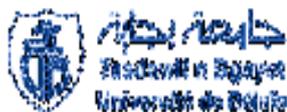


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : automatique

Spécialité : automatique et informatique industrielle

Thème

Étude et optimisation d'un générateur thermoélectrique

Préparé par :

Kenza AIT MADEN

Kenza DJAFRI

Dirigé par :

Mr. Abdelhakim BELKAID

Examiné par :

Mr. HADJI

Mr. CHARIKH

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

Tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu le tout puissant de nous avoir donné, la force pour survivre, le courage, la capacité, la volonté pour dépasser toutes les difficultés.

On tient à remercier notre encadreur monsieur Abdelhakim BELKAID, l'adjoint de chef département ATE, pour son encadrement, orientation, encouragement ainsi sa patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être au bon port.

On tient aussi à remercier notre chef de département monsieur hadji Slimane, pour sa gentillesse et pour sa disponibilité ainsi ces efforts pour mettre en disponibilité tous les moyens pour le bon déroulement de nos études.

On tient à remercier sincèrement les membres de jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Nous remercions tous les profs de département génie électrique nous vous remercions d'avoir partagé avec nous votre passion pour l'enseignement, nous avons grandement apprécié vos soutiens, vos implications et votre expérience tout au long de ces années. Nous voulions que vous sachiez que vos étudiants garderont toute leur vie un très bon souvenir de ces années d'étude.

On souhaite remercier madame Célia AOUAGHLIS pour toute l'aide qu'elle nous a apportée.

Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce modeste mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

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

A Mes frères et sœur Asma ainsi que toute ma famille.

Tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de mon travail.

AIT MADEN Kenza

Dédicace

A l'âme de mon cher père. Que dieu le bénisse avec ses louanges

Ma mère aucune dédicace ne pourrait être à la hauteur de l'amour la sécurité et la tendresse dans tu as fait part à mon égard je suis ce que je suis uniquement grâce à vous ce pourquoi je ne cesserai de vous remercier puisse dieu vous accorde santé et longue vie afin que je puisse vous combler à mon tour

A mes frères YacerHamani, Zakari et Samir et mes sœurs Sadika, Fahima, Tiziri, Amina, Samia et Amel et les femmes de mes frères Noumidia et Fahima qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus difficiles

A toute la famille Djafri et Chilla. A tous mes amis proche Nesrine, lydiaNouria, MassilvaKatia Sara et Thilelli

A ma binôme, pour tous les moments quand on a vécu ensemble durant la préparation de ce travail.

DJAFRI Kenza

Table des matières

Table des matières

Remerciement	
Dédicaces	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Les généralités sur les générateurs thermoélectriques	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Différents types d'énergies	3
I.2.1 Énergies renouvelables	3
I.2.2. Les énergies non renouvelables	6
I.3 Historique du générateur thermoélectrique.....	6
I.4 Effets thermoélectriques.....	7
I.5 Conversion d'énergie par effet thermoélectrique	11
1.5.1 Génération d'énergie par effet de Seebeck	11
1.5.2 Réfrigération par effet de Peltier	11
I.6 Les générateurs thermoélectrique.....	12
I.7 Types de générateurs thermoélectriques	12
1.7.1 Générateur thermoélectrique massifs	12
1.7.2 Générateur thermoélectrique en couche mince.....	13
1.7.3 Générateur thermoélectrique sur substrat souple Green TEG.....	13
I.8 Les applications des dispositifs thermoélectriques.....	14
I.9. La configuration des modules thermoélectrique	15
I.10.Caractérisation des modules thermoélectriques et des convertisseurs.....	15
I.10.1 Caractérisation des modules thermoélectriques	16
I.10.2 Modélisation d'un module thermoélectrique et caractéristique	16
I.10.2.1. Les équations mathématiques de TEG :	17
Conclusion	17
Chapitre II: Les commandes MPPT utilisées pour les TEGs	
Introduction.....	18
II.1. La circuiterie électronique pour générateurs thermoélectriques.....	18
II.2. Convertisseur DC/DC (hacheurs).....	19
II.2.1 Le convertisseur BUCK-BOOST	19
II.2.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK-BOOST	20

II.2.2 Convertisseur Buck	22
II.2.2.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK.....	23
II.2.3 Convertisseur BOOST	25
II.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BOOST.....	26
II.3 Commande MPPT	27
II.4 Critères d'évaluation d'une commande MPPT.....	28
II.5. Suivi du point de puissance maximale	29
II.6. Convertisseur DC/DC pour MPPT	29
II.7. Techniques MPPT à algorithmes performants.....	30
II.8 Les algorithmes classiques	30
II.8.1 Commande MPPT par la méthode (P&O)	30
II.8.2. La méthode Incrément des Conductances (IncCond)	32
II.8.3 Commande par mode glissant.....	35
II.8.3.1 Principe de commande par mode glissant	35
II.8.3.2 Système à structure variable.....	35
II.8.3.3 Choix de la surface de glissant	37
II.9. Les algorithmes évaluent.....	37
II.10. La commande choisie	41
Conclusion	41
Chapitre III: Application de MPPT pour un système de générateur thermoélectrique	
III.1. Introduction.....	42
III .2. Caractéristique de TEG (HZ-20) :	42
III.3. Connexion induit par l'intermédiaire d'un étage d'adaptation DC/DC :.....	45
III.3.1 Le convertisseur choisi par notre système :.....	46
III.3.2. Application de la commande (p&o) :	46
III.3.3. Les résultats de la simulation	47
Conclusion	49
Conclusion générale	50
Bibliographies	
Résumé	

Liste des abréviations

TH	Température chaude
TC	Température froide
Qp	La quantité de flux de chaleur
Π_{ab}	Le coefficient Peltier relatif au couple de matériaux considérés
Qτ	Le flux de chaleur
Qj	La chaleur dissipée
R	Est la résistance électrique du matériau considéré
QC	La conduction thermique dans un matériau
α_{ab} Π_{ab}	Les coefficients thermoélectrique
T	La température ambiante
$(\alpha = \int (\tau/T)dT)$	Le coefficient Seebeck d'un matériau
TEG	Générateur thermoélectrique
CPU	Central procession unit
PC	Les polymérase chaine réaction
Vteg	La tension de générateur thermoélectrique
Iteg	Le courant de générateur thermoélectrique
Voc	La tension de circuit ouvert
MPPT	Maximum power point tracking
P&O	Perturbation et observation
P	Positive
N	Négative
Ic	Conductance incrémentale
Mc	Le mode de convergence
MG	Le mode de glissement
MRP	Le mode du régime permanent
n	Degrés relative
P	La puissance électrique
DC/DC	Convertisseur électrique continu-continu

Liste des figures

FIGURE I. 1 : CHAMP D'EOLIENNE	4
FIGURE I. 2 : CENTRAL HYDRAULIQUE	4
FIGURE I. 3 : ENERGIE DE LA BIOMASSE	5
FIGURE I. 4 : ENERGIE MAREMOTRICE	5
FIGURE I. 5 : PANNEAUX SOLAIRES	6
FIGURE I. 6 : EXPERIENCE DE SEEBECK	7
FIGURE I. 7 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'EFFET SEEBECK.....	8
FIGURE I. 8 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'EFFET PELTIER	9
FIGURE I. 9 : SCHEMA DE PRINCIPE DE L'EFFET THOMSON POUR $\tau < 0$ (A) ET $\tau > 0$ (B)[2].....	9
FIGURE I. 10 : MODULE GENERATEUR THERMOELECTRIQUE CLASSIQUE	11
FIGURE I. 11 : MODULE REFRIGERATEUR THERMOELECTRIQUE CLASSIQUE	12
FIGURE I. 12 : GENERATEUR THERMOELECTRIQUE MASSIFS EURECA MESSTECHNIK.....	12
FIGURE I. 13 : GENERATEURS THERMOELECTRIQUE EN COUCHE MINCE MICROPELT.....	13
FIGURE I. 14 : GENERATEUR THERMOELECTRIQUE SUR SUBSTRAT SOUPLE GREEN TEG.....	13
FIGURE I. 15 : SCHEMA D'UN MODULE THERMOELECTRIQUE.....	15
FIGURE I. 16 : MONTAGE DE CARACTERISATION.....	16
FIGURE I. 17 : SPECIFICATIONS TECHNIQUES DU MODULE HZ-20.....	16
FIGURE II. 1 : CIRCUITERIE ELECTRONIQUE POUR GENERATEURS THERMOELECTRIQUES.....	19
FIGURE II. 2 : SCHEMA DE BASE D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST	20
FIGURE II. 3 : LES DEUX CONFIGURATIONS D'UN CONVERTISSEUR BUCK-BOOST SUIVANT L'ETAT DE L'INTERRUPTEUR S	20
FIGURE II. 4 : SCHEMA DU CONVERTISSEUR BUCK.....	23
FIGURE II. 5 : SCHEMA BUCK LORSQUE L'INTERRUPTEUR S EST FERME	23
FIGURE II. 6 : SCHEMA BUCK LORSQUE L'INTERRUPTEURS 'EST OUVERT.....	23
FIGURE II. 7 : SCHEMA DU CONVERTISSEUR BOOST	25
FIGURE II. 8 : SCHEMA BOOST LORSQUE L'INTERRUPTEUR S EST FERME.....	25
FIGURE II. 9 : SCHEMA BOOST LORSQUE L'INTERRUPTEURS 'EST OUVERT	25
FIGURE II. 10 : CARACTERISTIQUE P-V D'UN TEG ET PRINCIPE DE LA METHODE P&O.....	31
FIGURE II. 11 : ALGORITHME DE LA METHODE P&O.....	32
FIGURE II. 12 : PRINCIPE DE LA TECHNIQUE IC.....	33

FIGURE II. 13 : ALGORITHME DE LA COMMANDE MPPT BASEE SUR LA METHODE DE CONDUCTANCE INCREMENTALE	34
FIGURE II. 14 : DIFFERENTS MODES DE CONVERGENCE POUR LA TRAJECTOIRE D'ETAT.....	35
FIGURE II. 15 : DIFFERENTS MODES POUR LA TRAJECTOIRE DANS LE PLAN DE PHASE.....	36
FIGURE II. 16 : STRUCTURE DE BASE D'UN CONTROLEUR MPPT FLOU	38
FIGURE II. 17 : PRINCIPE DE MPPT A BASE DE LA LOGIQUE FLOUE	40
FIGURE III. 1 : TEG (HZ-20).....	42
FIGURE III. 2 : SCHEMA BLOC DE TEG AVANT L'IMPLEMENTER DANS UN SEUL BLOC.....	42
FIGURE III. 3 : SCHEMA BLOC DE TEG.....	43
FIGURE III. 4 : V_{TEG} ET P_{TEG} EN FONCTION I_{TEG}	43
FIGURE III. 5 : CARACTERISTIQUE PUISSANCE/TENSION.....	44
FIGURE III. 6 : CARACTERISTIQUE COURANT/TEMPS.....	44
FIGURE III. 7 : CARACTERISTIQUE TENSION/TEMPS.....	45
FIGURE III. 8 : SCHEMA BLOC D'UN TEG PAR LA COMMANDE MPPT DE TYPE P&O	46
FIGURE III. 9 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE TEMPS.....	47
FIGURE III. 10 : LA VARIATION DE COURANT EN FONCTION DE TEMPS.....	47
FIGURE III. 11 : LA VARIATION DE LA TENSION D'ENTREE V ET LA TENSION DE SORTIE V_s	48
FIGURE III. 12 : LA VARIATION DE COURANT, TENSION, PUISSANCE AINSI LA TENSION DE SORTIE, EN FONCTION DE TEMPS.	48
FIGURE III. 13 : LE RAPPORT CYCLIQUE ET LE RENDEMENT EN FONCTION DE TEMPS.....	49

Introduction générale

Au quotidien, une quantité importante d'énergie thermique est perdue principalement dans les secteurs des transports et de l'industrie. Pour récupérer une partie de cette chaleur perdue, on peut utiliser un générateur thermoélectrique (en anglais, thermoelectricgenerator 'TEG') qui peut directement convertir l'énergie thermique en électricité grâce à un mécanisme appelé effet Seebeck. Les dispositifs thermoélectriques peuvent également transformer le courant électrique en un gradient de température (effet Peltier) qui peut être utilisé pour le chauffage ou le refroidissement.

De nombreuses applications actuelles et futures des TEG sont proposées dans la littérature en comptant la production d'électricité dans des conditions sévères (industrie spatiale, régions éloignées), dissiper (automobile, avion, hélicoptère, navire) les usages domestiques dans les pays en développement, micro-TEG pour capteur et microélectronique et utilisation d'un système solaire hybride chaleur-énergie étaient couramment utilisés dans la littérature en raison de leur simplicité et de leur facilité d'implémentation.

Les TEG offrent certains avantages tels qu'une longue durée de vie, une petite taille, un poids léger, un fonctionnement silencieux en raison de l'absence de pièces mobiles, indépendamment de conditions météorologiques, aucune pollution de l'environnement, un faible cout de maintenance et une ressource énergétique renouvelable. En revanche, ils souffrent d'un inconvénient majeur qui est généralement l'énergie générée inférieur à 10%, qui fait l'objet de recherches complémentaires pour améliorer les performances de l'ensemble du système TEG. Il est donc nécessaire d'effectuer une recherche de nouveaux matériaux thermoélectriques préférés avec le plus haut niveau possible du paramètre, le facteur de mérite;études du système de conditionnement d'énergie, compris les convertisseurs de puissance et la méthode MPPT (suivi du point de puissance maximale)

Ce mémoire est organisé en trois chapitres, le premier chapitre est consacré sur des généralités sur les TEGs, nous avons présenté les différents effets thermoélectriques, et donné une définition sur les TEGs et leurs différents types ainsi leurs applications et par finir avec la modélisation et la simulation d'un TEG sur Matlab-Simulink en boucle ouvert.

Le deuxième chapitre est basé sur l'étude des différentes méthodes de commande MPPT (P&O, la commande floue, commande par mode glissant, incrémental) La plupart de ces méthodes sont itératives, basées sur la perturbation du rapport cyclique du convertisseur statique par un petit incrément. Ces algorithmes sont capables de suivre la puissance crête avec une bonne précision.

Le troisième chapitre présente le système étudié qui est composé d'un TEG, d'un convertisseur de type BOOST commandé par une technique MPPT de type P&O, et d'une charge résistive. Ensuite, l'implémentation du système TEG dans le logiciel Matlab-Simulink a été faite en utilisant les bibliothèques de Simulink et de sympowersystem. Des résultats de simulation sont extraits et interprétés. Enfin quelques conclusions et perspectives sont proposés à la fin de ce mémoire.

...

Chapitre I

Les généralités sur les générateurs thermoélectriques

I.1 Introduction

Pendant ces dernières décennies, la consommation énergétique est en croissance dans toutes les régions du monde. En effet, d'après les études de l'agence internationale de l'énergie, la demande mondiale d'énergie pourrait augmenter de 45% d'ici l'an 2030, en raison du développement démographique et de l'industrialisation. Parmi les sources de production d'énergie les plus importantes, on cite les énergies fossiles ce type d'énergie est en épuisement progressif, d'où la nécessité de diversifier les sources d'énergie et d'avoir recours à d'autres alternatives. Développement des bioénergies, pratique à ces nouvelles stratégies environnementales et, dans un avenir proche, la thermoélectricité pourrait également devenir une piste complémentaire.

En effet, la thermoélectricité permet de convertir l'énergie électrique en énergie thermique mais aussi, inversement, de transformer de la chaleur en électricité. Les générateurs thermoélectriques constituent aussi un outil de choix pour répondre aux enjeux écologiques mondiaux en valorisant les innombrables sources de perte thermique (industrie, automobile, chaleur du corps humain)

Dans ce chapitre nous allons parler sur les types et les principes d'un TEG en passant par les types d'énergies existantes.

I.2 Différents types d'énergies

Selon l'épuisement des ressources, on peut classer les énergies en énergies renouvelables et non renouvelables

I.2.1 Énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cyclique ou constants induits par les astres : le soleil essentiellement pour la chaleur générée par la terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part la vitesse à laquelle elles sont renouvelées [1].

I.2.1.1 Les sources d'énergie renouvelables

L'énergie éolienne est une énergie du vent, dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable. [22]



Figure I. 1 : Champ d'éolienne

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages [22]



Figure I. 2 : Central hydraulique

L'énergie de la biomasse c'est la matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique, utilisable comme source d'énergie.



Figure I. 3 : Energie de la biomasse

L'énergie marémotrice créée par les marées causées par l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil



Figure I. 4 : Energie marémotrice

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant de soleil traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie et parvenant à la surface de la terre.



Figure I. 5 : Panneaux solaires

I.2.2. Les énergies non renouvelables

Une source d'énergie non renouvelables renouvelle moins vite qu'on ne la consomme et de manière négligeable à l'échelle humaine par opposition aux énergies renouvelables. Les principales sources d'énergie non renouvelables sont des produits possédant des propriétés énergétiques intrinsèques (comme les matières fissiles sources d'énergie nucléaire) ou créés à partir de biomasse fossile que le temps a transformée en hydrocarbures.

I.3 Historique du générateur thermoélectrique

La thermoélectricité repose sur trois effets, découverts successivement dans la première moitié du XIXe siècle. Le premier de ces trois effets a été mis en évidence par Thomas Seebeck en 1821. Il remarqua qu'une aiguille métallique est déviée si elle est placée entre deux matériaux conducteurs de natures distinctes, reliés par des jonctions portées à des températures différentes. Et cru alors fournir une explication au magnétisme terrestre en s'appuyant sur la différence de température entre les pôles et l'équateur.

Pendant son expérience il a découvert qu'en présence d'un circuit fermé réalisé en formant deux jonctions entre un barreau de bismuth et un fil de cuivre, il y a déviation d'une aiguille aimantée lorsqu'une extrémité est chauffée. Cette déviation met en évidence l'apparition d'un courant électrique.

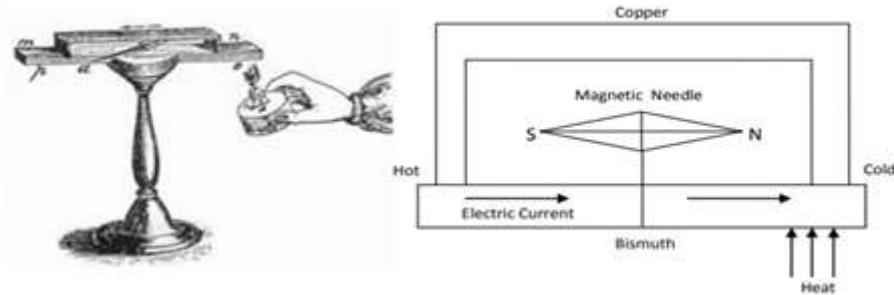


Figure I. 6 : expérience de Seebeck

Treize années plus tard, le scientifique français Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) découvrit la deuxième manifestation de la thermoélectricité, le phénomène inverse de celui découvert par Thomas J. Seebeck. En 1834, Peltier constata que le changement de sens d'un courant électrique continu entre deux matériaux conducteurs reliés entre eux pouvait engendrer une fluctuation de la température aux jonctions de ces deux matériaux : c'est « l'effet Peltier »

La thermoélectricité résida dans ces faits expérimentaux antagonistes et sans lien apparent jusqu'en 1851, lorsque William Thomson (qui deviendra Lord Kelvin en 1892) établit une première relation thermodynamique entre les coefficients de Seebeck et de Peltier. Il prédit alors l'existence d'un troisième effet, connu aujourd'hui comme l'effet Thomson, en démontrant, toujours sur la base d'arguments empruntés à la thermodynamique des processus réversibles qu'un matériau échange de la chaleur avec le milieu extérieur lorsqu'il est soumis à un gradient de température et parcouru par un courant électrique. Bien que l'approche soit contestable, il s'est avéré bien des années plus tard, avec le développement de la thermodynamique des processus irréversible, que les relations de Kelvin étaient correctes.

1.4 Effets thermoélectriques

Les effets thermoélectriques décrivent l'interaction entre la chaleur et l'électricité dans les solides. Sur la base de ces effets, des dispositifs thermoélectriques ont été développés et utilisés pour la production d'énergie ou la réfrigération. Les effets thermoélectriques qui ont lieu dans un TEM comprennent : l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson. Ces trois effets sont liés par les relations de Kelvin. Ils représentent les fondamentaux de la thermoélectricité [2]

➤ Effet Seebeck

C'est un phénomène physique découvert par Seebeck en 1821. Il s'agit de la génération d'une tension électrique V aux bornes de deux jonctions de matériaux dissemblables, notés ici a et b, lorsqu'ils sont exposés à un gradient de température $\Delta T = T_H - T_C$ (voir la Figure 1.7), où T_H et T_C désignent les températures des côtés chaud et froid, respectivement [2][23]

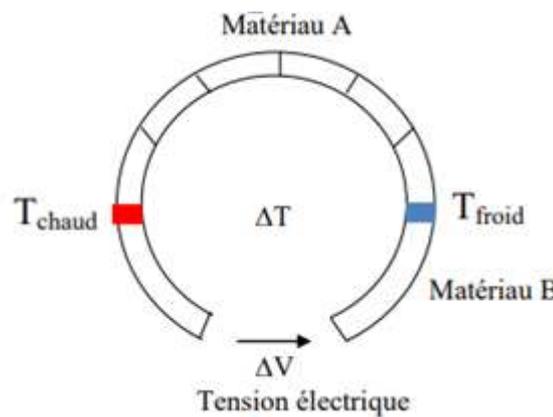


Figure I. 7 : Schéma de principe de l'effet Seebeck

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

$$VOC = \alpha_{ab} \cdot \Delta T \quad (I.1)$$

Le coefficient de proportionnalité α_{ab} [$V \cdot K^{-1}$] est le coefficient Seebeck

➤ Effet Peltier :

De façon réciproque, le passage d'un courant au travers d'une jonction A-B entre deux matériaux va s'accompagner d'une libération ou d'une absorption de chaleur Q suivant le sens du courant (Figure 1.8). Cette absorption et ce dégagement de chaleur sont proportionnels à l'intensité du courant I qui les traverse, La quantité de flux de chaleur (absorbée/dissipée) d'une jonction à une autre jonction est donnée par :

$$QP = \pi_{ab} \cdot I \quad (I.2)$$

Où π_{ab} [$W \cdot A^{-1}$] est le coefficient Peltier relatif au couple de matériaux considérés. [2]

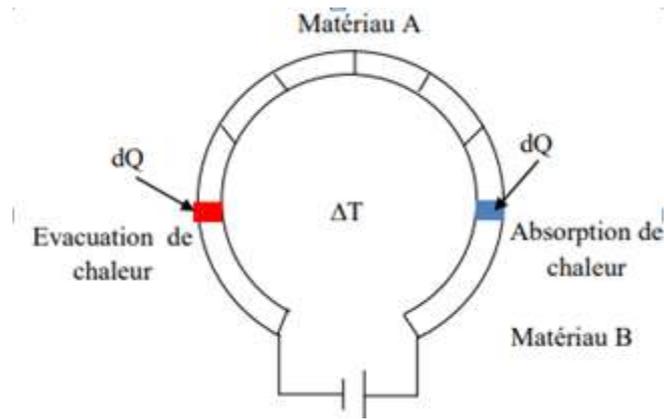


Figure I. 8 : Schéma de principe de l'effet Peltier

➤ **Effet Thomson :**

C'est un phénomène physique découvert par Thomson en 1851 contrairement aux effets Seebeck et Peltier, l'effet Thomson s'observe pour un matériau unique. Il représente l'absorption/dissipation de flux de chaleur Q_τ résultant de l'action simultanée d'un gradient de température ΔT et de la circulation d'un Courant électrique I dans un matériau voir la Figure 1.8 L'absorption/dissipation totale de flux de chaleur est donnée par :

$$Q_\tau = \tau \cdot \Delta T \cdot I \quad (1.3)$$

Où $\tau [W \cdot I^{-1} \cdot K^{-1}]$ est le coefficient Thomson.

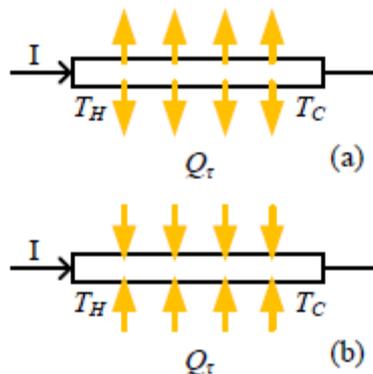


Figure I. 9 : Schéma de principe de l'effet Thomson pour $\tau < 0$ (a) et $\tau > 0$ (b)[2]

L'effet Thomson existe dans tous les dispositifs de conversion thermoélectrique et son influence peut être importante lorsque le gradient thermique appliqué à ses bornes est élevé La Figure 1.8 illustre le comportement d'un matériau selon que $t < 0$ (a) ou $\tau > 0$ (b) ; le matériau diffuse ou absorbe un flux de chaleur, respectivement. L'effet Thomson est en général difficile à mettre en évidence car il est faible devant l'effet Joule [19].

➤ Effet Joule

C'est un phénomène qui relie les aspects thermiques et les aspects électriques, découvert par Joule en 1843. Il apparaît lorsqu'un courant électrique I circule à travers un matériau. La chaleur dissipée par cet effet est quantifiée [2]

$$Q_j = R \cdot I^2 \quad (1.4)$$

Où R est la résistance électrique du matériau considéré.

➤ Conduction thermique :

Elle est également connue sous le nom de processus de Fourier. Ce phénomène décrit la conductivité ou la résistivité thermique à travers un matériau. Le transfert de flux de chaleur associé à la conduction thermique dans un matériau est présenté par [24]

$$Q_{ct} = \frac{\Delta T}{\theta} \quad (1.5)$$

Où θ est la résistance thermique du matériau considéré.

Les trois coefficients thermoélectriques α_{ab} , π_{ab} et τ ne sont pas indépendants les uns des autres, mais sont liés par les relations de Kelvin [2] :

$$\pi_{ab} = \alpha_{ab} \cdot T \quad (1.6)$$

$$\tau = T \cdot \frac{d\alpha_{ab}}{dT} \quad (1.7)$$

Où T est la température ambiante.

L'équation 1.6 décrit le lien entre les effets Seebeck et Thomson. Cette relation permet de définir le coefficient Seebeck d'un matériau unique ($\alpha = \int (\tau/T) dT$), encore appelé coefficient Seebeck absolu. De plus, il peut être démontré que le coefficient Seebeck d'une jonction entre deux matériaux a et b est le même que la différence entre les deux coefficients absolus (i.e.,

$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b$). Une autre implication importante des relations de Kelvin est que ces trois effets thermoélectriques existent simultanément dans tout dispositif thermoélectrique lorsqu'il est utilisé avec un courant électrique et un gradient de température, que ce soit dans le mode de génération d'électricité ou de réfrigération. En utilisant la définition de l'effet Peltier et la première relation de Kelvin, on détermine [25]

$$Q_{a/d} = \alpha_{ab} \cdot T_{H/C} \cdot I \quad (1.8)$$

I.5 Conversion d'énergie par effet thermoélectrique

Les applications qui exploitent les effets thermoélectriques sont classées sous deux catégories de la conversion d'énergie. Ces deux catégories sont la réfrigération thermique par effet de Peltier et la génération de l'énergie électrique par effet de Seebeck.

1.5.1 Génération d'énergie par effet de Seebeck

La génération d'énergie par un module thermoélectrique consiste à convertir une chaleur appliquée en un courant électrique par effet de Seebeck. Le générateur thermoélectrique est composé d'un ensemble de thermocouple mis électriquement en série et thermiquement en parallèle chaque thermocouple est formé par deux matériaux différents connectés entre eux par un connecteur métallique. La figure 1.10 illustre un montage classique d'un module générateur thermoélectrique.

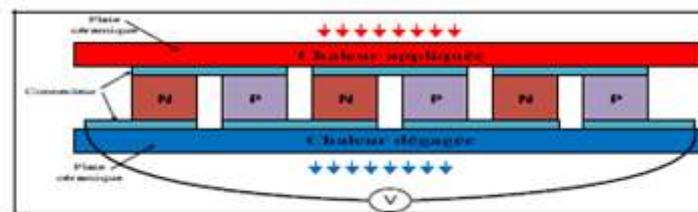


Figure I. 10 : Module générateur thermoélectrique classique

Les deux plaques céramiques fonctionnent comme collecteur et évacuateur de chaleur pour, respectivement, le côté chaud et le côté froid. Elles sont des conducteurs de chaleurs et des isolateurs électriques afin de ne pas court-circuiter les thermocouples. Le rendement de ce type des modules dépend de sa topologie et la qualité des matériaux thermoélectriques utilisés et la charge couplée sur sa sortie. [5]

1.5.2 Réfrigération par effet de Peltier

La réfrigération thermique consiste à créer un cycle de pompage de chaleur entre deux côtés d'un module thermoélectrique en exploitant l'effet de Peltier (Bonnissel, 1997). La figure I.11 montre le principe de ce module.

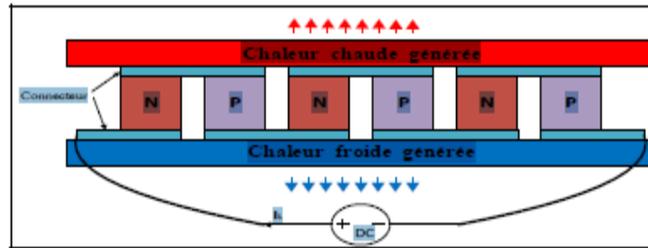


Figure I. 11 : Module réfrigérateur thermoélectrique classique

I.6 Les générateurs thermoélectrique

Les générateurs thermoélectriques permettent la conversion directe de l'énergie thermique en énergie électrique. Constitué d'un ensemble de modules thermoélectriques insérés entre deux échangeurs de chaleur. Chaque module thermoélectrique est ensuite constitué de quelques dizaines à certain couple de matériaux semi-conducteur qui permettent de convertir directement une partie de la chaleur qui les traversent en énergie électrique [4].

I.7 Types de générateurs thermoélectriques

1.7.1 Générateur thermoélectrique massifs

Un générateur thermoélectrique constitue le cœur de système de récupération d'énergie thermique. Plusieurs générations thermoélectriques existent à ce jour celles-ci se distinguent Notamment par leurs méthodes de fabrication, même. Si les matériaux thermoélectriques employés sont communs. Les premiers générateurs réalisés appartiennent à la catégorie des générateurs dits massifs. Un exemple de générateur massif de la gamme proposée par EurekaMesstechnik est présenté dans la figure suivant

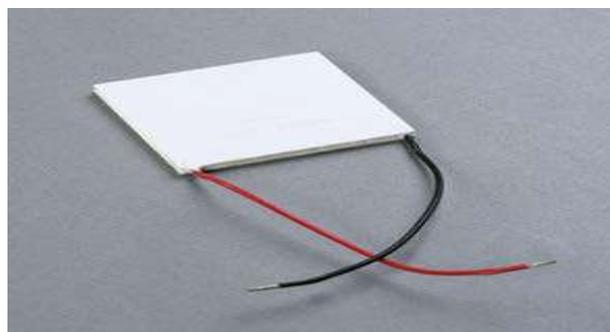


Figure I. 12 : Générateur thermoélectrique massifs EurekaMesstechnik.

I.7.2 Générateur thermoélectrique en couche mince

L'essor des techniques de micro-fabrication permet aujourd'hui de réaliser des générateurs thermoélectrique aux dimension très inférieures aux générateurs massifs cette technologie offre la possibilité de cibler des applications impliquant des objets plus compacts de plus elle présente l'intérêt d'intégrer un nombre de paires d'élément semi-conducteurs p-n important un générateur massifs comporte en moyennes quelques dizaines de paires de jonction p-n par centimètre carré tandis qu'un générateurs en couche mince peut intégrer plus d'une certaine de paires de millimètre carré par conséquent ce type de TEG délivre des tensions exploitables a partir de gradients de température relativement faibles. En revanche le nombre important de paires de jonction p-n augmente la résistance électrique du générateur ce qui limite la puissance électrique générée



Figure I. 13 : Générateurs thermoélectrique en couche mince Micropelt

I.7.3 Générateur thermoélectrique sur substrat souple Green TEG

D'autres générateurs peuvent être réalisés sur substrat souple Green TEG développe actuellement des générateurs thermoélectriques flexibles pour l'intégration dans une vanne de chauffage intelligente et à énergie autonome. Cette figure montre un exemple de ce type de fabricant Green TEG en différentes tailles et géométries cependant cette technologie.



Figure I. 14 : Générateur thermoélectrique sur substrat souple Green TEG

1.8 Les applications des dispositifs thermoélectriques

Avant d'aborder les principales applications des générateurs thermoélectriques (TEG), nous allons tout d'abord citer quelques applications des (TEC). Les TEC fournissent une forme compacte de refroidissement/chauffage réversible et rapide, sans pièces mobiles [6]. Ils sont principalement utilisés dans la médecine pour des petits refroidissements comme les vaccins médicaux, les tissus organiques et la conservation du sang. Ils sont aussi utilisés pour le contrôle thermique et la gestion des Central Processing Unit (CPU) et pour refroidir les lasers à diode. De plus, ils sont utilisés dans les systèmes de chauffage/refroidissement des sièges automobiles. Les TEC sont également utilisés pour produire une température de -80°C afin de faire fonctionner les capteurs dans les systèmes d'imagerie infrarouge et les systèmes de vision nocturne. Dans les sciences de la vie et la biologie, les Polymérase Chain Réaction (PCR) utilisent les TEC pour le traitement et l'analyse rapides de l'ADN (l'amplification de l'ADN passe par un traitement thermique à trois cycles : la dénaturation à 94° , le recuit à 54° et l'extension à 72°). Quant à eux, les TEG sont utilisés pour récupérer la chaleur résiduelle dans un large.

Le concept de générateur thermoélectrique venant d'être expliqué précédemment, nous sommes maintenant en mesure de présenter les applications où il peut être utilisé. Les secteurs concernés par la génération thermoélectrique sont nombreux mais le niveau de maturité de cette technologie reste très hétérogène dans l'ensemble des secteurs. En effet certains domaines utilisent les TEG depuis plusieurs dizaines d'années alors que d'autres, poussés par des motivations environnementales ou d'efficacité énergétique commencent tout juste à mettre en service leurs prototypes. De plus chaque secteur ayant des spécificités et des contraintes qui lui sont propres, nous avons décidé de classer les TEG en cinq catégories différentes définies comme suit :

- La production d'électricité en milieu extrême, avec des sources de chaleur dédiées ;
- La récupération de chaleur perdue, l'objectif ici est de convertir l'énergie thermique perdue en électricité de manière à augmenter le rendement du système global ;
- La production d'électricité décentralisée ;
- La micro production, avec des puissances de l'ordre du mW ;
- La production solaire thermoélectrique.

I.9. La configuration des modules thermoélectrique

Le passage des caractéristiques locales des couples thermoélectriques à l'utilisation par l'ingénieur de convertisseurs thermoélectriques rajoute plusieurs contraintes technologiques.

La première d'entre elles est la compatibilité des deux matériaux dopés P et N. Ils doivent avoir des propriétés physiques proches de manière à ce que la géométrie des branches soit similaire. Ils sont connectés par des languettes conductrices. Cette connexion n'est pas directe sinon le matériau conducteur diffusera dans les semi-conducteurs. Une étape appelée nickelage est donc nécessaire. A cela s'ajoute la liaison languette/barreau qui est réalisée via une brasure à bas point de fusion (PbSn ou BiSn).

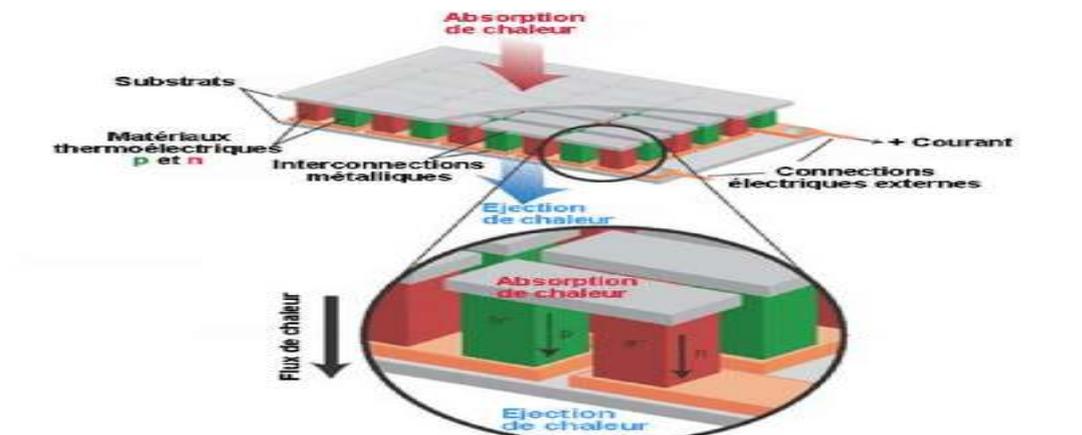


Figure I. 15 : schéma d'un module thermoélectrique.

La deuxième contrainte est l'augmentation du nombre de couple de manière à faire transiter des flux thermiques et des puissances électriques plus importantes. Pour cela, on associe plusieurs couples thermoélectriques électriquement en série et thermiquement en parallèle comme illustré Figure I.15 Typiquement un module comprend entre une dizaine et une centaine de couples. Ces derniers sont ainsi soumis au même gradient de température et au même courant électrique ce qui leur permet de travailler au même point de fonctionnement.

I.10. Caractérisation des modules thermoélectriques et des convertisseurs

Dans un TEG, l'élément qui va convertir la puissance thermique en puissance électrique est le module thermoélectrique. Afin de modéliser correctement l'ensemble d'un TEG, il convient donc de caractériser correctement les modules thermoélectriques. L'énergie électrique produite par ces derniers ne peut être directement stockée dans une batterie, il faut l'adapter. C'est le rôle du convertisseur DC/DC.

I.10.1 Caractérisation des modules thermoélectriques

Connaître les caractéristiques thermoélectriques des modules que nous utiliserons est essentiel afin de mieux prédire leurs performances dans le code numérique et ainsi pouvoir effectuer des optimisations.

I.10.2 Modélisation d'un module thermoélectrique et caractéristique

Le banc de caractérisation permet principalement d'étudier les propriétés électriques du module en fonction des températures de chacune de ses faces. Pour caractériser pleinement nos modules thermoélectriques, il convient donc d'obtenir l'évolution de la tension à vide E_0 et de la résistance interne R en fonction de plusieurs paramètres. Pour cela on utilise le montage de la Figure I.16.

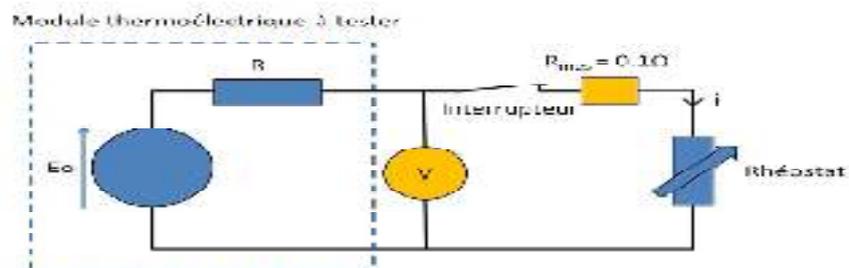


Figure I. 16 : montage de caractérisation.

I.10.3 spécification techniques du module HZ-20

Specifications Techniques du module HZ-20

Thermo electrical material	Bismuth Telluride
Weight (g)	115
Module dimensions (mm)	75 x 75 x 5.08
Number of Couples	71
Maximum continuous temperature (°C)	250
Design hot side temperature (°C)	230
Design cold side temperature (°C)	30
Thermal Conductivity λ (W/cm.K)	0.024
Power (W)	19
Load voltage (V)	2.38
Internal resistance (Ω)	0.3
Current (A)	8
Open circuit voltage (V)	5
Efficiency (%)	4.5

Figure I. 17 : spécifications techniques du module HZ-20

I.10.2.1. Les équations mathématiques de TEG :

- La tension du générateur thermo électrique est variée sous la forme :

$$V_{teg} = V_{oc} - R \cdot I_{teg} \quad (I.10)$$

- Le gradient de température appliqué sur un thermo générateur est de la forme suivante :

$$\Delta T_{teg} = T_h - T_c \quad (I.11)$$

- D'où La tension de circuit ouvert V_{oc} est donnée par :

$$V_{oc} = S \cdot \Delta T = \alpha \cdot k_{th} \cdot (T_h - T_c) \quad (I.12)$$

Alors que le courant est calculé par :

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

- Finalement on trouve l'équation de la puissance comme suite :

$$P_{teg} = I_{teg} \cdot V_{teg} \quad (I.14)$$

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des généralités sur générateur thermoélectrique, nous avons d'abord offert quelques définitions des différentes sources d'énergies renouvelables qui présentent une opportunité pour production d'énergie gratuite et écologique.

Ensuite nous avons présenté les différents effets thermoélectriques qui existe et concentrer sur la génération d'énergie par effet Seebeck, ainsi nous avons expliqué la réfrigération par effet Peltier. Et donné une définition sur les générateurs thermoélectrique et leurs différents types ainsi leurs applications et nous avons expliqué la configuration des modules thermiques et leur caractéristique,

Dans le chapitre suivant les différentes méthodes de commande MPPT pour la recherche De point maximal de puissance sera étudié et détaillé.

Chapitre II

Les commandes MPPT utilisées pour les TEGs

Introduction

MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximal d'un générateur électrique non linéaire. Les commandes MPPT sont généralement associées avec les générateurs photovoltaïque ou thermoélectrique.

Et comme on a vu dans le chapitre précédent, les différentes caractéristiques d'un générateur thermoélectrique montrent bien que la puissance maximale générée dépend de la valeur de la différence de température appliquée. Donc dans ce chapitre on va définir les différents techniques de commandes appliquées aux générateurs thermoélectrique pour extraire leurs valeurs maximums de la puissance et on a donné une présentation générale sur la modélisation des quelque convertisseurs DC/DC de types hacheurs

II.1. La circuiterie électronique pour générateurs thermoélectriques

Dans les systèmes de récupération d'énergie thermique, le générateur thermoélectrique est une source d'alimentation continue. La puissance électrique P produite par le TEG est variable selon les conditions de fonctionnement (variation du gradient de température ou du flux de chaleur), d'où la nécessité d'un premier convertisseur DC-DC pour suivre le point de puissance maximale en utilisant les algorithmes dits MPPT, garantissant ainsi un transfert du maximum de la puissance électrique disponible à la charge. Cependant, la variation de la puissance électrique ainsi obtenue induit une tension variable en sortie de ce premier convertisseur DC-DC1. Un deuxième convertisseur DC-DC2 est alors nécessaire pour réguler la tension de sortie délivrée à la charge. Un étage intermédiaire de stockage d'énergie (batterie) est souvent inclus entre les convertisseurs si des applications autonomes sont visées. Pour résumer, la circuiterie électronique d'interface pour générateurs thermoélectriques, inclut deux convertisseurs DC-DC en cascade et est présentée à la Figure II.1 quand elle nécessite le stockage de l'énergie. L'intérêt majeur de cette structure est non seulement la double fonction suivie de puissance-régulation de tension que l'on souhaite réaliser avec la même topologie, mais aussi la possibilité de stocker l'énergie (batterie). [2]

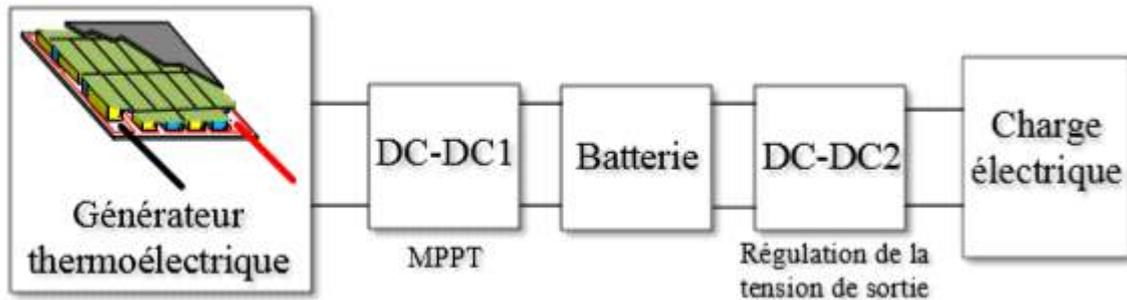


Figure II. 1 : Circuiterie électronique pour générateurs thermoélectriques.

II.2. Convertisseur DC/DC (hacheurs)

Le hacheur ou convertisseurs continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandée, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé. [3]

Un convertisseur de tension continue DC/DC est un module (ou mini module) générant une tension de sortie régulée, isolée de la tension de la tension d'entrée. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un « découpage » haute fréquence caractérisé par un rendement élevé jusqu'à 94% pour les modules à « haute rendement ».

Cependant il existe différents types de convertisseur DC-DC qui sont utilisés fréquemment dans telles applications comme :

- Hacheur série Buck « abaisseur »
- Hacheur parallèle Boost « élévateur »
- Hacheur série parallèle « Buck-Boost

II.2.1 Le convertisseur BUCK-BOOST

Un convertisseur BUCK-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. [11]

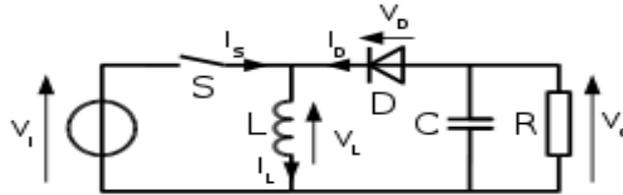


Figure II. 2 : Schéma de base d'un convertisseur BUCK-BOOST

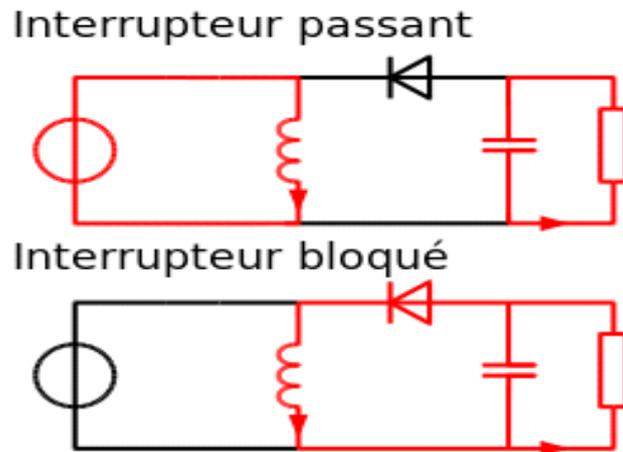


Figure II. 3 : Les deux configurations d'un convertisseur BUCK-BOOST suivant l'état de l'interrupteur S

II.2.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK-BOOST

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK-BOOST peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S (Figure. II.2) :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S (Figure. II.3) est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs BUCK et BOOST les principales différences sont :

- La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée
- La tension de sortie peut varier de 0 à ∞ (pour un convertisseur idéal).

- **Conduction continue**

Lorsqu'un convertisseur BUCK-BOOST travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La figure 3 montre les formes d'ondes du courant et de la tension dans un convertisseur BOOST. La tension de sortie est calculée de la façon suivante (en considérant les composants comme parfaits). Durant l'état passant, l'interrupteur S est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation [3]

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (II.1)$$

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{L, \text{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_L \alpha T}{L} \quad (II.2)$$

α Étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit. α Est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est :

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_L}{L} \quad (II.3)$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est :

$$\Delta I_{L, \text{off}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_L (1 - \alpha) T}{L} \quad (II.4)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$W = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (II.5)$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (\text{II.6})$$

En remplaçant ΔI_{on} et ΔI_{off} par leur expression, on obtient :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{E_s \alpha T}{L} - \frac{V_o (1 - \alpha) T}{L} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{E_s} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (\text{II.8})$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours négative (le rapport cyclique α variant entre 0 et 1), que sa valeur absolue augmente avec α , théoriquement jusqu'à l'infini lorsque α approche 1. Si on omet la polarité, ce convertisseur est à la fois dévolteur (comme le convertisseur Buck) et survolteur (comme le convertisseur BOOST). C'est pour cela qu'on le qualifie de BUCK-BOOST.

II.2.2 Convertisseur Buck

Le convertisseur Buck ou abaisseur est seulement capable de fournir une tension de sortie inférieure à la tension d'entrée. Le convertisseur Buck présenté à la Figure II.4 est la topologie de commutation abaisseur la plus simple. Il est constitué d'un interrupteur S agissant comme interrupteur d'alimentation pour l'inductance L, d'une diode D1 assurant la continuité du courant dans L et d'un condensateur de filtrage C réduisant l'ondulation de la tension de sortie V_o . La puissance d'entrée est fournie par une source de tension continue délivrant une tension V_{in} . La charge en sortie est représentée par une résistance R_L .

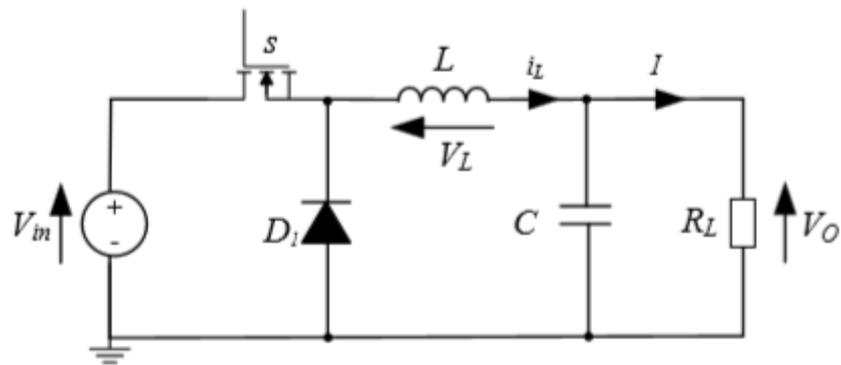


Figure II. 4 : Schéma du convertisseur Buck.

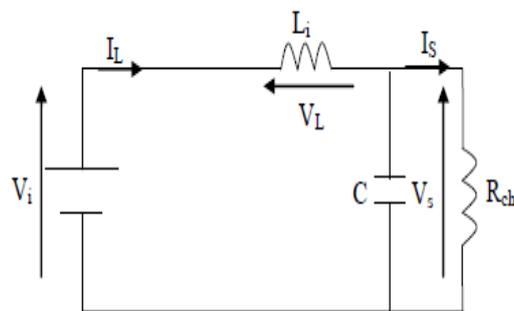


Figure II. 5 : schéma Buck lorsque L'interrupteur s est ferme

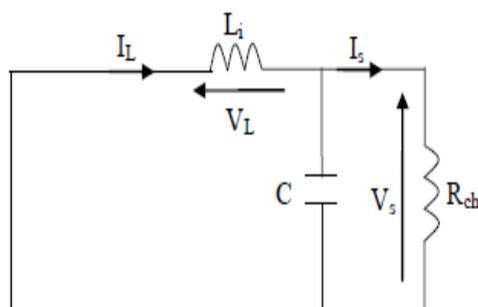


Figure II. 6 : schéma Buck lorsque L'interrupteurs 'est ouvert

II.2.2.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BUCK

Quand un convertisseur Buck travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

Le taux d'accroissement de I_L est donné par :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.9})$$

Avec V_L égale $V_i - V_o$ pendant l'état passant et $-V_o$ durant l'état bloqué. Par conséquent, l'augmentation de I_L durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (\text{II.10})$$

De même, la baisse du courant dans l'inductance durant l'état bloqué est donnée par :

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_{\alpha T}^T dI_L = \int_{\alpha T}^T \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} \quad (\text{II.11})$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} L \times I_L^2 \quad (\text{II.12})$$

En conséquent, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{(V_i - V_o) \cdot \alpha \cdot T}{L} - \frac{V_o \cdot (T - \alpha \cdot T)}{L} = 0 \quad (\text{II.13})$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$V_o = \alpha \cdot V_i \quad (\text{II.14})$$

Grace à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique. Le rapport cyclique étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_o est toujours inférieure à celle d'entrée. C'est pour cela que l'on parle parfois de dévolteur.

II.2.3 Convertisseur BOOST

Le convertisseur BOOST ou élévateur est seulement capable de fournir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée. La topologie du convertisseur BOOST est présentée à la Figure II.7 Lorsque l'interrupteur S est ON, le courant il traversant l'inductance L augmente, tandis que la diode D1 est inversement polarisée. Lorsque S est OFF, la diode D1 devient conductrice.

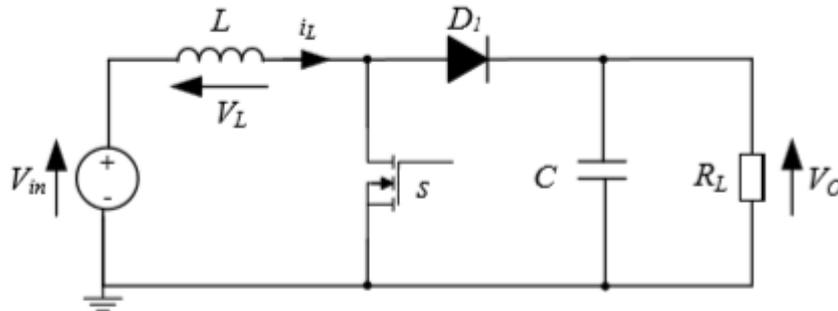


Figure II. 7 : Schéma du convertisseur BOOST

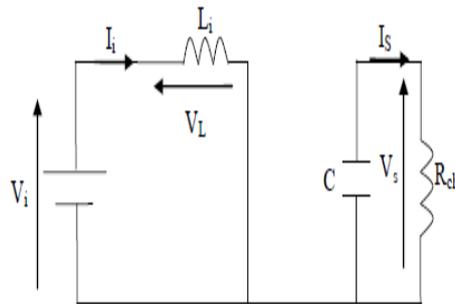


Figure II. 8 : schéma Boost lorsque L'interrupteur s est ferme

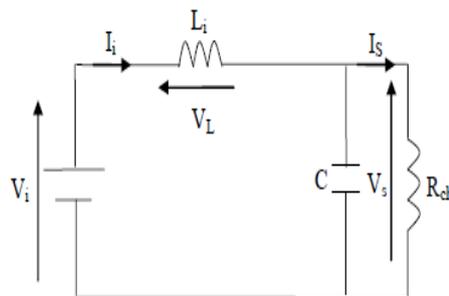


Figure II. 9 : schéma Boost lorsque L'interrupteurs 'est ouvert

II.2.3.1 Principe de fonctionnement d'un convertisseur BOOST

Comme l'étude précédente du Boost nous nous intéresse qu'au mode de fonctionnement continu. Les états de commutations sont contrôlés avec une période constante et un rapport cyclique variable, sur une période T le fonctionnement du circuit passe par deux phases.

- **Conduction continue**

Lorsqu'un convertisseur BOOST travaille en mode de conduction continue, le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais. La tension de sortie est calculée de la façon suivante (en considérant les composants comme parfaits) Durant l'état passant, l'interrupteur S est fermé comme illustré sur la Figure II.8, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.15})$$

À la fin de l'état passant, le courant I_L a augmenté de :

$$\Delta I_{L\alpha} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_L \alpha T}{L} \quad (\text{II.16})$$

α Étant le rapport cyclique. Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur S conduit. α est compris entre 0 (S ne conduit jamais) et 1 (S conduit tout le temps).

Pendant l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert comme illustré sur la Figure II.9, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge. Si on considère une chute de tension nulle aux bornes de la diode et un condensateur suffisamment grand pour garder sa tension constante, l'évolution de I_L est :

$$V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.17})$$

Par conséquent, la variation de I_L durant l'état bloqué est :

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_i - V_o) dt}{L} = \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)T}{L} \quad (II.18)$$

Si on considère que le convertisseur est en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est la même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. En particulier, l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (II.19)$$

En conséquence, le courant I_L traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (II.20)$$

En remplaçant ΔI_{ion} et ΔI_{off} par leur expression, on obtient :

$$\frac{V_i \cdot \alpha \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1 - \alpha)T}{L} = 0 \quad (II.21)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (II.22)$$

Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique α variant entre 0 et 1), qu'elle augmente avec α , et théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur

II.3 Commande MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système TEG. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α . [9] [8]

L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'un générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC/DC est choisie. [15]

II.4 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

Le rendement d'un système thermoélectrique ce n'est pas le seul paramètre qui montre la performance d'un commande MPPT, il y'a d'autres critères qui présentés dans la suite [10][12]

- **Simplicité et Cout**

Une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcout généré.

- **Réponse dynamique**

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible. [15]

- **Flexibilité**

Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux

De différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

- **Compétitive sur une large gamme de puissance**

La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

II.5. Suivi du point de puissance maximale

Pour optimiser le rendement du générateur thermoélectrique, il est important de produire le maximum de puissance en sortie du TEG. Un moyen permettant de fonctionner à tout moment au point de fonctionnement optimal doit être mis en œuvre. La recherche du maximum de puissance est assurée avec des algorithmes dits MPPT et Un convertisseur DC/DC utilisé pour ajuster les niveaux de tension et suivre la puissance crête du TEG. Plusieurs méthodes de maximisation de la puissance électrique d'une source continue d'énergie renouvelable ont été publiées dans la Littérature [13] [17]

Ces techniques ont été proposées pour maximiser la puissance générée par un Panneau Photovoltaïque (PV). Cependant, vu la similarité de type de source entre un TEG et un PV (source continue), ces techniques de maximisation de la puissance électrique peuvent être applicables dans le cas d'un TEG. On peut citer par exemple la méthode Perturbe & Observe (P&O) et la méthode Incremental Conductance (IC) ainsi la méthode à base de la logique floue et la méthode par glissant.

II.6. Convertisseur DC/DC pour MPPT

Un MPPT peut être conçu à la base de topologies BUCK ou BOOST. Le convertisseur BUCK est généralement employé pour abaisser la tension de sortie et le convertisseur BOOST est employé pour obtenir des tensions de sortie plus élevées.

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, un module thermoélectrique peut être modélisé, d'un point de vue électrique, par un générateur de tension dont la tension à vide et, dans une moindre mesure, la résistance interne varie en fonction de la température. Dans ce cas, la puissance maximale est obtenue lorsque l'on réalise une adaptation d'impédance, soit lorsque la résistance équivalente de la charge est égale à la résistance interne du module. Par extension, un générateur thermoélectrique qui est composé d'une association série/parallèle de modules thermoélectriques peut donc se modéliser de la même manière.

Afin de stocker l'énergie électrique produite par les modules thermoélectriques dans un dispositif de stockage, il est nécessaire de réaliser des convertisseurs DC/DC. Dans la plupart des applications comportant plusieurs modules thermoélectriques, tous ne travaillent pas dans

Les mêmes conditions de température, il est donc important d'avoir des convertisseurs DC/DC pour chaque point de fonctionnement. [7][5]

II.7. Techniques MPPT à algorithmes performants

Il y a plusieurs types de commande MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Perturb&Observe (P&O), l'incrément de Conductance (Inc-Cond) et par intelligence artificielle (logique floue, L'optimisation des essaims de particules).

II.8 Les algorithmes classiques

II.8.1 Commande MPPT par la méthode (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique cette méthode est basée sur le principe de perturbation de la tension de la source d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale (incrément ou décrémentation). On analyse ensuite la variation de puissance de la source qui en résulte [8].

Si la variation de la puissance augmente ($\Delta P > 0$), cela signifie qu'on est dans la bonne direction, on maintient alors le même sens de perturbation (ΔV).

Au contraire si ($\Delta P < 0$), donc le point de fonctionnement s'éloigne du PPM, cela signifie qu'on est dans la mauvaise direction alors on inverse le sens de perturbation (ΔV).

La variation de rapport cyclique (α) est inversement proportionnelle à la variation de la tension de fonctionnement (si ΔV augmente le rapport cyclique α diminue, sinon). La Figure II.10 illustre son principe de fonctionnement

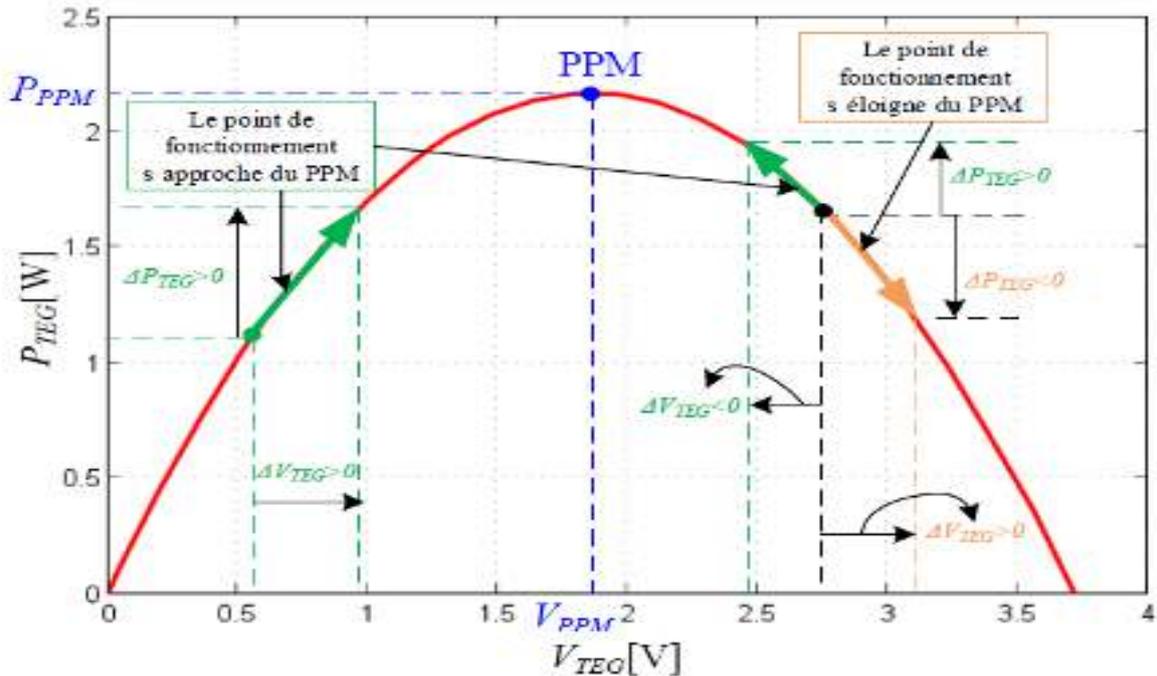


Figure II. 10 : Caractéristique P-V d'un TEG et principe de la méthode P&O

L'analyse de la courbe de la puissance en fonction de la tension d'un TEG (Figure II.9) montre qu'il existe deux zones de fonctionnement ; la première à gauche du PPM et la deuxième à droite du PPM. Lorsqu'on perturbe le point de fonctionnement quatre cas peuvent se présenter :

- Premier cas ($\Delta P_{TEG} > 0$ et $\Delta V_{TEG} > 0$) : on est donc dans la bonne direction, pour la prochaine itération, on continue à augmenter la tension du TEG, contrairement la valeur de rapport cyclique α sera diminué.
- Deuxième cas ($\Delta P_{TEG} > 0$ et $\Delta V_{TEG} < 0$) : on est donc dans la bonne direction, pour la prochaine itération, on continue la diminution de la valeur de la tension du TEG, contrairement la valeur de rapport cyclique α sera augmentée.
- Troisième cas ($\Delta P_{TEG} < 0$ et $\Delta V_{TEG} < 0$) : on est donc dans la mauvaise direction, pour la prochaine itération doit corriger le sens de recherche c-à-dire augmenter la valeur de la tension. Contrairement la valeur de rapport cyclique α sera diminuée.
- Quatrième cas ($\Delta P_{TEG} < 0$ et $\Delta V_{TEG} > 0$) : on est donc dans la mauvaise direction, pour la prochaine itération, on va diminuer la valeur de la tension, contrairement La valeur de rapport cyclique α sera augmentée, la Figure II.10 illustre l'organigramme de cette technique.

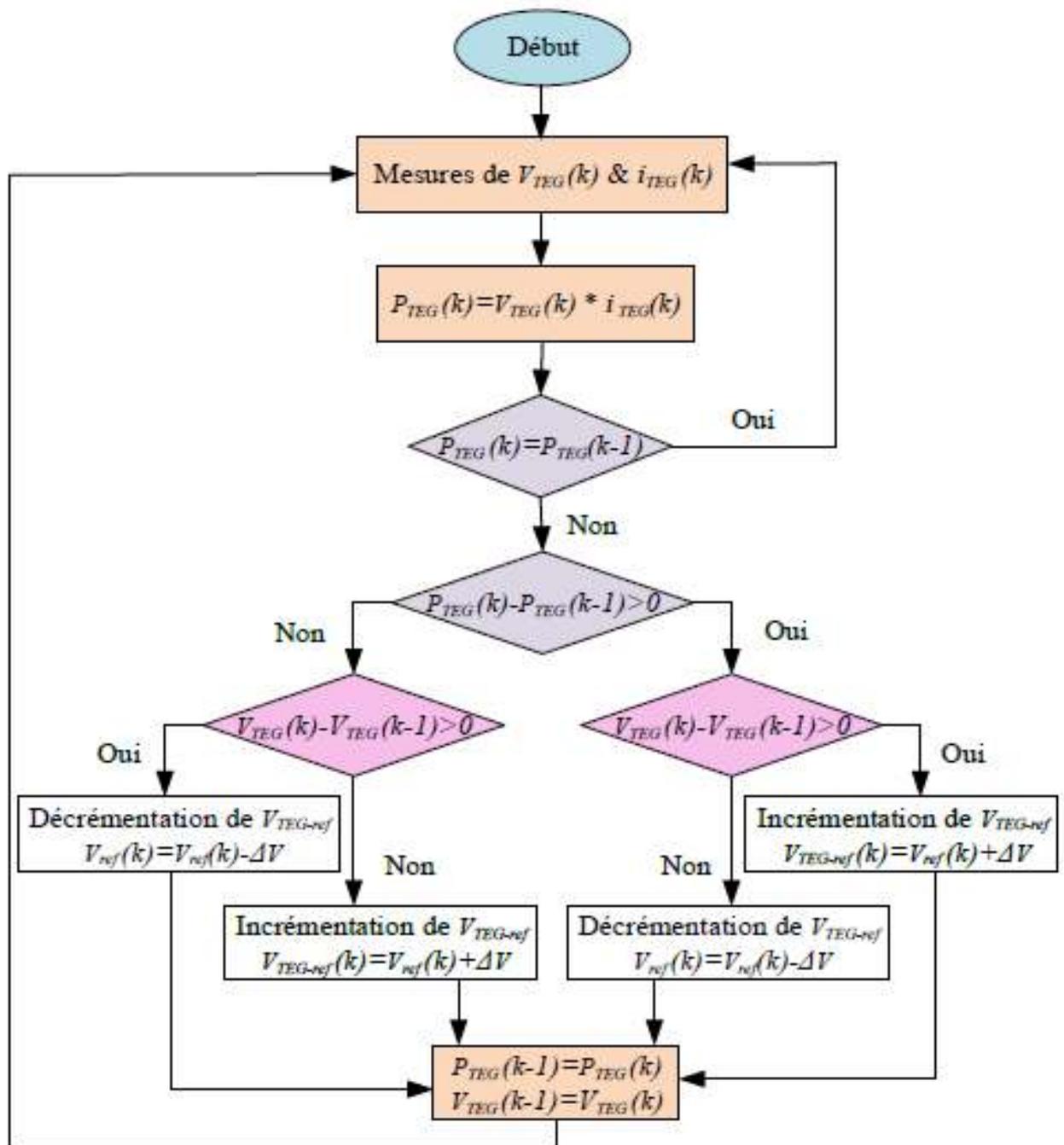


Figure II. 11 : Algorithme de la méthode P&O.

II.8.2. La méthode Incrément des Conductances (IncCond)

La commande MPPT nommé algorithme d'incrément de la conductance se base sur la dérivée de la conductance du TEG, pour connaître la position relative du point de puissance recherchée et enfin pour appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce point. Dans cette méthode, la tension de sortie du générateur est corrigée en permanence en

comparant à chaque instant la valeur de la conductance $\frac{I}{V}$ avec celle de l'incrément de conductance $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ [16]. Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure II.12

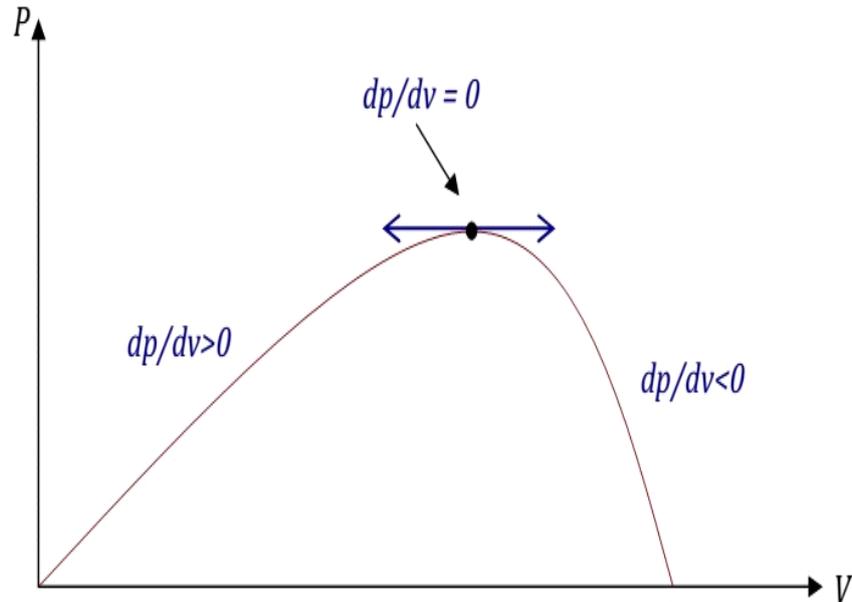


Figure II. 12 : Principe de la technique IC.

Elle est basée sur la détermination du signe de la pente de la caractéristique $P(V)$ du TEG,

Qui s'annule au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite, tel que :

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0$ à gauche du PPM (II.23)

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$ au PPM (II.24)

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$ à droite de PPM (II.25)

Avec :

- $\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = V \cdot \frac{dI}{dV} + I$ (II.26)

Donc

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$ (II.27)

Au point de puissance maximale la dérivée de la puissance s'annule ($\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$). Ce qui donne :

- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ (II.28)

On peut remarquer que la vérification du signe de la pente revient à comparer la conductance

$\frac{I}{V}$ et son incrément $\frac{\Delta I}{\Delta V}$

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} > 0$ SI $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$; le point de fonctionnement est à gauche du MPP. (II.29)

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} = 0$ SI $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$; le point de fonctionnement est sur le MPP. (II.30)

- $\frac{\Delta P}{\Delta V} < 0$ SI $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$; le point de fonctionnement est à droite du MPP. (II.31)

Le PPM peut être atteinte en comparant à chaque instant la valeur de la conductance I/V avec celle de l'incrément de conductance dI/dV . La figure II.13 montre l'algorithme de cette méthode.

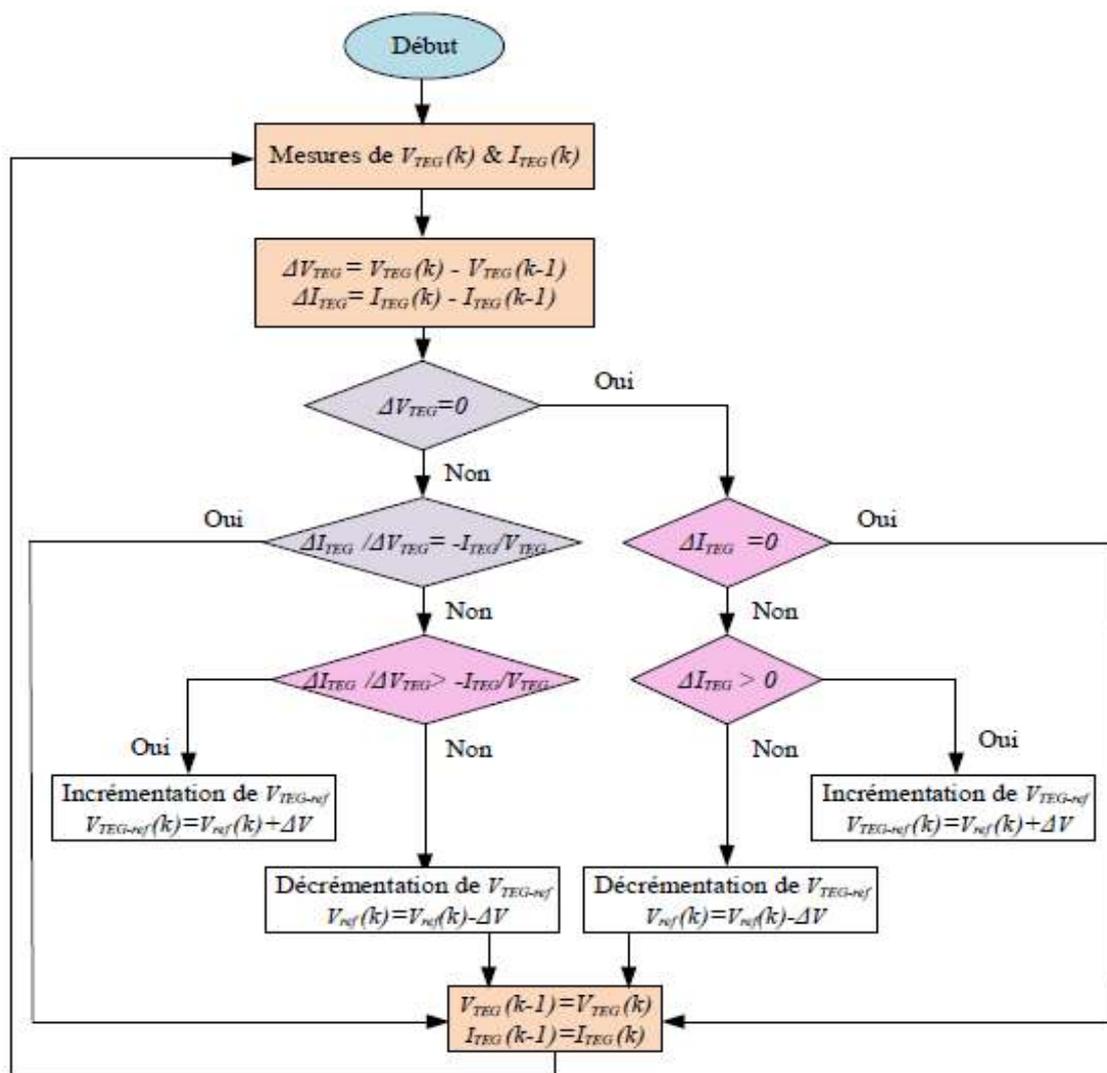


Figure II. 13 : Algorithme de la commande MPPT basée sur la méthode de conductance incrémentale

II.8.3 Commande par mode glissant

La technique des modes glissants consiste à diriger la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement

II.8.3.1 Principe de commande par mode glissant

La commande par mode glissant est une commande robuste qui se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée. Le contrôle généré par la commande par mode glissant est du type tout ou rien. Dans ce type de commande, l'état du système définit l'état de commutation de l'organe de contrôle. L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement, qui délimite deux sous espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande (figure II.14). La stabilisation sur la surface de glissement est obtenue à l'aide d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision [14].

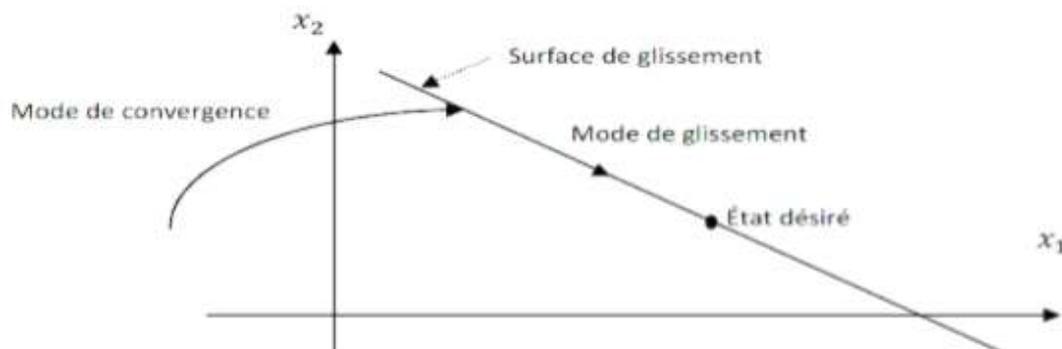


Figure II. 14 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état

II.8.3.2 Système à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est conduite vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est

forcée à rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit et appelé mouvement de glissement. La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

- Le mode de convergence -MC- : C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $s(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence
- Le mode de glissement -MG- : C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x, y) = 0$.
- Le mode du régime permanent -MRP- : Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

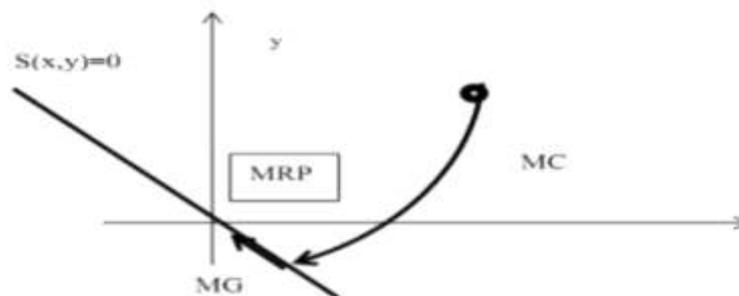


Figure II. 15 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

Les avantages de la commande par mode glissant sont importants et multiples : la haute précision, la simplicité, l'invariance, la robustesse, etc. Ceci lui permet d'être structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et des perturbations sur le modèle.

II.8.3.3 Choix de la surface de glissant

Le système à régler peut-être défini par l'équation (II.27) :

$$LS(x) = S \cdot x \quad (II.32)$$

Avec $S \in \mathbb{R}^{m \cdot n}$ et $S = \{x \forall \mathbb{R}^n : S \cdot x = 0\}$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler. Généralement, le nombre de surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande. La fonction linéaire $S(x)$, doit satisfaire les conditions de convergence et de stabilité du système, une forme générale a été donnée par

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{n-1} e(x) \quad (II.33)$$

Avec :

$e(x)$: est l'erreur entre la variable à réguler et sa référence : $e(x) = x^* - x$;

λ : est une constante strictement positive.

n : est un degré relatif.

II.9. Les algorithmes évalué

• Commandes MPPT à base de la logique floue

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh. La commande floue a les mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande. La poursuite du point PPM par la logique floue est divisée en deux phases, la première sera la recherche rapide, avec un pas important, la seconde sera une phase fine avec un pas très petit, ce qui assure une stabilité du système en diminuant les oscillations autour du point PPM. [26]

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

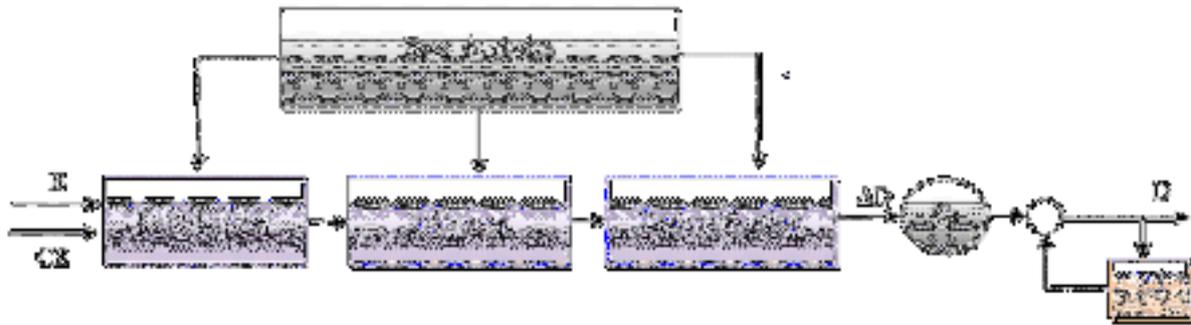


Figure II. 16 : structure de base d'un contrôleur MPPT flou

- **Fuzzification :**

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables flou.

Dans notre cas, on a deux entrées, la première sera l'erreur E qui est la variation de la puissance par rapport à la tension et la seconde entrée définie la variation de l'erreur CE qui donne une information sur le sens de la pente. La sortie du régulateur flou est la variation du rapport cyclique α du convertisseur statique DC/DC.

Les entrées E et CE sont exprimées comme suit :

$$E(t) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad (\text{II.34})$$

$$CE(t) = E(t) - E(t-1) \quad (\text{II.38})$$

Avec :

P(t) : puissance actuelle [W]
 P(t-1) : puissance précédente [W]
 ΔP : variation de la puissance [W]
 V(t) : tension actuelle [V]
 V(t-1) : tension précédente [V]
 ΔV : variation de la tension [V]

Pour chaque variable on associe un univers de discours et on partitionne chaque univers de discours en trois sous ensemble flous

- **Raisonnement flou ou bien Inférence**

L'inférence est une étape qui consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie. En effet, des règles d'appartenance vont être définies pour la sortie comme ça était fait pour les entrées, grâce à ces règles un tableau d'inférence peut être dressé. En effet, les systèmes utilisant la logique floue utilisent des règles du type : SI ... ALORS

Rappelons que le choix de ces règles consiste à modifier le rapport cyclique du convertisseur statique de telle sorte à atteindre le PPM et annuler l'erreur E, trois cas sont envisagés :

Premier cas : E est positive, c'est-à-dire, on se retrouve à gauche du PPM. Si la variation de la pente SE décroît, donc le point de fonctionnement converge vers le PPM, alors on maintient la même direction (continue à diminuer le rapport cyclique α). Si la variation de CE est croissante, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (diminuer α). Si CE est stable le point de fonctionnement ne se déplace pas, donc il faut diminuer le rapport cyclique α .

Deuxième cas : E est négative, c'est-à-dire, on se retrouve à droite du PPM. Si la variation de la pente CE croît, donc le point de fonctionnement converge vers le PPM, alors on maintient la même direction (continue à augmenter le rapport cyclique α). Si la variation de CE est croissante, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (diminuer α). Si la variation de CE décroît, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (augmenter α) si CE est stable, pas de déplacement, donc il faut augmenter le rapport cyclique α .

Troisième cas : si E est nulle, c'est-à-dire, on est au PPM se retrouve. Si la variation de la pente CE croît, donc on se déplace vers la gauche et le point de fonctionnement diverge de PPM. Alors il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (augmenter α). Si CE est stable, pas de déplacement, donc on n'a pas besoin de varier le rapport cyclique α .

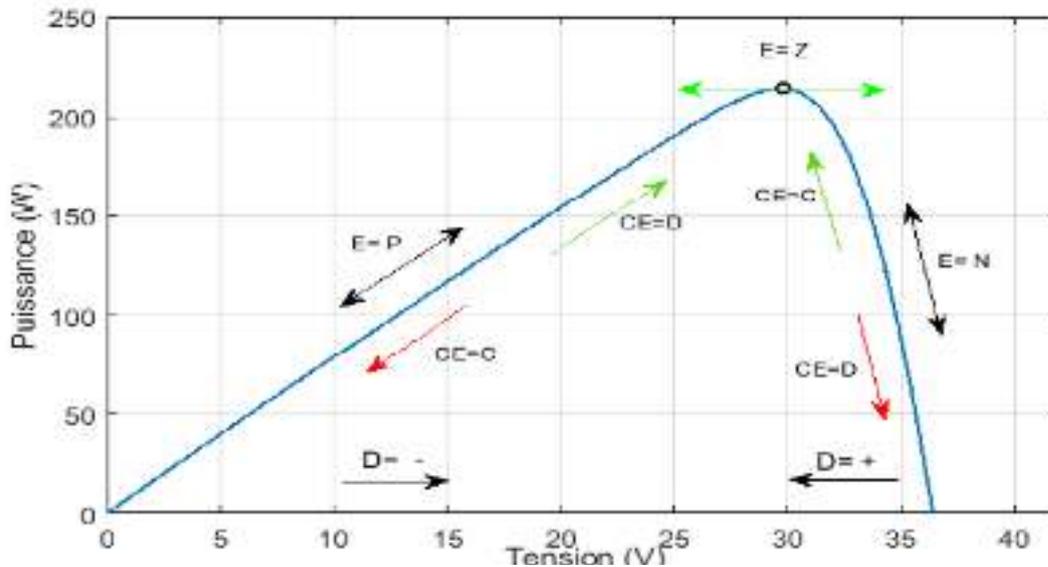


Figure II. 17 : Principe de MPPT à base de la logique floue

- **Défuzzification :**

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification. [27]

La méthode de la défuzzification de l'opérateur de 'centre de gravité', est donné par l'équation suivante :

$$\Delta D = \frac{\int \mu(D_i) \cdot D_i}{\int \mu(D_I)} = \frac{\sum_i \mu(D_i) \cdot D_i}{\sum_i \mu(D_i)} \quad (\text{II.36})$$

La logique floue est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le control et la prise de décision. Elle est très utile lorsque le modèle mathématique du problème à traiter n'existe pas ou existe mais difficile à implémenter, ou il est trop complexe pour être évalué assez rapidement pour des opérations en temps réel. Ou bien lorsque des experts humains sont disponibles pour fournir des descriptions subjectives du comportement du système avec des termes en langage naturel. La logique floue est aussi

Supposée de travailler dans les situations où il y a de large incertitude et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système.

II.10. La commande choisie

Dans notre projet on a choisi de travailler avec la méthode perturbation et observation (P&O) car c'est la plus utilisée dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre et la simplicité de sa structure de régulation et les nombres des paramètres de mesures réduits.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé la modélisation des différents convertisseurs DC/DC utilisés dans les générateurs thermoélectriques, puis on a fait une présentation du concept d'une commande MPPT et le principe de la recherche du point de puissance maximal et on a donné les différents algorithmes de commandes intelligentes ont été étudiés pour la poursuite de point de puissance maximal.

Dans ce travail nous avons détaillé la méthode 'perturbation et observation' puis nous avons cité et expliqué l'algorithme d'incrément de la conductance et la méthode par glissement à la fin on a parlé sur la méthode basée sur la logique floue.

Chapitre III

Application de MPPT pour un système de générateur thermoélectrique

III.1. Introduction

Comme nous allons vu dans les chapitres précédant les différentes caractéristiques de TEG ainsi les commandes MPPT existante, Donc dans ce chapitre on va faire une réalisation de notre modèle TEG par l'utilisation d'une commande MPPT de type (P&O) et pour réussir notre travaille nous avons implémenté notre modèle sur logiciel MATLAB car son extension graphique associe SIMILINK qui font partie d'un ensemble d'outils intégrés au traitement du signal, qui présentent la possibilité de simuler les système à leurs états continus et discrets , il est donc bien adaptés pour tester les commandes MPPT.

III .2. Caractéristique de TEG (HZ-20) :

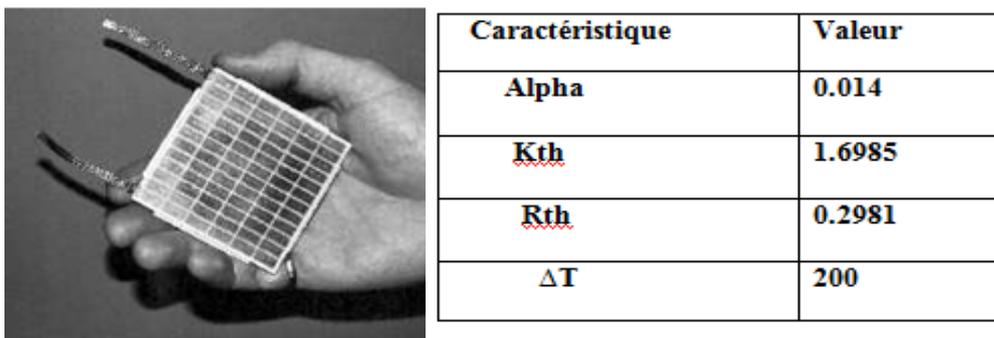


Figure III. 1 : TEG (HZ-20)

• Simulation de TEG :

Le schéma détaillé d'un générateur thermoélectrique en l'environnement Matlab/Simulink est représenté par la figure III.2 ainsi la figure III.3

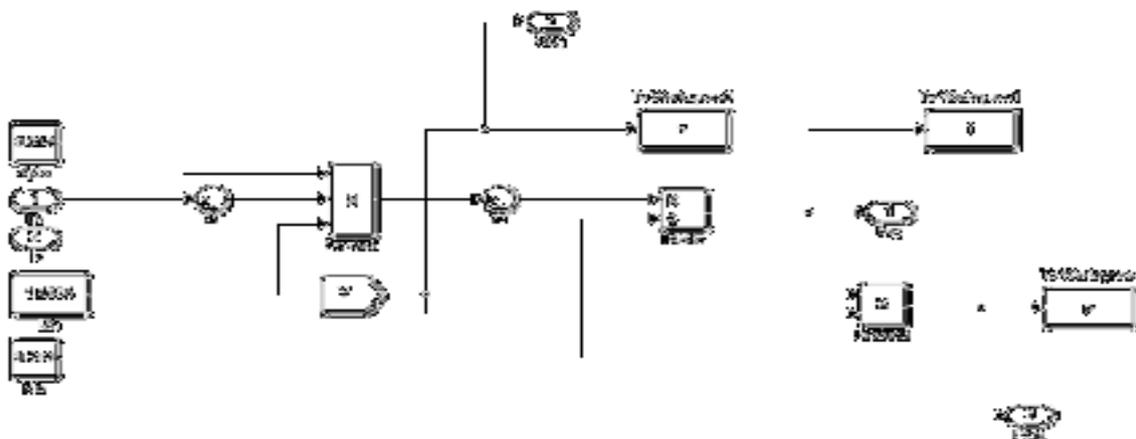


Figure III. 2 : schéma bloc de TEG avant l'implémenter dans un seul bloc

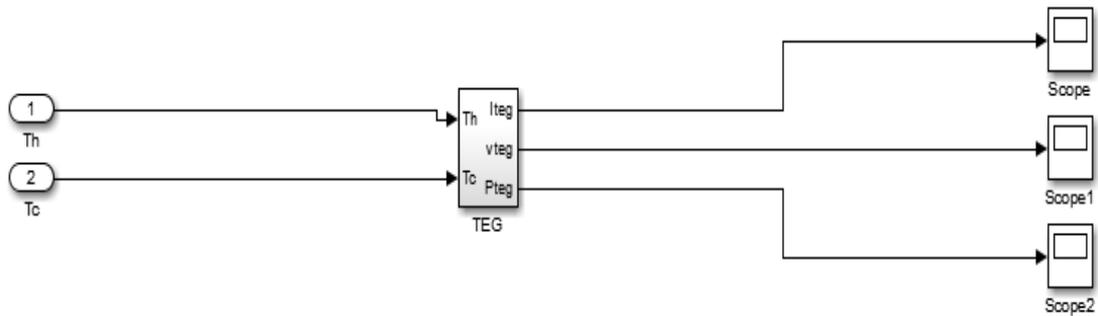


Figure III. 3 : schéma bloc de TEG

➤ Les résultats de la simulation :

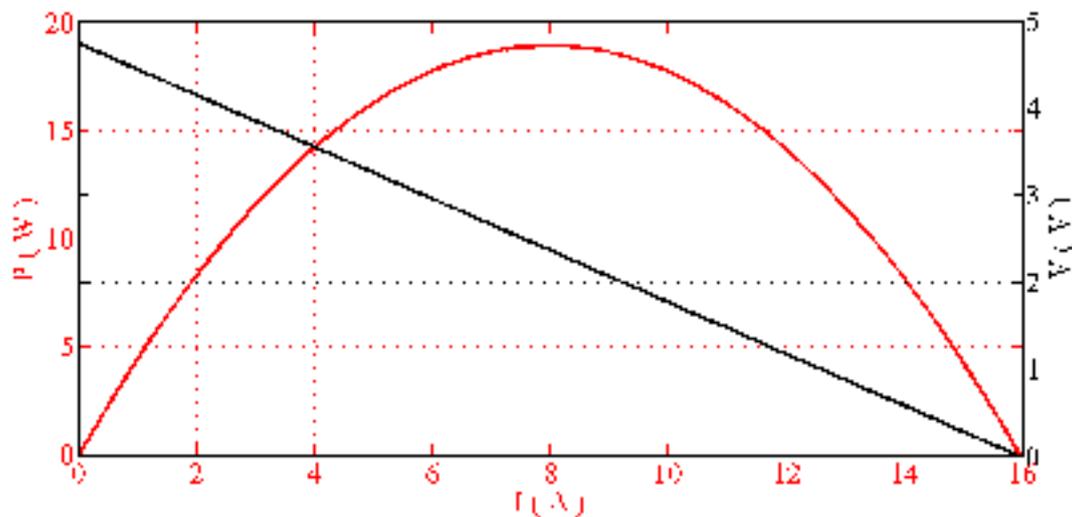


Figure III. 4 : V_{teg} et P_{teg} en fonction I_{teg}

On peut alors tracer en fonction du courant I , l'évolution de la puissance électrique et de la tension générée. Telle que la puissance est une courbe parabolique et que la puissance maximale (PPM) située au milieu.

En effet, la tension en circuit ouvert V_{oc} correspond à la valeur de la tension quand le courant est nulle (intersection de la droite de courant avec l'axe des abscisses). Le courant en Court-circuit I_{CC} correspond à la valeur du courant lorsque la tension est nulle (intersection de la droite de courant avec l'axe des ordonnées).

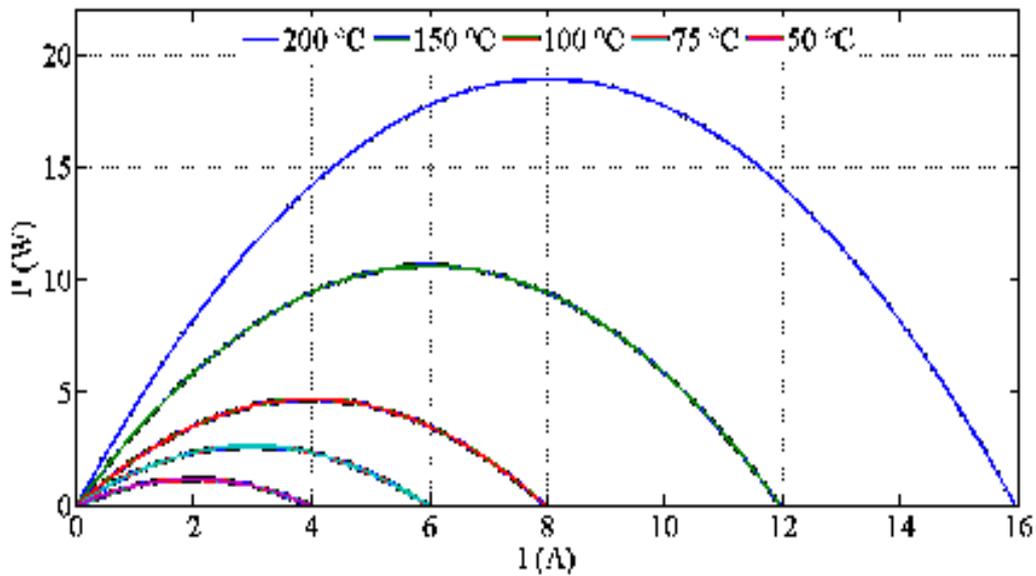


Figure III. 5 : caractéristique puissance/tension

La tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à différentes températures, Nous remarquons que l'augmentation de T_h (ΔT) Engendre une augmentation de la puissance de TEG, et le point maximal de la puissance est toujours situé au milieu.

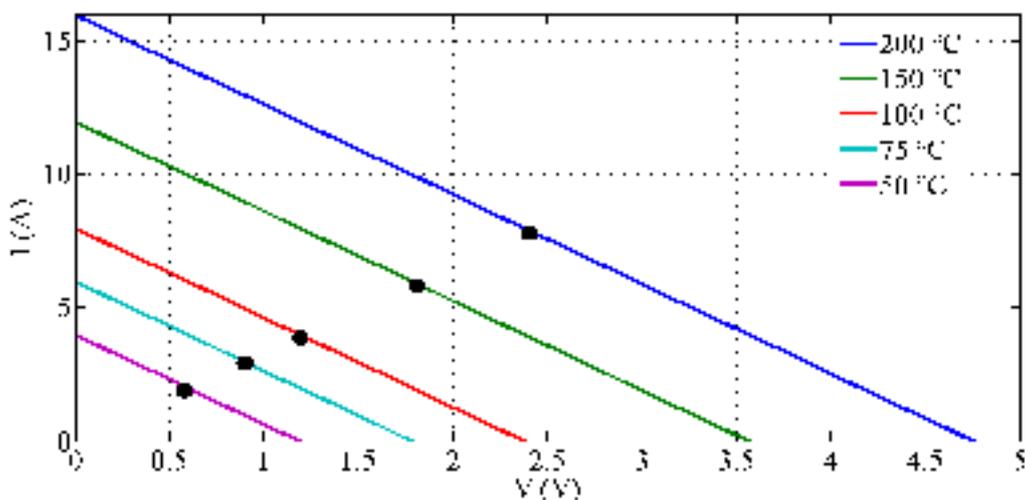


Figure III. 6 : caractéristique courant/tension.

Cette figure illustre l'influence du gradient de température sur les caractéristiques $I(v)$ et $V(v)$, on peut remarquer que la tension optimal V_{mp} est toujours égale à la moitié de la tension de circuit ouvert ainsi le courant I_{mp} est égale à la moitié du courant de circuit

Donc La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des couples thermoélectriques par ce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température

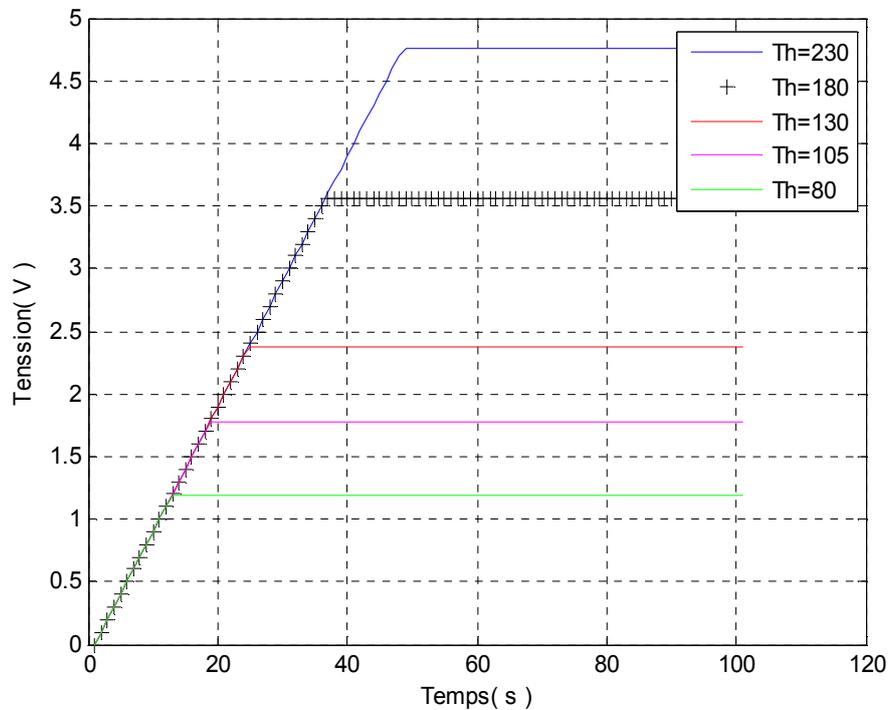


Figure III. 7 : caractéristique tension/temps.

Nous observons que la tension devient stable en certain moment ainsi pour les différentes températures

III.3. Connexion induit par l'intermédiaire d'un étage d'adaptation DC/DC :

Block schématique d'un générateur thermoélectrique associé d'une commande MPPT de type (P&O) sur le logiciel Matlab-Simulink.

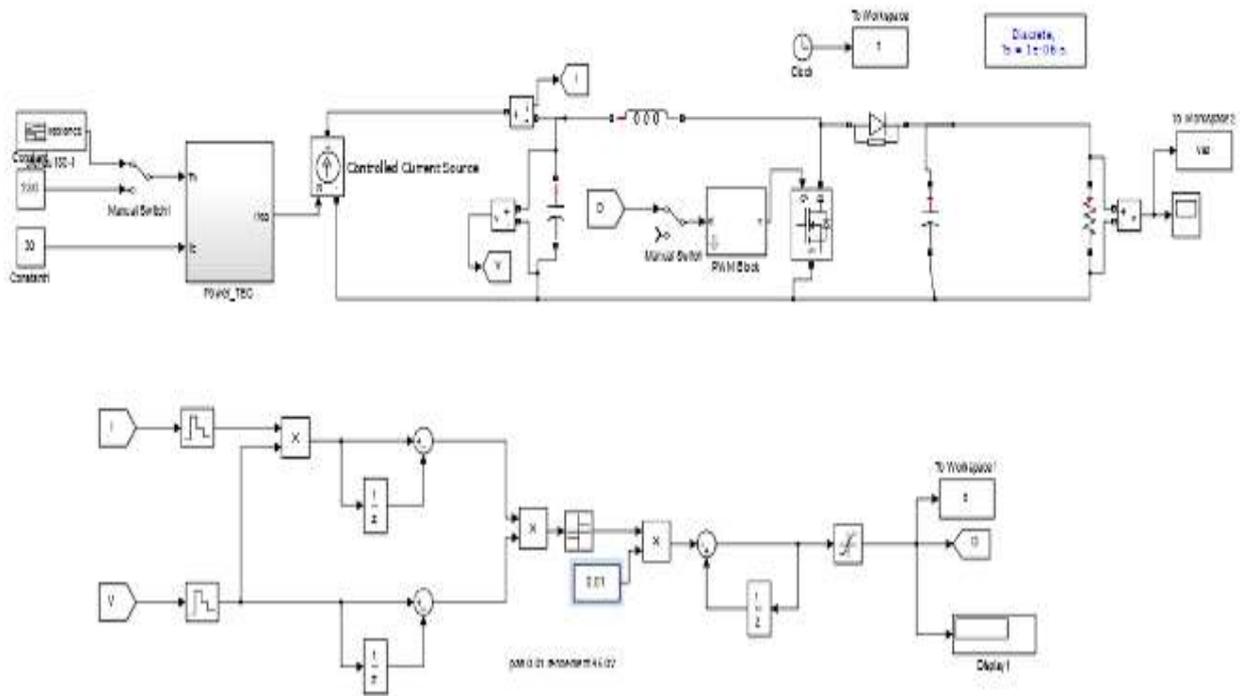


Figure III. 8 : Schéma bloc d'un TEG par la commande MPPT de type P&O

III.3.1 Le convertisseur choisi par notre système :

Dans notre système nous avons choisi de travailler avec le convertisseur élévateur (BOOST) pour son faible cout, sa conception simple, hautes performances donc nous choisissons le convertisseur BOOST comme une interface entre le générateur TE et la charge pour ajuster les niveaux de tension et suivre la puissance crête du TEG. Donc Le BOOST ne permet d'avoir une tension de sortie plus élevé que celle d'entée.

III.3.2.Application de la commande (P&O) :

Pour améliorer notre modèle (TEG) et obtenir une puissance maximale nous avons utilisé l'un des méthodes de la commande MPPT (P&O), Après avoir réalisé une modélisation mathématique du système global, Et l'implémenter sous le logiciel Matlab-Simulink. Le principe de la régulation est basé sur la variation du rapport cyclique à une valeur adéquate à l'aide d'un convertisseur statique (BOOST) dans le but de rapprocher du PPM.

III.3.3. Les résultats de la simulation

Pour une température T_c fixé à 30°C , On fait varier T_h selon un profil trapézoïdal, en appliquant le (P&O) et on relève des simulations pour ce système, et on illustre les résultats obtenus.

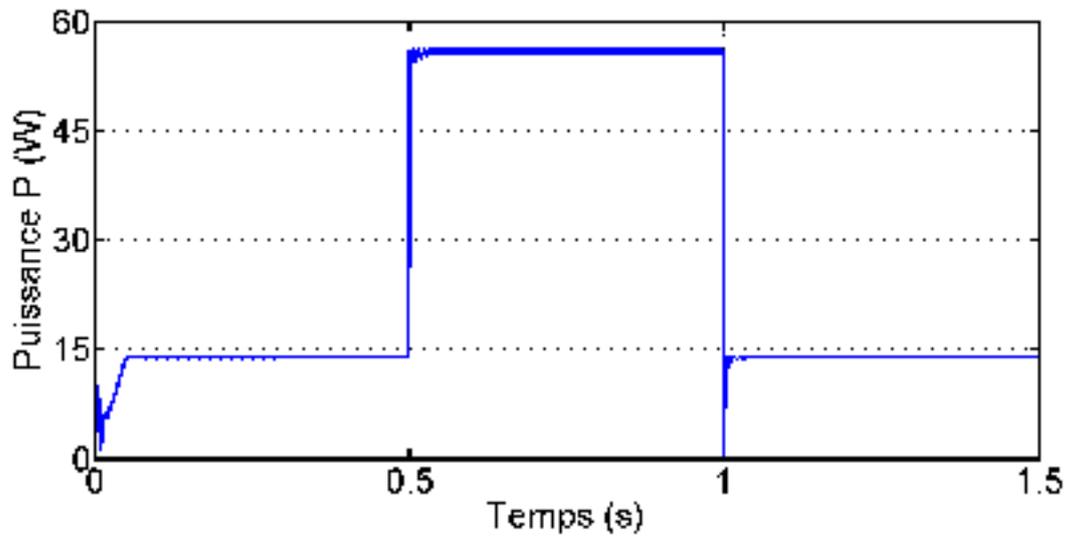


Figure III. 9 : La variation de la puissance en fonction de temps

Cette figure illustre l'évolution de la puissance de crête atteinte en utilisant la méthode P&O. On remarque que la puissance se varie selon le même profil trapézoïdal (la température appliqué T_h),

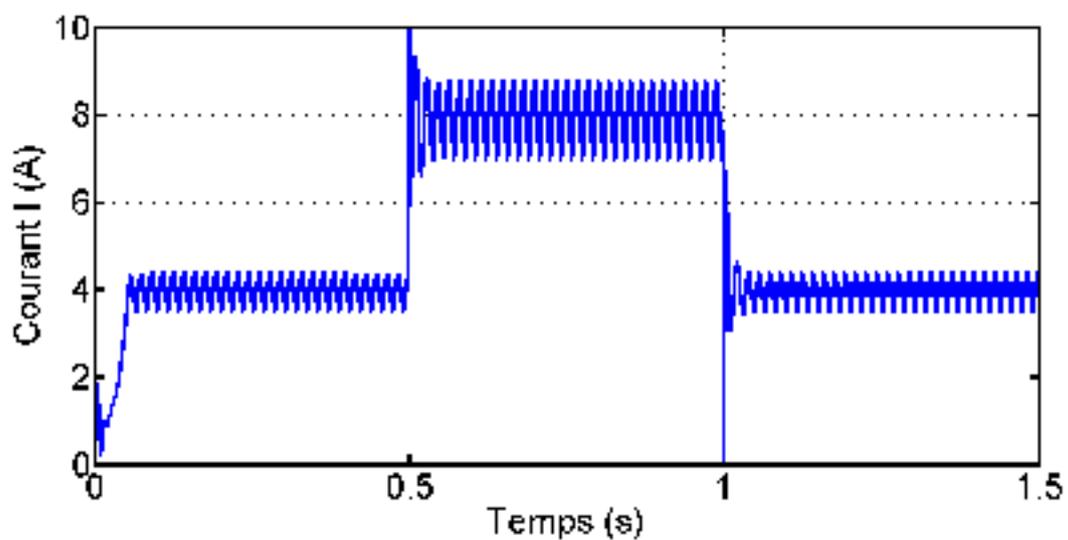


Figure III. 10 : La variation de courant en fonction de temps

Le courant généré est suivi presque de la même allure de la température T_h appliquée

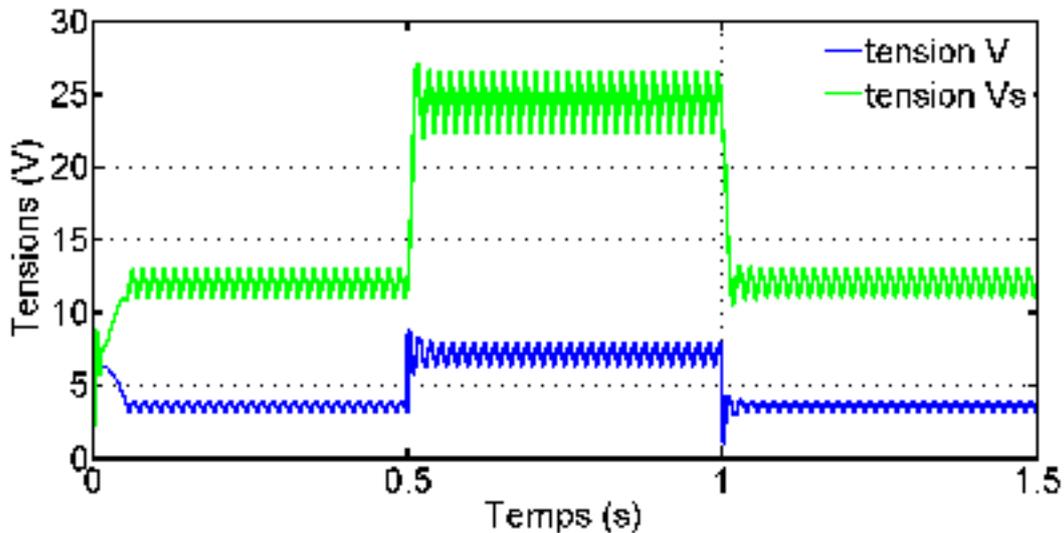


Figure III. 11 : La variation de la tension d'entrée V et la tension de sortie V_s

D'après la figure obtenue on remarque que la tension de sortie V_s est supérieure à celle d'entrée V ce qui prouve que la tension de la charge est plus supérieure à la tension d'entrée, et cela revient au convertisseur utilisé est de type élévateur de tension (BOOST).

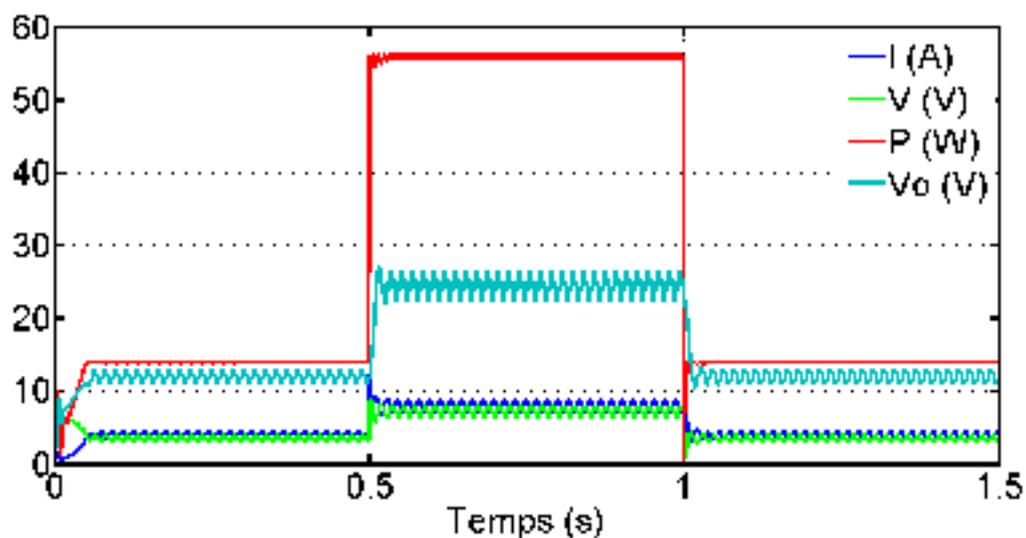


Figure III. 12 : La variation de courant, tension, puissance ainsi la tension de sortie, En fonction de temps.

Cette figure rassemble plusieurs figures dans une seule figure dans le but de bien observer les différences entre la puissance, la tension d'entrée, la tension de sortie et le

courant. Donc d'après cette figure on peut voir que toutes les grandeurs suivent parfaitement le profil du gradient de température.

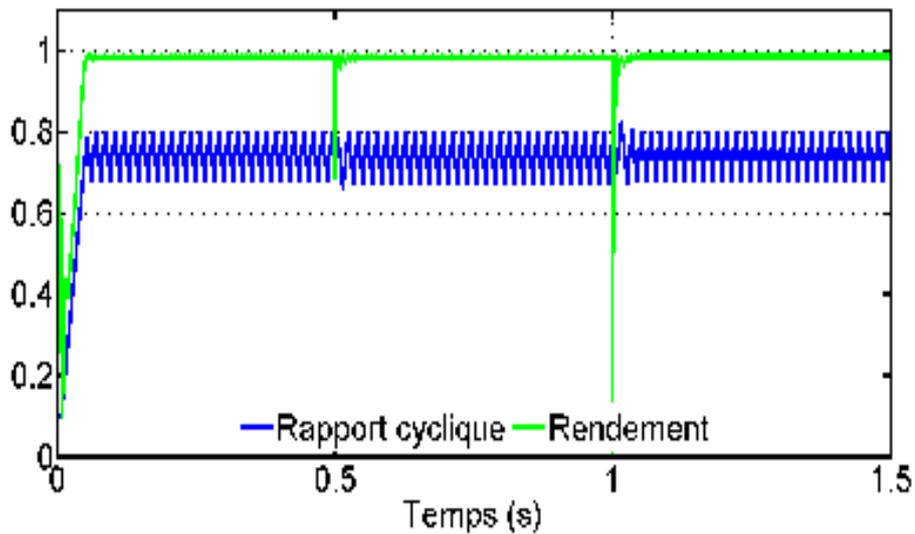


Figure III. 13 : Le rapport cyclique et le rendement en fonction de temps

D'après cette figure nous avons obtenu un bon rendement qui est très proche de 1 pour un rapport cyclique 0.8

Conclusion

D'après les résultats de simulation obtenu nous avons assuré le transfert maximal de la puissance d'un générateur thermoélectrique quel que soit les conditions de fonctionnement donc c'est ce qui prouve l'efficacité de la commande choisie MPPT de type P&O ainsi le hacheur BOOST, donc ils affectent correctement leurs rôles par le suivi exact de la puissance maximum de TEG.

Conclusion générale

La révolution énergétique mondial consomme beaucoup d'énergie pour ce là la recherche a conduit à utiliser l'énergie thermique comme une source important d'énergie électrique et pour réaliser cet objectif on utilise un générateur thermoélectrique qui peut être complété et répondre à la demande d'énergie

Le travail effectuée dans ce mémoire apport l'étude et optimisation d'un générateur thermoélectrique par objectif de proposer et développer une technique de commande efficace et valable pour le contrôle de la puissance de générateurs thermoélectrique

Le premier chapitre a été consacré à une présentation des générateurs thermoélectriques et de leurs principales caractéristiques. Les effets thermoélectriques qui régissent le couplage entre les propriétés thermiques et les propriétés électriques ont été décrits. De manière générale, le développement de dispositifs thermoélectriques repose sur les effets Seebeck, Peltier, Thomson, Joule et sur la conduction thermique. Ensuite, le principe de fonctionnement d'un générateur thermoélectrique a été plus particulièrement ciblé. Dans ce mode de fonctionnement, il s'agit de produire de l'énergie électrique par récupération d'énergie thermique ; le générateur thermoélectrique est alors basé sur l'effet Seebeck et convertit directement la chaleur en électricité.

Dans le seconde chapitre notre étude est apporté sur la présentation des différent convertisseur DC/DC qui inclut les convertisseurs abaisseurs (BUCK), élévateur (BOOST) et abaisseur-élevateurs (BUCK-BOOST) et on a définir et présentés les méthodes de commande MPPT lequel est (P&O,) la commande floue, commande par mode glissant, incrémental) par donner leurs algorithmes pour extraire leurs valeurs maximums de la puissance.

On se terminer avec une réalisation d'un modèle d'un TEG par l'utilisation d'un convertisseur BOOST associé à sa commande de recherche du point maximum MPPT perturbation and observation « P&O » et pour obtenir de bons résultats, nous avons choisir utiliser logiciel MATLAB/SIMULINK.

Le module thermoélectrique ne peut générer sa puissance maximale que pour une certain tension et courant de fonctionnement, de ce point de fonctionnement dépendant à sa température

Ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le TEG et d'après les résultats de simulation on peut déduire que l'algorithme « P&O » est simple à la mise en œuvre et son rendement est élevé

Bibliographie

- [1] <http://www.energie-renouvelables.org> juillet- Août-Septembre-2021
- [2] Saïma Siouane. Système thermoélectrique pour la récupération d'énergie : modélisation électrique et continuité de service de la circuiterie électronique. Micro et nanotechnologies/ Microélectronique. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017 LORR0201. Tel-01906188
- [3] <https://www.techniques-ingénieur.fr> » 10 févr. 2018
- [4] <https://www.industrie-techno.com> »
- [5] Thèse *Camille* FAVAREL « Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité » Ecole doctorante des science exactes et de leurs applications de l'université pau 2014
- [6] F. J. DiSalvo, « Thermoelectric cooling and power génération, » Science, vol. 285, no. 5428, pp. 703-706, 1999. 19
- [7] Ludovic HORREIN^{1,2}, Alain BOUSCAYROL¹, Yuan CHENG², Clément DUMAND² 1. Université de Lille1 Sciences et Technologies Représentation - Simulation de Générateurs Thermoélectrique au travers de la Représentation Energétique Macroscopique
- [8] DRIES Hania LARBI Lylia M'HAND SAID Zoubir « Synthèse des méthodes de commande MPPT sous ombre total et partiel » Université A. MIRA-BEJAIA 2019/2020
- [9] Cyril Lahore. Optimisation de commandes MPPT. Automatique / Robotique. 2012. ffdumas01304277
- [10] « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2008
- [11] <http://electrosup.com>
- [12] A.C. Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2006.
- [13] J.-M. Kwon, K.-H. Nam, and B.-H. Kwon, Photovoltaïque power conditioning system with line connection, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 10481054, 2006. 77

- [14] Mémoire dirigé par Mr. Nabil BENYAHYA et co-dirigé par Mr. Mohand Outahar BENSIDHOUM Commande par mode glissant d'un hacheur parallèle « Application à l'extraction de la puissance » maximale d'un panneau photovoltaïque
- [15] TOUALBIA Asma thèse « Commande MPPT avancée d'un système de conversion d'énergie solaire : photovoltaïque et thermoélectrique » Univ. HBB, Chlef 2018
- [16] B. Nassim et B. Smail, Commande directe par la méthode incrémental conductance (Inc-cond) d'un panneau photovoltaïque, 17 Septembre 2018.
- [17] A. Montecucco and A. R. Knox, Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 828839, 2015. 77, 78
- [18] . E. Schwartz, A maximum-power-point-tracking control system for thermoelectric generators, in 3rd IEEE international symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 7881, 2012. 77
- [19] Y. Aperte, Réflexions sur l'optimisation thermodynamique des générateurs thermoélectriques. PhD thesis, Université Paris Sud-Paris XI, 2013. vii, 10
- [20] A. K. Abdelsalam, A. M. Massoud, S. Ahmed, and P. N. Enjeti, 'High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1010,1021, 2011. 77
- [21]] <http://www.blog.interclima.com>
- [22] <http://www.mon-energie-verte.com>
- [23] G. S. Nolas, J. Sharp, and J. Goldsmid, Thermoelectrics : basic principles and new materials developments, vol. 45. Springer Science & Business Media, 2013. 8
- [24] N. Karami and N. Moubayed, 'New modeling approach and validation of a thermoelectric generator,' in IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 586591, 2014. 2, 11, 26, 49
- [25] S. Beeby and N. White, Energy harvesting for autonomous systems. Artech House, 2010

[26] M. A. K. M. GUELLAL Amar, « La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques,» La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA, 25 octobre 2016.

[27] A. B. H. S. B. B. H. M. A. B. Z. Ayache, « Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue ». Commande MPPT et Contrôle d'un Systèmes Photovoltaïque par la Logique Floue.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude et optimisation d'un générateur thermoélectrique à l'aide d'une commande MPPT (P&O) et d'un convertisseur électrique BOOST et Le rôle de cette commande est de suivre le point de puissance maximale (PPM) et pour obtenir de bon résultat nous avons choisis travailler avec logiciel MATLAB /SIMULINK

Les mots clés

La commande MPPT, Générateur thermoélectrique, (P&O), MATLAB /SIMULINK, Convertisseur BOOST.

Abstract

This work concerns the study and optimization of thermoelectric generator using an MPPT control (p&O) and a BOOST electrical converter and the role of this control is to follow the maximum power point (PMM) and to obtain good results we have chosen to work with MATLAB/SIMULINK software.

Keywords

The MPPT control, thermoelectric generator, (P&O), MATLAB/SIMULINK, BOOST convertor.

ملخص

هذا العمل يتناول دراسة وتحسين مولد كهرو حراري باستخدام طريقة MPPT ومحول كهربائي Boost والهدف من هذه التقنية هو تتبع النقطة العظمى للاستطاعة (PPM) ومن أجل الحصول على نتائج جيدة اخترنا استخدام برنامج MATLAB/SIMULINK

الكلمات الدالة

مولد كهرو حراري، طريقة MPPT، (P&O)، محول كهربائي Boost، PPM