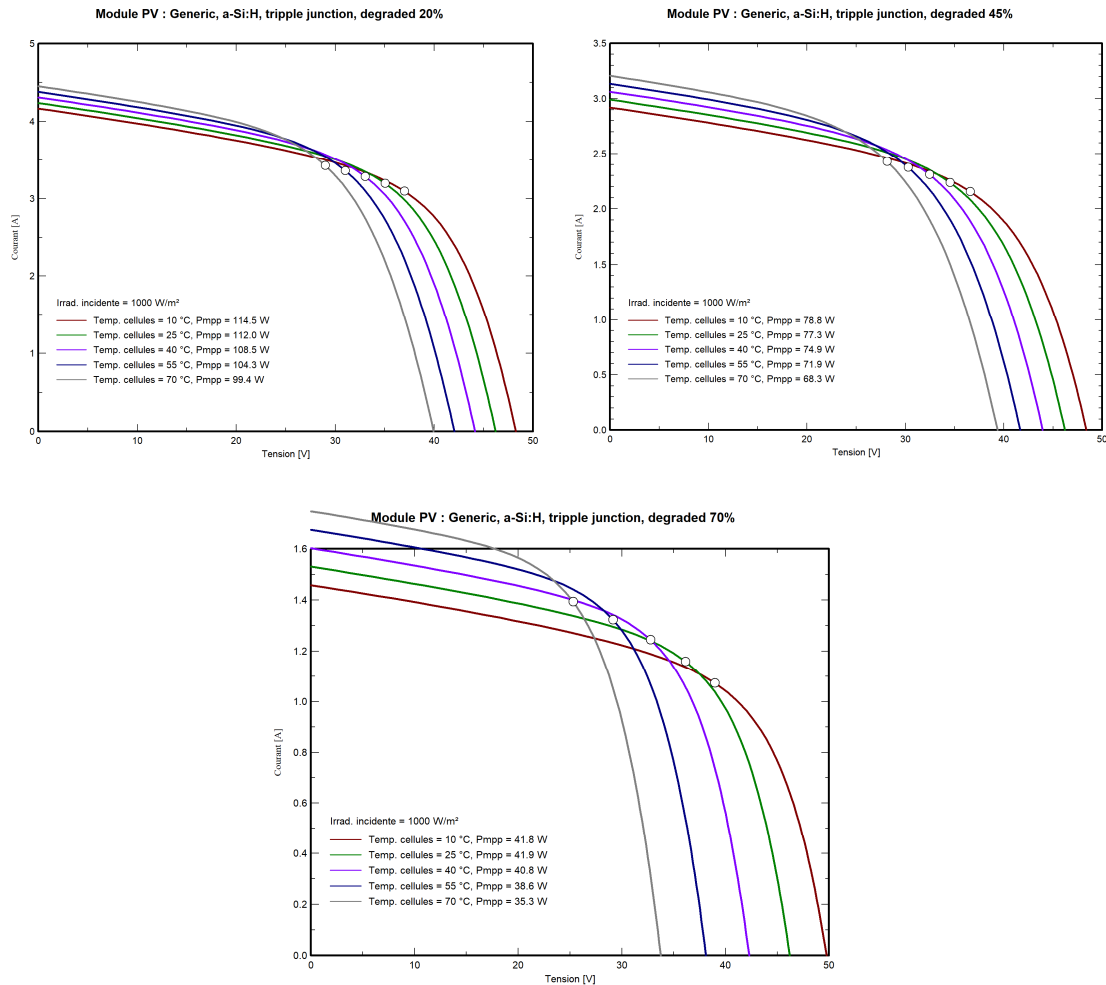


Figure III. 11 : Influence des dégradations (de 20% à 70%) à $G=1000 \text{ W/m}^2$ sur la caractéristique I(V)

- Les graphiques illustrés dans la Figure (III.11) montrent les courbes courant-tension (I-V) d'un panneau en silicium amorphe a-Si :H à une irradiation solaire constante ($G=1000\text{W/m}^2$), sous l'influence de trois taux de dégradation différents (20%, 45%, 70%), pour plusieurs valeurs de température variables de 10°C à 70°C.
- La comparaison des trois graphes révèle clairement l'impact négatif de la dégradation sur le rendement global du panneau solaire. Le passage d'un taux de dégradation de 20% à 45%, puis à 70%, entraîne une chute brutale des valeurs de courant et de tension, ce qui affecte négativement la puissance de sortie maximale. À la température de référence (25°C), la puissance de sortie diminue de 112W (pour un taux de dégradation de 20%) à 77.3W (pour un taux de dégradation de 45%), atteignant son minimum à 41.9W (pour un taux de dégradation de 70%).

• **Sous température constante ($T = 25^{\circ}\text{C}$) :**

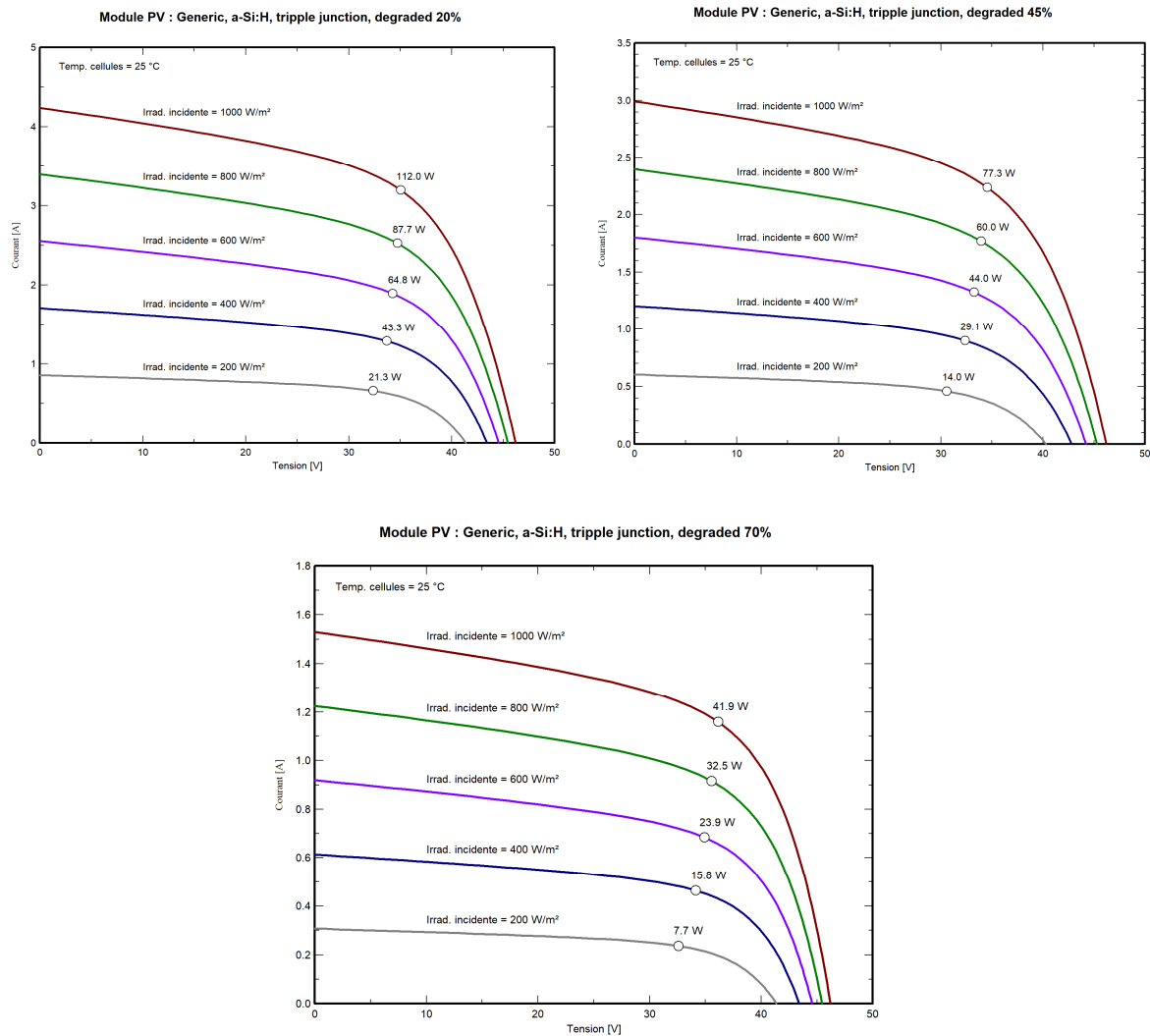


Figure III. 12 : Influence des dégradations (de 20% à 70%) à $T=25^{\circ}\text{C}$ sur la caractéristique I(V)

- Les graphiques présentés dans la Figure (III.12) montrent les courbes courant-tension (I-V) d'un panneau solaire a-Si:H à une température constante ($T= 25^{\circ}\text{C}$), sous l'influence de trois taux de dégradation différents (20%, 45%, 70%) pour plusieurs niveaux d'irradiation solaire variable de 200W/m^2 à 1000W/m^2 .
- En comparant les trois courbes, l'irradiation solaire étant maintenue constante à 1000W/m^2 , l'impact négatif important de la dégradation sur les caractéristiques électriques du panneau apparaît clairement. Le courant de court-circuit chute brutalement, passant d'environ 4.24 A pour une dégradation de 20% à 3 A pour une dégradation de 45%, puis s'effondre à 1.53 A pour une dégradation de 70%. Du fait de la chute de courant, la puissance maximale P_{mpp} diminue également de façon brutale et

progressive. Sa valeur passe de 112W à 77.3W puis à 41.9W pour une même valeur d'irradiation (1000W/m^2).

- On observe que les valeurs de tension en circuit ouvert restent très proche (entre 42V et 46V) malgré le doublement des taux de dégradation. Ceci démontre expérimentalement que la dégradation structurelle du matériau semi-conducteur affecte principalement la cinétique et le taux de génération des porteurs de charge (courant) sans impacter significativement la barrière de potentiel interne des jonctions.

Ces résultats confirment que les performances des panneaux solaires a-Si :H sont affectées négativement et inévitablement par l'augmentation de température et par le temps (dégradation). Cette double dégradation impose de prendre en compte ces paramètres lors de la modélisation et de la conception des systèmes photovoltaïques afin de garantir des estimations précises de la production d'énergie à long terme.

III.2. Simulation des performances du générateur thermoélectrique (TEG) :

Après l'étude de système photovoltaïque (PV), cette partie examine le système thermoélectrique (TEG), puis le système hybride (PV-TEG). Le TEG se caractérise par sa capacité à convertir la chaleur en électricité, et ses performances s'améliorent avec l'augmentation de la température. Le système hybride combine PV et TEG afin d'exploiter à la fois le rayonnement solaire et la chaleur résiduelle.

Pour réaliser cette simulation, nous avons utilisé Python, ce qui nous a permis de calculer et tracer avec précision les courbes I-V et P-V. Nous avons également étudié l'influence de la variation de température (ΔT) sur les performances du TEG.

III.2.1. Caractéristiques électriques du TEG :

A Caractéristique I-V du TEG :

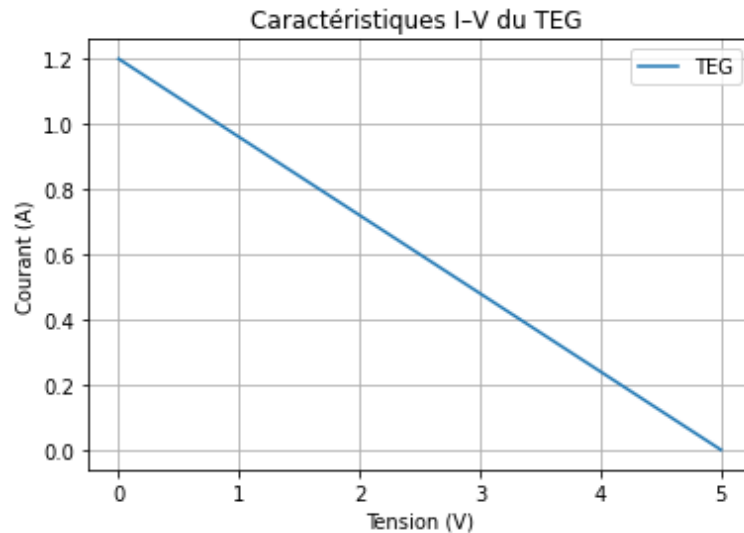


Figure III. 13 : Caractéristiques I-V du générateur thermoélectrique TEG

- Le graphique illustré dans la Figure (III.13) présente les caractéristiques I-V d'un générateur thermoélectrique, où la relation entre le courant et la tension est inversement proportionnelle à la tension. À $V=0$, le courant est maximal, environ 1.2A, ce qui correspond au courant de court-circuit (I_{cc}). Lorsque la tension augmente progressivement, le courant diminue régulièrement jusqu'à s'annuler à environ 5V, ce qui correspond à la tension de circuit ouvert (V_{co}).
- Ce comportement confirme que le TEG fonctionne comme une source d'énergie interne à résistance interne quasi constante. Par conséquent, le courant diminue lorsque la tension de charge augmente. Ces caractéristiques démontrent également que la puissance générée est nulle aux deux extrémités de la courbe (c.à.d. en court-circuit et en circuit ouvert), tandis qu'elle atteint une valeur maximale à un point de fonctionnement intermédiaire appelé point de puissance maximal (MPP).

B Caractéristique P-V du TEG :

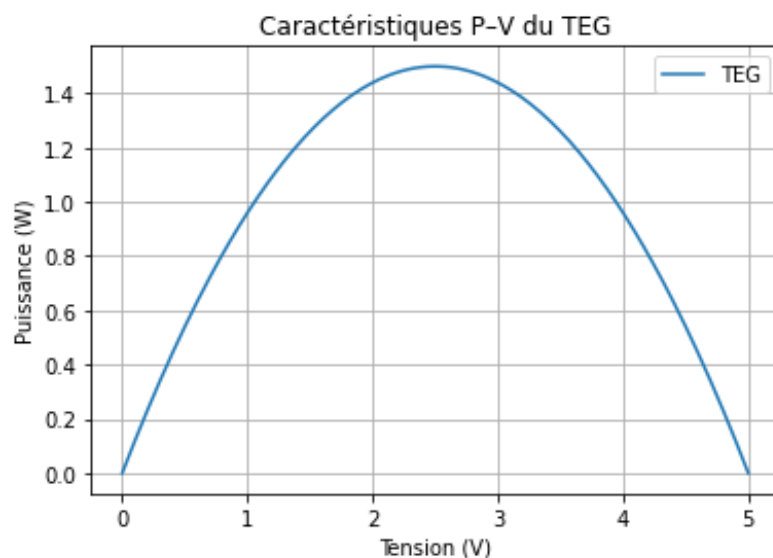


Figure III. 14 : Caractéristiques P-V du générateur thermoélectrique TEG

- La Figure (III.14) illustre les caractéristique puissance-tension (P-V) d'un générateur thermoélectrique (TEG). On observe que la puissance électrique varie avec la tension selon une courbe quasi-parabolique. La puissance est nulle à $V=0$ en raison de l'absence de tension, puis augmente progressivement avec la tension jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ 1.5W à une tension d'environ 2.5V, qui correspond au point de puissance maximal.
- Après ce point, la puissance commence à diminuer progressivement malgré la poursuite de l'augmentation de la tension, jusqu'à s'annuler à nouveau à une tension d'environ 5V, la tension en circuit ouvert, où le courant devient nul. Ce comportement est dû à la relation inverse entre le courant et la tension dans un générateur thermoélectrique, la puissance étant leur produit ($P = V \times I$).
- Ces résultats démontrent que le fonctionnement du TEG à son point de puissance maximal permet d'obtenir la meilleure production électrique possible. Ceci souligne l'importance des techniques de suivi du point de puissance maximal (MPPT) pour améliorer l'efficacité des systèmes hybrides PV-TEG, notamment dans les applications industrielles à haute température.

III.2.2. Effet de la température sur les performances du TEG :

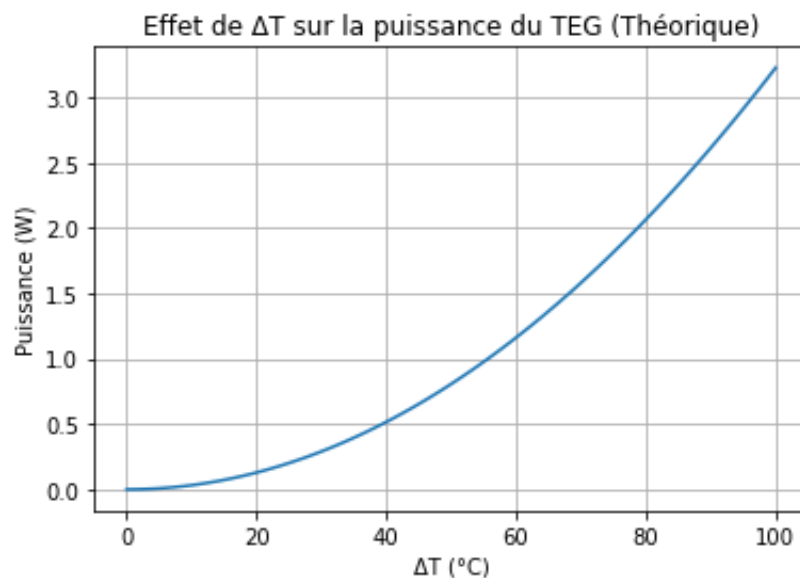


Figure III. 15 : Effet théorique de la différence de température sur la puissance du TEG

- La Figure (III.15) illustre l'effet théorique de la différence de température (ΔT) sur la puissance électrique générée par un générateur thermoélectrique (TEG). On observe que la puissance augmente progressivement avec l'écart de la température entre les faces chaude et froide. Quasi nulle à $\Delta T=0^\circ\text{C}$, elle croît ensuite de manière non linéaire jusqu'à environ 3.2W à $\Delta T=100^\circ\text{C}$.

- Ce comportement s'explique par le fait que la tension générée dans le TEG dépend directement de l'effet Seebeck, qui est proportionnel à la différence de température. Ainsi lorsque ΔT augmente, la force électromotrice (FEM) et le courant généré augmente également, ce qui conduit à une puissance électrique de sortie plus élevée.
- La courbe montre également que la relation entre la puissance et la différence de température n'est pas linéaire mais plutôt croissante, confirmant que les performances électriques du TEG s'améliorent significativement dans les environnements industriels à haute température. Par conséquent, les applications industrielles telles que les cimenteries ou les usines sidérurgiques figurent parmi les domaines les plus appropriés pour l'utilisation de générateurs thermoélectriques afin de récupérer la chaleur perdue et de la convertir en énergie électrique utilisable.

III.3. Simulation et analyse du système hybride PV-TEG :

Après avoir étudié et simulé les performances du générateur thermoélectrique (TEG) et analysé ses caractéristiques électriques à l'aide des courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), il est devenu nécessaire d'étudier le système hybride PV-TEG, qui combine des cellules photovoltaïques et un générateur thermoélectrique. Ce système vise à améliorer le rendement de conversion énergétique et à valoriser la chaleur résiduelle générée par la température élevée des panneaux solaires, contribuant ainsi à une efficacité globale accrue du système, notamment dans les environnements industriels à haute température.

III.3.1. Caractéristiques électriques du système hybride PV-TEG

A Caractéristique I-V du PV-TEG

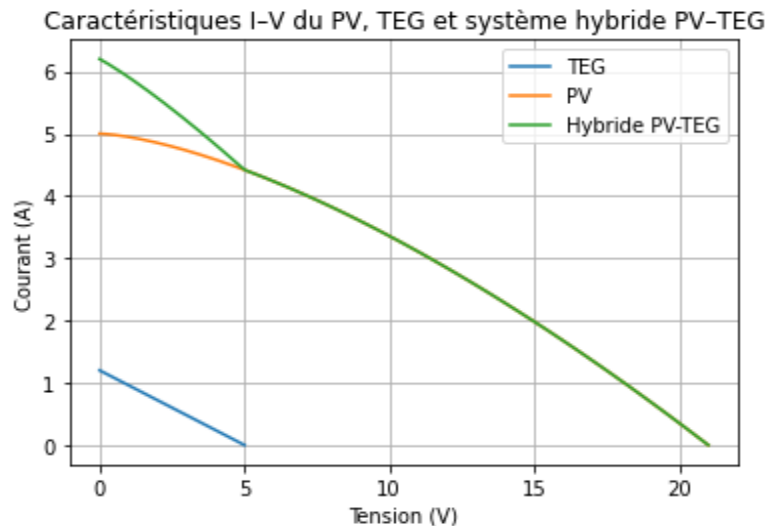


Figure III. 16 : Caractéristiques I-V des systèmes : PV, TEG et hybride PV-TEG

- La Figure (III.16) illustre les caractéristiques courant-tension (I-V) d'un système PV, d'un TEG et d'un système hybride PV-TEG. La courbe du système PV présente un courant relativement élevé, qui diminue progressivement avec l'augmentation de la tension, pour s'annuler à la tension de circuit ouvert. La courbe du TEG, quant à elle,

affiche des valeurs de courant et de tension inférieures à celles du système PV, avec une diminution quasi linéaire du courant lorsque la tension augmente.

- En revanche, la courbe du système hybride PV-TEG démontre une nette amélioration des performances électriques par rapport à chaque système pris individuellement, avec un courant de démarrage plus élevé d'environ 6.2A, tout en maintenant une tension plus élevée d'environ 21V. Ceci attribué à la contribution du générateur thermoélectrique qui récupère la chaleur perdue du panneau solaire et la convertit en énergie électrique supplémentaire.
- Les résultats montrent également que l'intégration d'un système TEG à un système PV permet d'améliorer les caractéristiques de fonctionnement électriques et d'accroître la puissance de sortie, notamment dans des conditions de température élevée qui affectent négativement les performances du panneau solaire. Par conséquent, le système hybride PV-TEG constitue une solution efficace pour améliorer l'efficacité énergétique et utiliser la chaleur résiduelle dans les applications industrielles.

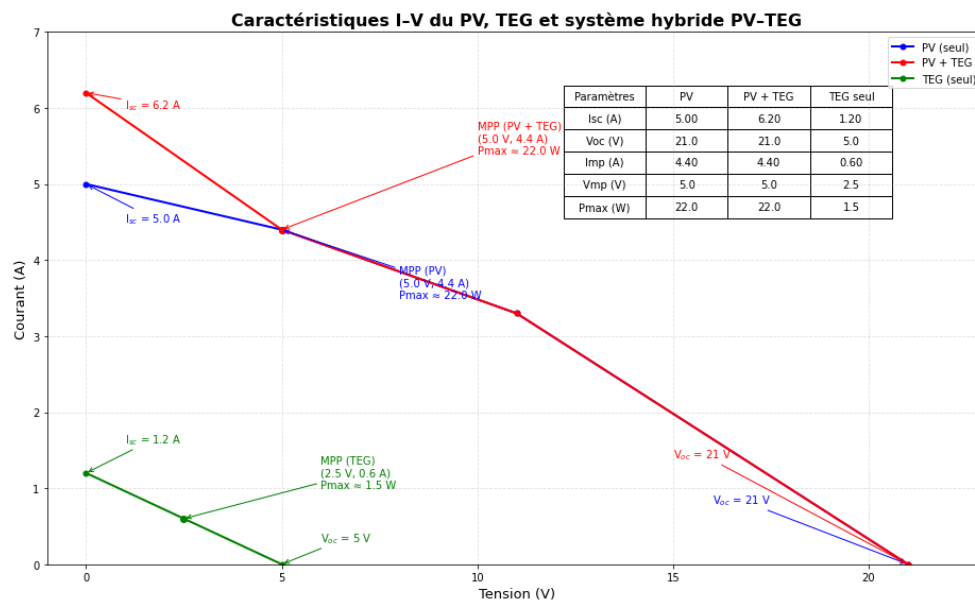


Figure III. 17 : Comparaison entre les caractéristiques I-V du : PV, TEG et PV-TEG

- La Figure (III.17) compare les caractéristiques courant-tension (I-V) d'un système photovoltaïque (PV), d'un générateur thermoélectrique (TEG) et d'un système hybride PV-TEG. On observe que l'intégration du TEG au système PV a permis d'augmenter le courant de court-circuit de 5,0 A à 6,2 A tout en maintenant la tension en circuit ouvert à 21 V. Ces résultats confirment que le système hybride contribue à améliorer les performances électriques et à valoriser l'énergie thermique perdue pour accroître la production d'électricité.

B Caractéristique P-V de PV-TEG :

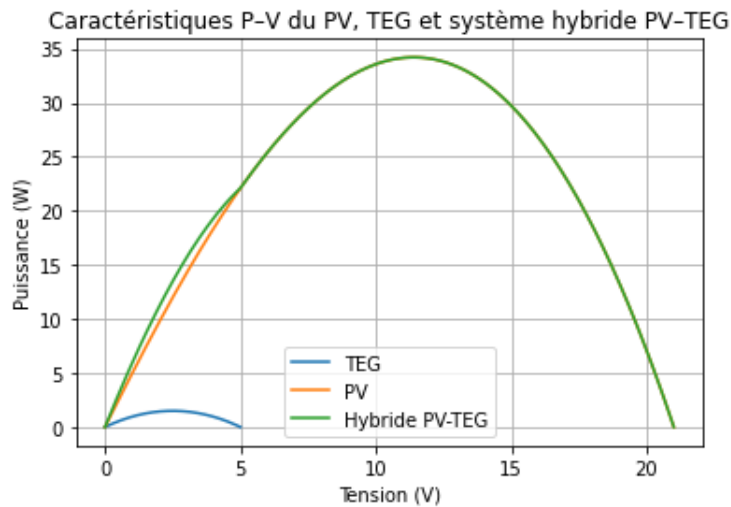


Figure III. 18 : Caractéristiques P-V des systèmes : PV, TEG et hybride PV-TEG

- La Figure (III.18) illustre les caractéristiques puissance-tension (P-V) d'un panneau PV, d'un TEG et d'un système hybride PV-TEG. La puissance de sortie de TEG reste faible comparée à celle du panneau PV. Ceci dû à la faible différence de température disponible pour le TEG, sa tension et son courant limité.
- Quand au panneau PV, sa puissance augmente avec la tension jusqu'à atteindre son point de fonctionnement optimal, puis diminue à l'approche de la tension en circuit ouvert.
- La courbe de système hybride PV-TEG montre également que la combinaison d'un TEG avec un panneau PV entraîne une légère augmentation de la puissance de sortie par rapport au système PV seul, notamment aux basses et moyennes valeurs de tension.
- De manière générale, les résultats confirment que le système hybride PV-TEG est plus performant que le système photovoltaïque traditionnel, car il contribue à augmenter la puissance électrique extraite et à améliorer l'utilisation de l'énergie solaire totale, ce qui conduit à une productivité accrue du système et à une meilleure efficacité énergétique.

III.3.2. Comparaison des performances des systèmes : PV seul et Hybride PV-TEG :

A Rendement énergétique :

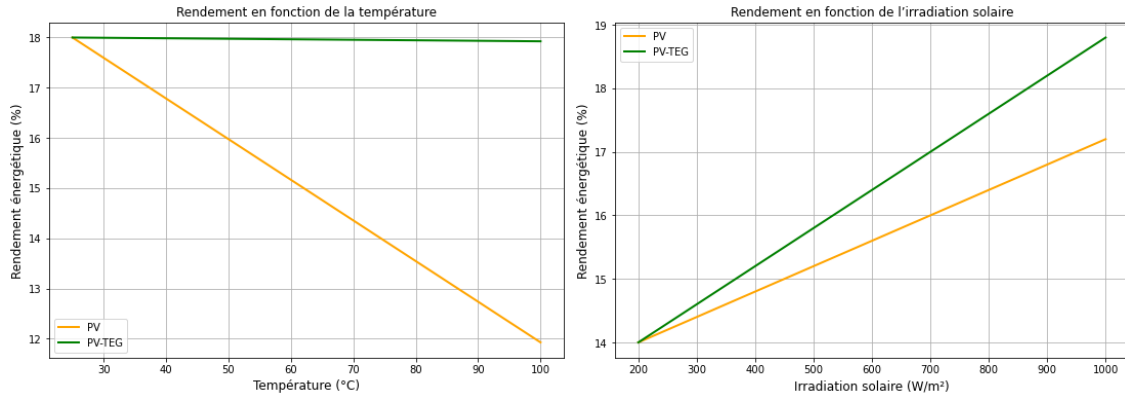


Figure III. 19 : Rendement énergétique en fonction de : température et irradiation solaire

- La Figure (III.19) illustre l'influence de la température et du rayonnement solaire sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïque (PV) et hybride PV-TEG.
- D'une part, on observe que le rendement du système PV diminue significativement avec l'augmentation de la température, passant d'environ 18% à 25°C à environ 12% à 100°C, en raison de l'impact négatif de la chaleur sur les performances des cellules solaires. En revanche, le système hybride PV-TEG conserve un rendement relativement constant grâce à la contribution du générateur thermoélectrique (TEG).
- D'autre part, le rendement des deux systèmes augmente avec le rayonnement solaire, mais le système hybride atteint des valeurs supérieures à celles du système PV pour tous les niveaux de rayonnement étudiés. De plus, l'écart entre les deux courbes s'accroît avec l'augmentation du rayonnement, le rendement du système hybride atteignant environ 19% à 1000W/m² contre environ 17% pour le système PV.
- Ces résultats soulignent l'efficacité de l'intégration de la technologie TEG aux panneaux solaires, car le système hybride contribue à améliorer l'utilisation d'énergie solaire et à maintenir des rendements élevés même dans des conditions de fonctionnement difficiles de température élevée et de rayonnement solaire accru, ce qui conduit à une efficacité globale du système accrue et à des performances énergétiques améliorées.

B Influence de la température sur les performances :

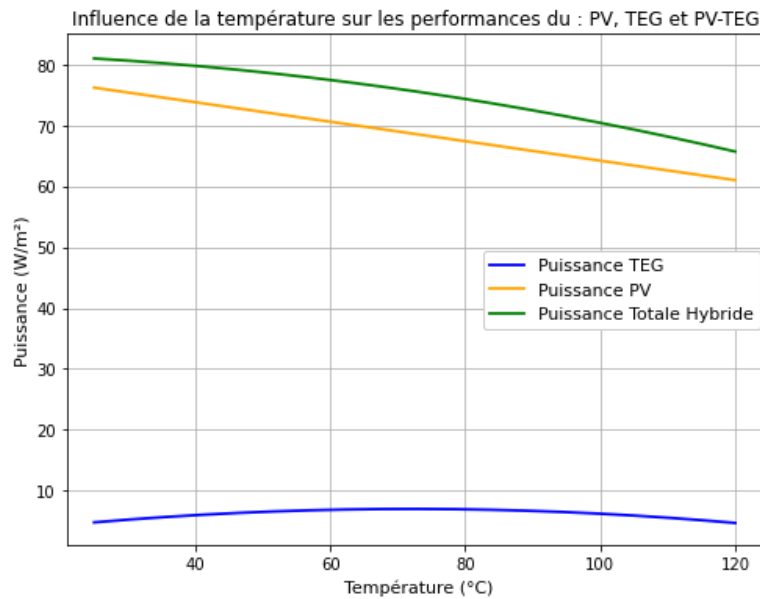


Figure III. 20 : Influence de la température sur les performances du : PV, TEG et PV-TEG

- Les résultats de la simulation indiquent une forte corrélation entre la température et les performances du système hybride PV-TEG. Effectivement, la puissance produite par le module photovoltaïque décroît presque de façon linéaire avec l'augmentation de la température, diminuant à peu près de 76W/m^2 à 61W/m^2 entre 30°C et 120°C . Cette chute est essentiellement due à la dégradation de la tension de sortie du module en raison de l'effet thermique, ce qui provoque une réduction du rendement global.
- Cependant, l'évolution de la puissance générée par le générateur thermoélectrique (TEG) est non linéaire : elle augmente progressivement jusqu'à une température intermédiaire (environ $70\text{--}80^\circ\text{C}$), due à la hausse du gradient thermique, puis se réduit lorsque la température augmente à cause des contraintes associées au matériau thermoélectrique et des pertes thermiques.
- Par conséquent, la puissance globale du système hybride PV-TEG est toujours plus grande que celle du panneau solaire seul sur l'ensemble de la gamme de température examinée, même si elle montre une tendance générale à la baisse. Ce comportement souligne l'importance du couplage PV-TEG, qui offre la possibilité d'utiliser partiellement la chaleur perdue par le module photovoltaïque, augmentant ainsi la production énergétique totale, en particulier dans des environnements à température élevée. Ces observations démontrent que l'intégration d'un TEG est une solution appropriée pour minimiser l'impact négatif de la température sur le système PV.

III.4. Étude de la puissance produite dans deux environnements industriels :

Cette étude vise à analyser la puissance électrique générée sous différentes températures dans deux environnements industriels distincts : l'industrie cimentière et l'industrie agroalimentaire, afin d'évaluer les performances du système en conditions de fonctionnement réalistes. La température est un facteur déterminant de l'efficacité des systèmes électriques, notamment dans les applications industrielles caractérisées par des températures élevées et des conditions de fonctionnement variables. Cette simulation permet de comparer le comportement du système et de déterminer l'environnement le plus adapté à l'obtention d'une puissance de sortie optimale.

III.4.1. Cas d'une cimenterie (haute température) :

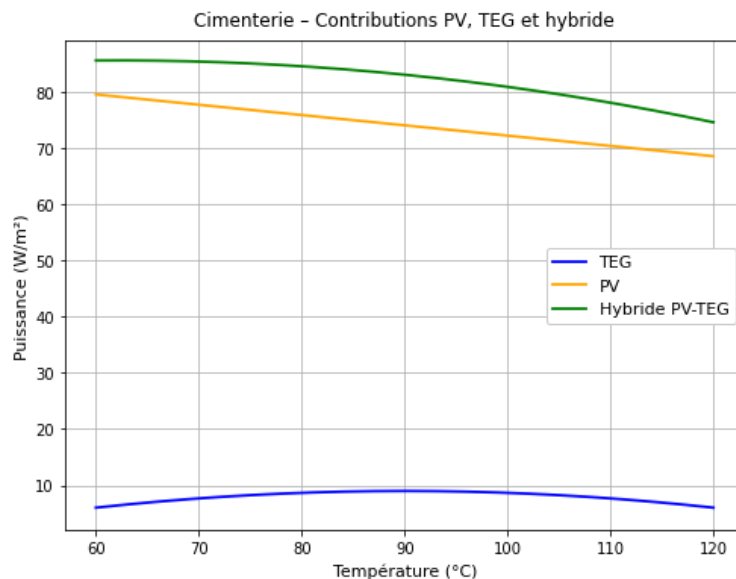


Figure III. 21 : Évolution de la puissance de: PV, TEG et hybride PV–TEG en fonction de la température dans une cimenterie

- Dans le cas d'une cimenterie, où la température varie entre $60^{\circ}C$ et $120^{\circ}C$, on note une baisse progressive de la puissance du système PV. Cette diminution est associée au coefficient thermique négatif du matériau photovoltaïque, ce qui cause une baisse du rendement lorsque la température s'élève.
- Cependant, une partie de cette perte est réduite par le générateur thermoélectrique (TEG), dont la production augmente avec le gradient thermique. En effet, plus la température augmente, plus le TEG a la capacité de transformer la chaleur perdue en électricité.
- Par conséquent, bien que le système hybride PV-TEG subisse une certaine dégradation, sa puissance totale reste relativement importante. Cela prouve que l'ajout d'un TEG est particulièrement recommandé dans les environnements industriels à haute température, tels que les usines de ciment, où la quantité de chaleur résiduelle est énorme.

III.4.2. Cas d'une industrie agroalimentaire (température modérée) :

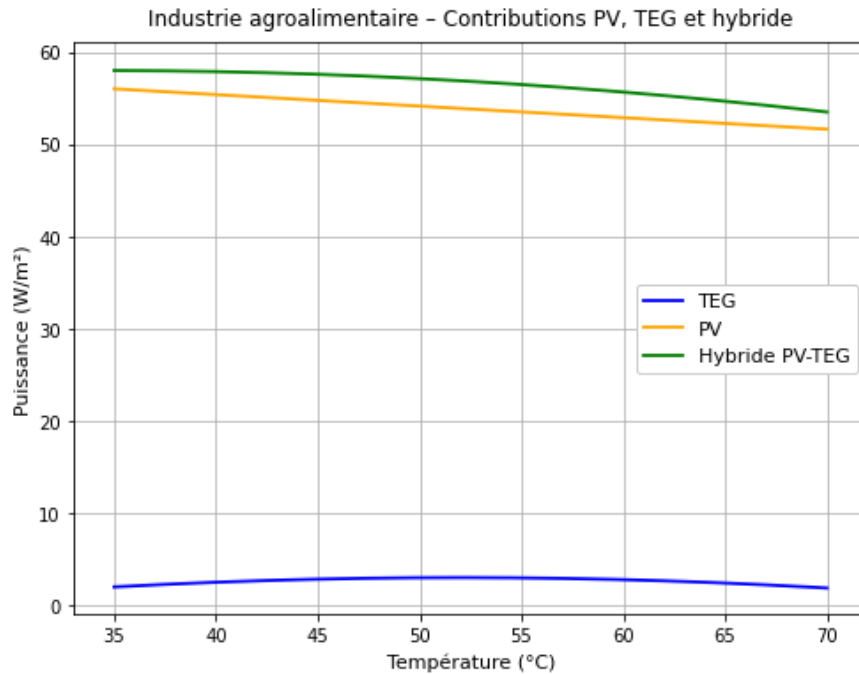


Figure III. 22 : Évolution de la puissance de: PV, TEG et hybride PV–TEG en fonction de la température dans une industrie agroalimentaire

- Dans le cas de l'industrie agroalimentaire, la température reste entre 35°C et 70°C, ce qui réduit l'impact de la dégradation thermique sur le module photovoltaïque. Par conséquent, le PV poursuit une performance légèrement constante et reste la principale génératrice d'électricité.
- En revanche, le générateur thermoélectrique apporte une contribution moins importante en raison d'un gradient thermique moins notable. Ainsi, la contribution du TEG au système hybride est limitée.
- Le système hybride est donc légèrement plus puissant que la source d'énergie photovoltaïque seule, mais l'amélioration reste modeste. Cela démontre que, dans des environnements à des températures modérées, l'importance du couplage PV-TEG est moins significative.

III.4.3. Discussion et comparaison des résultats :

L'analyse comparative du système hybride PV-TEG dans deux contextes industriels différents souligne absolument l'impact crucial de la température sur les performances énergétiques globales.

Pour la cimenterie, dans laquelle se stabilise une température élevée, la diminution du rendement photovoltaïque représente une contrainte significative. Cependant, cette perte est

efficacement réduite par le générateur thermoélectrique, qui exploite la chaleur résiduelle existante. Cela a conduit à une augmentation notable de la puissance globale générée, soulignant le bénéfice stratégique de l'intégration du TEG dans les environnements industriels soumis à des contraintes thermiques élevées.

En revanche, dans le domaine de l'agroalimentaire où les températures sont douces, le panneau photovoltaïque garde une performance légèrement constante et reste la source majeure de production. Dans ce cadre, l'apport du TEG reste limité en raison d'un gradient thermique trop faible, ce qui diminue l'effet global du système hybride.

Par conséquent, cette recherche met en évidence que l'efficacité du couplage PV-TEG est largement déterminées par les conditions thermiques de fonctionnement. Le système hybride semble particulièrement approprié pour les secteurs à température élevée, où il facilite une valorisation optimale de l'énergie perdue et une amélioration du rendement globale.

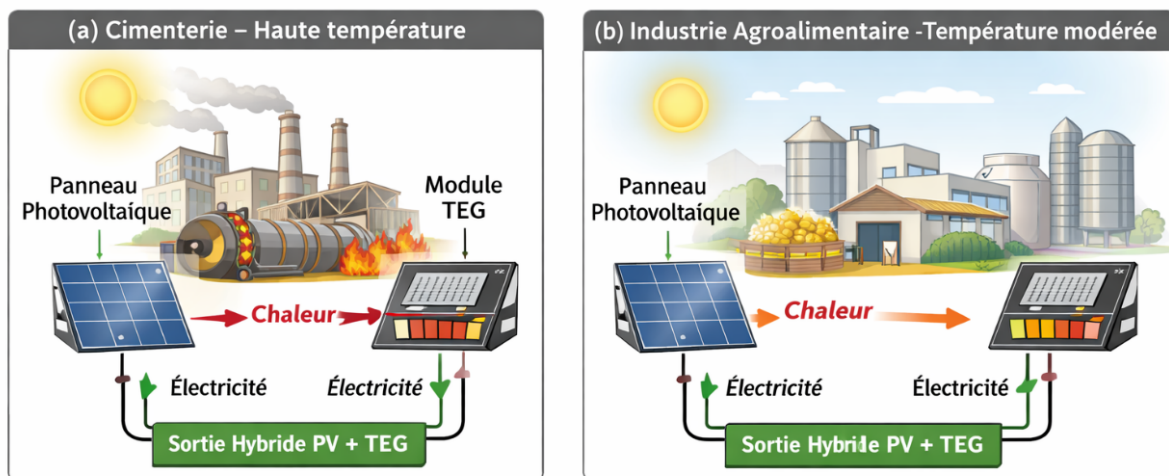


Figure III. 23 : Architecture du système hybride PV-TEG pour la récupération de chaleur industrielle

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre examine et simule les performances des systèmes photovoltaïques (PV), des générateurs thermoélectriques (TEG) et des systèmes hybrides PV-TEG. Les résultats démontrent que la température, l'irradiance solaire et les différentiels de température sont des facteurs clés influençant la puissance de sortie et le rendement du système. L'étude montre également que l'intégration d'un générateur thermoélectrique aux panneaux solaires permet la valorisation de la chaleur résiduelle et améliore les performances énergétiques globales.

Par ailleurs, une comparaison entre les industries du ciment et de l'agroalimentaire souligne l'importance d'exploiter les sources de chaleur disponibles dans le secteur industriel afin d'accroître la production d'énergie et de réduire les pertes.

Références

- [1] E. A. RAHMANI Okba, *Evaluation énergétique d'une centrale photovoltaïque*, Blida: Université Saad Dahlab Blida-1, 2022.
- [2] P. SA, «PVsyst 8 - Tutoriel - Système connecté au réseau,» [En ligne]. Available: <https://www.pvsyst.com/pdf/pdf-tutorials/pvsyst-8/pvsyst-tutorial-v8-grid-connected-fr.pdf>. [Accès le 12 Avril 2026].
- [3] M. F. Zahra, *Modélisation et simulation des panneaux a couche mince à base de a-Si:H sous l'effet de l'ombrage partiel*, TLEMCEN: UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID, 2022.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

En conclusion, cette étude a porté sur l'utilisation de l'énergie solaire et de la chaleur résiduelle par le biais de systèmes photovoltaïques (PV) et de générateurs thermoélectriques (TEG), en s'intéressant à la possibilité de les intégrer dans un système hybride PV-TEG afin d'améliorer la production d'énergie et d'accroître l'efficacité globale du système, notamment dans les environnements industriels à haute température.

Cette étude a permis de dégager plusieurs conclusions importantes, que l'on peut résumer ainsi :

- Elle souligne l'importance de l'énergie solaire comme l'une des principales sources d'énergie renouvelables, capable de contribuer à satisfaire la demande croissante en énergie de manière propre et durable.
- Elle démontre l'impact négatif des températures élevées sur les performances des panneaux photovoltaïques, car cela entraîne une diminution de la tension et de l'efficacité globale du système.
- Elle met en évidence le rôle des générateurs thermoélectriques (TEG) dans la conversion des différences de température en énergie électrique utilisable grâce à l'effet thermoélectrique.
- Elle démontre la possibilité d'améliorer les performances énergétiques en intégrant les technologies PV et TEG au sein d'un système hybride permettant l'utilisation de la chaleur résiduelle et sa conversion en énergie électrique supplémentaire.
- Démontrer l'impact de divers facteurs opérationnels, tels que le rayonnement solaire, la température et les écarts de température, sur les performances des systèmes photovoltaïques et des générateurs thermoélectriques.
- Souligner l'importance des environnements industriels comme source significative de chaleur résiduelle et démontrer leur potentiel pour accroître la production d'électricité.
- Les résultats de la simulation ont montré que la récupération de la chaleur résiduelle dans les industries du ciment et agroalimentaire peut contribuer à améliorer les performances globales des systèmes énergétiques et à réduire les pertes d'énergie.

Sur la base de ces résultats, les recommandations suivantes peuvent être formulées à l'intention du secteur industriel :

- Encourager l'adoption de systèmes hybrides PV-TEG dans les installations industrielles présentant d'importantes sources de chaleur.
- Œuvrer à la récupération de la chaleur résiduelle générée par les procédés industriels et à son utilisation pour la production d'électricité.
- Améliorer les systèmes de refroidissement et de ventilation des panneaux photovoltaïques afin d'atténuer l'impact des températures élevées sur leur rendement.

- Développer des stratégies de gestion de l'énergie au sein des installations industrielles afin d'optimiser l'utilisation des différentes sources d'énergie disponibles.

Concernant les perspectives de recherche futures, cette étude pourrait être approfondie par l'intégration de technologies d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique dans les systèmes PV-TEG. Ces technologies permettent de prévoir la production d'électricité, d'améliorer la gestion de l'énergie et de déterminer en temps réel les conditions de fonctionnement optimales à partir de données climatiques et industrielles. De plus, des systèmes de contrôle intelligents peuvent être développés pour optimiser les performances du système hybride et accroître son efficacité énergétique dans diverses conditions d'exploitation.

Enfin, cette étude confirme que l'association de l'énergie solaire et de la récupération de chaleur fatale constitue une solution prometteuse pour la mise en place de systèmes énergétiques plus efficaces et durables, notamment dans les secteurs industriels présentant un fort potentiel d'exploitation des ressources thermiques inexploitées.