

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI DE CHLEF



*Faculté de Technologie*  
*Département d'Electrotechnique*

**Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de  
**MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE**  
**ECOLE DOCTORALE**

**Option : Entraînement des Systèmes Electriques**

Présenté par

**BELBOULA ABDELKADER**

Ingénieur d'état en électrotechnique

*Thème*

*" Commande MPPT avancée d'un système de conversion  
d'énergie solaire : photovoltaïque et thermoélectrique "*

Soutenue le 21/09/2014 Devant le jury:

<b>BELMADANI Bachir</b>	<b>Professeur</b>	<b>UHBC.Chlef</b>	<b>Président</b>
<b>TADJINE Mohamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>E.N.P. Alger</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>BENMENSOUR Khalifa</b>	<b>maître de conférence A</b>	<b>UM.Médéa</b>	<b>Co-Rapporteur</b>
<b>NEZLI Lezhari</b>	<b>Professeur</b>	<b>E.N.P. Alger</b>	<b>Examineur</b>
<b>TALEB Rachid</b>	<b>maître de conférence A</b>	<b>UHBC. Chlef</b>	<b>Examineur</b>
<b>TAHRI Toufik</b>	<b>maître de conférence B</b>	<b>UHBC. Chlef</b>	<b>Examineur</b>

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma très chère famille qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, et qui ont été à mes côtés et m'ont soutenu durant toute ma vie afin de devenir ce que je suis, merci.*

*À Mes parents et Mes sœurs ainsi que toute la famille.*

*BELBOULA Abdelkader*

## REMERCIEMENTS

*Avant tout, je remercie DIEU le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier M.TADJINE MOHAMMED*

*Notre Rapporteur pour sa patience et sa coopération le long de cette période et*

*M.BENMENSOURE KHALIFA, Co-Rapporteur qui a bien voulu nous suivre et nous diriger aussi bien pour des conseils précieux tout au long de cet itinéraire. A tous les Enseignants du département d'électrotechnique sans exception qui ont contribué a notre formation avec beaucoup de compétence et de dévouement.*

*Mon remerciement est également aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.*

*Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Résumé

---

## Résumé

À l'ère du développement durable, la technologie de conversion d'énergie solaire ou la technologie des systèmes d'extraction d'énergie solaire par effet photovoltaïque et thermoélectrique a montré son potentiel significatif comme des sources d'énergie renouvelable. Cette thèse est centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système de conversion d'énergie solaire ou un système d'extraction d'énergie solaire par effet photovoltaïque et thermoélectrique (Générateur photovoltaïque et Générateur thermoélectrique) à travers l'utilisation d'un algorithme approprié pour la commande de l'interface de puissance. L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque et du générateur thermoélectrique. Dans ce but on propose, l'application de la commande par passivité pour la poursuite du pont de puissance maximum (MPPT), qui montre son efficacité et sa robustesse par rapport aux autres commandes proposés en qualité de la rapidité et de la diminution les perturbations vis-à-vis les variations climatiques ainsi que des paramètres du système.

**Mots clés : algorithme MPPT, photovoltaïque, thermoélectrique, d'énergie solaire, la commande par passivité.**

## Summary

At the era of the durable development, the technology of solar energy transformation or the technology of the systems of extraction of solar energy per photovoltaic and thermoelectric effect showed its significant potential like sources of renewable energy. This thesis is centered on the improvement of the performances and the output of a conversion system of solar energy or a system of extraction of solar energy per photovoltaic and thermoelectric effect (photovoltaic generator and thermoelectric generator) through the use of a suitable algorithm for the ordering of the interface of power. The principal objective is to find an algorithm or a law of effective and optimal order making it possible to extract the maximum of power available starting from the photovoltaic generator and of the thermoelectric generator .years this goal one propose the application of the Passivity Based control for the continuation of the MPPT, which shows its effectiveness and its robustness compared to the other orders proposed in quality of the speed and the reduction the disturbances opposite the climatic variations as well as parameters of the system.

**Keywords: MPPT Algorithm, photovoltaic, thermoelectric, solar energy, Passivity Based Control .**

## ملخص

في عصر التنمية المستدامة، و تكنولوجيا الطاقة الشمسية، استخراج الطاقة الشمسية وذلك بالفعل الكهروضوئي والكهروحراري أظهرت إمكانيات كبيرة كمصادر للطاقة المتجددة. تتركز هذه الأطروحة على تحسين أداء كفاءة نظام تحويل الطاقة الشمسية من خلال استخدام خوارزمية مناسبة للتحكم وسيطرة على واجهة تدفق الطاقة. الهدف الرئيسي من هذه العمل هو العثور على خوارزمية أو نظام مراقبة الامتلى والفعال لاستخراج الاستطاعة القصوى المتاحة من المولد الضوئي و المولد الحراري، ولهذا الغرض اقترحنا تطبيق التحكم السلبي او التحكم الخمولي لمتابعة نقطة الاستطاعة القصوى ، مما اظهر كفاءة وقوة هذا التحكم بالمقارنة مع أنواع التحكم الكلاسيكية المقترحة ، و ذلك في ما يخص السرعة الاستجابة ونقل الاضطرابات وهذا بسبب تغير المناخ و كذا خصائص النظام.

## كلمات مفتاحية

خوارزمية ، لتتبع نقطة الاستطاعة العظمة، الكهروضوئي، الطاقة الشمسية، الكهروحراري ، التحكم السلبي أو التحكم الخمولي.



# **Sommaire**

**SOMMAIRE**

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iii
Sommaire.....	iv
Table des figures.....	v
Nomenclatures .....	vi
Introduction générale .....	1

---

**Chapitre I : L’Energie Solaire**

---

Introduction .....	3
I.1 Le Rayonnement Solaire.....	4
I.1.1 Caractéristiques du Rayonnement Solaire.....	4
I.1.2 Répartition Spectrale du Rayonnement Solaire.....	5
I.2 Technique pour capter l'énergie solaire.....	6
I.3 Les panneaux solaires photovoltaïques .....	6
I.4 Les panneaux solaires thermoélectrique.....	6
I.5 Le Potentiel Solaire en Algérie.....	6
I.6 Conclusion.....	8

---

**Chapitre II : Générateur photovoltaïque**

---

Introduction .....	9
II.1 La Cellule Photovoltaïque.....	9
II.2 Principe du photovoltaïque.....	9
II.3 Jonction P-N.....	10
II.4 Rendement Photovoltaïque.....	11
II.5 Modèle mathématique d’une cellule solaire .....	11
II.5.1 Modèle à deux diodes.....	11
II.5.2 La simulation d’une cellule photovoltaïque.....	13
II.6 Module Photovoltaïque.....	14
II. 6.1 Caractéristiques d’un module Photovoltaïque.....	14
II.6.2 Association de cellules PV.....	16
II.6.2.1 Association en série.....	16
II.6.2.2 Association en parallèle.....	16
II.6.3 Protection des cellules.....	17

II.6.4 Zones de fonctionnement du module solaire .....	17
II.6.5 la simulation d'un module photovoltaïque.....	18
II.7 Influence des paramètres externes et internes sur d'un module photovoltaïque.....	19
II.7.1 Influence des paramètres externes.....	19
II.7.1.1 Influence de l'éclairement.....	19
II.7.1.2 Influence de la température.....	19
II.7.2 Influence des paramètres internes.....	19
II.7.2.1 Influence de la résistance série.....	20
II.7.2.2 Influence de la résistance shunt.....	21
II.8 Fonctionnement optimal du générateur.....	22
II.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	23
II.10 Conclusion.....	24

---

### **Chapitre III : Générateur Thermoélectrique**

---

Introduction .....	25
III.1 La Thermoélectricité .....	26
III.2 Evaluation d'un matériau thermoélectrique.....	26
III.2.1 Les effets thermoélectriques.....	26
III.2.1.1 Effet Seebeck.....	27
III.2.1.2 Effet Peltier.....	28
III.2.1.3 Effet Thomson.....	30
III.2.2 La recherche de bons matériaux thermoélectriques.....	30
III.3 Rendement d'un générateur thermoélectrique.....	31
III.4 Sélection et optimisation des matériaux thermoélectriques.....	35
III.5 Modélisation d'un générateur Thermoélectrique.....	37
III.5.1 Modélisation d'une cellule Thermoélectrique.....	37
III.5.1.1 Modèle comme source de tension.....	37
III.5.1.2 Modèle comme source de courant.....	38
III.5.1.3 Modèle d'étude.....	40
III.5.2 Simulation de la caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule TE.....	40
III.5.3 Association de cellules TE.....	40
III.5.3.1 Association en série.....	41
III.5.3.2 Association en parallèle.....	42
III.5.4 Modélisation d'un générateur Thermoélectrique.....	43

III.6 Caractéristique $I=f(V)$ et $P(V)$ d'un module TE.....	44
III.6.1 Caractéristique $I(V)$ d'un panneau TE.....	44
III.6.2 Influence de la température sur le fonctionnement du module TE.....	44
III.6.3 Influence de la résistance interne.....	45
III.7 Conclusion.....	45
<hr/>	
<b>Chapitre IV : Recherche du Point de Puissance Maximum MPPT</b>	
<hr/>	
Introduction.....	46
IV.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	47
IV.2 Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs).....	48
IV.2.1 Hacheur série.....	49
IV.2.2 Hacheur parallèle.....	49
IV.2.3 Hacheur série-parallèle.....	50
IV.3 Hacheur survolteur.....	51
IV.3.1 Principe et modélisation.....	51
IV.3.1.1 Modèle mathématique équivalente.....	53
IV.3.1.2 Conception d'un hacheur Boost.....	53
IV.4 Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimale.....	53
IV.4.1 Algorithme perturbation et observation (P&O).....	54
IV.4.2 Algorithme 'incrémental conductance' (INC).....	56
IV.4.3 Autres méthodes.....	58
IV.4.4 Critères de Qualité d'une Commande MPPT.....	59
IV.5 Résultats de simulation.....	60
IV.5.1 Test de performance .....	60
IV.5.1.1 Résultats de Simulation pour GPV.....	60
IV.5.1.2 Résultats de Simulation pour GTE.....	61
IV.5.2 Etude de la robustesse des MPPT INC et P&O applique sur GPV.....	63
IV.5.2.1 Variation d'ensoleillement.....	63
IV.5.2.2 Variation de la température.....	64
IV.5.2.3. Variation de la charge.....	65
IV.5.2.4 Variation de la charge, d'ensoleillement et de la température.....	66
IV.5.3. Interprétation des résultats de GPV.....	67
IV.5.4 Etude de la robustesse des MPPT INC et P&O applique sur GTE.....	68
IV.5.4.1 Variation de Gradient de la Température.....	68

IV.5.4.2 Variation de la charge.....	69
IV.5.4.3 Variation de la charge et de la température.....	70
IV.5.5 Interprétation des résultats de GTE.....	72
IV.6 Conclusion.....	72

---

## Chapitre IV : La Commande MPPT Basée sur la Passivité

---

Introduction.....	74
V.1 Méthodes Lagrangienne et Hamiltonienne pour la modélisation des systèmes physiques.....	75
V.1.1 La méthode Lagrangienne.....	75
V.1.1.1 la formulation lagrangienne.....	75
V.1.1.2 Propriétés des systèmes Euler-Lagrange.....	76
V.1.1.2.1 Propriétés de stabilité entrée-sortie.....	76
V.1.1.2.2 Propriétés de la stabilité de LYAPUNOV.....	77
V.1.1.3 Récapitulation.....	78
V.1.2 La méthode Hamiltonienne.....	78
V.1.2.1 Le formalisme Hamiltonienne.....	79
V.2 Structure de Dirac.....	80
V.2.1 Théorème de Tellegen.....	80
V.2.2 Structure de Dirac sur $\mathfrak{R}^{ne} \times \mathfrak{R}^{ne}$ .....	80
V.2.2.1 Représentation Noyau.....	81
V.2.2.2 Représentation Entrée-Sortie.....	81
V.2.2.3 Représentation Flux Contraint.....	82
V.2.4 Exemples d'interconnexion.....	82
V.2.4.1 Point matériel soumis à une force externe.....	82
V.2.4.2 Un ressort idéal.....	83
V.2.4.3 Un point matériel soumis à deux forces externes.....	84
V.2.4.4 une masse liée à un ressort soumis à une force externe.....	85
V.3 Définition Système Hamiltonienne commandé par port.....	86
V.4 la stabilité des systèmes dynamiques.....	87
V.4.1 Notion intuitive de la stabilité.....	87
V.4.2 stabilité de lyapunov.....	88
V.4.2.1 Méthode directe de Lyapunov.....	88
V.4.2.2 Stabilité au sens de LYAPUNOV.....	88
V.4.2.3 Candidat de Lyapunov.....	89

---

V.4.2.3.1 Candidat de Lyapunov.....	89
V.4.2.4 Fonction de Lyapunov.....	89
V.5 la commande basée sur la passivité (PBC).....	90
V.5.1 Fonction de stockage.....	91
V.5.2 Système passif.....	91
V.5.3 La passivité.....	92
V.5.3.1 Définition différentielle de la passivité.....	92
V.5.3.1.1 Propriétés.....	92
V.5.3.1.1.1 Connexion parallèle.....	93
V.5.3.1.1.2 Connexion par rétroaction.....	93
V.5.3.2 Définition intégrale de la passivité.....	94
V.5.3.3 Définitions mathématiques de la passivité.....	95
V.5.4 PBC des systèmes d'EL.....	97
V.5.5 Equilibre énergétique, passivité et stabilité.....	99
V.5.6 la commande basée sur la passivité à assignement et D'interconnexion(IDA-PBC).....	100
V.5.6.1 la méthodologie d'IDA-PBC.....	101
V.5.6.2 les techniques d'IDA-PBC.....	101
V.5.6.2.1 IDA non paramétrisé.....	101
V.5.6.2.2 IDA algébrique.....	101
V.5.6.2.3 IDA paramétrisé.....	101
V.5.6.2.4 IDA en entrelacé algébrique-paramétrés.....	102
V.5.6.3 Conception d'IDA-PBC.....	102
V.5.6.4 Propriétés d'IDA-PBC.....	102
V.5.6.4.1 L'énergie d'équilibre.....	102
V.5.6.4.2 Préservation de la structure.....	103
V.5.6.4.3 Intégrabilité.....	103
V.5.6.5 Systèmes non linéaires généraux.....	104
V.5.7 la commande SIDA-PBC basée sur la considération de l'interconnexion et introduction del'amortissement.....	105
V.6 Commande des convertisseurs DC-DC par passivité.....	106
V.6.1 Correction par Assignation d'interconnexion et d'amortissement (IDA-PBC).....	106
V.6.2 Résultats de Simulation et interprétation.....	110
V.7 Conception d'un contrôleur MPPT à base de passivité.....	111
V.8 Résultats de Simulation et interprétation.....	111

## Sommaire

---

V.9 Comparaison entre le régulateur INC et le INCPBC.....	113
V.9.1 Etude de la robustesse des MPPT INC et INCPBC applique sur GPV.....	114
V.9.1.1 Variation d'ensoleillement.....	114
V.9.1.2 Variation de la température.....	115
V.9.1.3.Variation de la charge.....	116
V.9.1.4 Variation de la charge, d'ensoleillement et de la température.....	118
V.9.2.Interprétation des résultats de GPV.....	119
V.9.3 Etude de la robustesse des MPPT INC et INCPBC applique sur GTE.....	120
V.9.3.1 Variation de Gradient de la Température.....	120
V.9.3.2 Variation de la charge.....	121
V.9.3.3 Variation de la charge et de la température.....	122
V.9.4 Interprétation des résultats de GTE.....	123
V.10 Conclusion.....	123
Conclusion générale.....	124
Bibliographié.....	125
Annexes.....	130

## Liste des Tableaux et des figures



## Liste des Figures

---

### Chapitre I : L'Énergie Solaire

---

Fig.I.1 : Distance Terre-Soleil.....	3
Fig. I.2 : Heure de puissance crête.....	4
Fig. I.3 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	5
Fig.I.4 : Pourcentage des parties du rayonnement solaire lors de sa propagation dans l'atmosphère.....	5
Fig. I.5 : Potentiel solaire en Algérie.....	7

---

### Chapitre II : Générateur photovoltaïque

---

Fig. II.1 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	10
Fig. II.2 : Jonction P-N.....	10
Fig.II.3 : Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.....	12
Fig. II.4 : Caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	13
Fig.II.5 : Caractéristique de la puissance d'une cellule photovoltaïque.....	13
Fig. II.6 : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque.....	14
Fig. II.7 : Caractéristique $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque.....	15
Fig. II.8 : Association des modules en série.....	16
Fig. II.9 : Association des modules en parallèle.....	16
Fig.II.10 : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$ , $T=25^{\circ}\text{C}$ .....	18
Fig. II.11 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV( $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}$ ).....	18
Fig. I.12 : L'influence de l'éclairement sur le module.....	19
Fig.II.13 : L'influence de la température sur le module.....	20
Fig. I.14 : L'influence de la résistance série sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ .....	21
Fig.II.15 : L'influence de la résistance shunt $R_p$ sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ .....	21
Fig. II.16 : Caractéristique $I-V$ pour une charge résistive variable.....	22

---

### Chapitre III : Générateur thermoélectrique

---

Fig. III.1 : Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck.....	27
Fig. III.2 : Effet Seebeck.....	28

---

Fig. III. 3 : Effet Peltier.....	29
Fig. III. 4 : Représentation schématique d'un générateur thermoélectrique.....	32
Fig. III. 5 : Variation schématique des propriétés de transport des solides en fonction de la concentration de porteurs de charge à température ambiante.....	36
Fig.III.6 : Schéma électrique équivalent d'une cellule thermoélectrique (modèle de thévenin)...	37
Fig. III.7: Schéma électrique équivalent d'une cellule thermoélectrique (modèle de Norton).....	38
Fig. III.8 : Schéma électrique équivalent d'un modèle thermoélectrique (modèle de Norton)....	40
Fig. III.9 : la caractéristique Puissance-tension et caractéristique courant-tension.....	40
Fig.III.10 : Association en série de $N_s$ cellules TE identiques.....	41
Fig.III.11 : Caractéristique courant-tension et puissance-tension de l'association de $N_s$ .....	41
Fig.III.12 : Association en parallèle de $N_p$ cellules TE identiques cellules identiques en série..	42
Fig.III.13 : Caractéristique courant-tension et puissance -tension de l'association de $N_p$ cellules identiques en parallèle.....	42
Fig.III.14 : Schéma équivalent d'un générateur Thermoélectrique.....	43
Fig. III.15 : Caractéristique courant-tension et puissance- tension résultante d'un groupement en série et en parallèle des modules identiques.....	44
Fig. III.16 : Caractéristique courant-tension d'un module TE pour différentes valeurs de température.....	44
Fig. III.17 : Caractéristique puissance-tension d'un module TE Pour différentes valeurs de température.....	44
Fig. III.18 : Influence de la résistance interne sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur Thermoélectrique.....	45
Fig. III.19 : Influence de la résistance interne sur la caractéristique $P=f(V)$ d'un générateur Thermoélectrique.....	45

---

## Chapitre IV : Recherche du Point de Puissance Maximum MPPT

---

Fig. IV.1 : Courbe caractéristique de puissance du GS.....	48
Fig. VI.2 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	49
Fig. IV.3 : Schéma de principe du hacheur.....	49
Fig.IV.4 : Schéma de principe d'un hacheur série.....	50
Fig. IV.5 : Schéma de principe d'un hacheur.....	50
Fig. IV.6 : Schéma de principe d'un hacheur série- parallèle.....	51
Fig. IV.7 : Circuit électrique du hacheur Boost.....	52

Fig. IV.8 : Circuit équivalent du Boost lorsque S fermé.....	53
Fig. IV.9 : Circuit équivalent du Boost lorsque S ouvert.....	53
Fig. IV.10 : Caractéristique $P_{GS}(V_{GS})$ d'un panneau solaire GPV.....	56
Fig. IV.11 : Caractéristique $P_{GS}(V_{GS})$ d'un panneau solaire GTE.....	56
Fig. IV.12 : Algorithme type de la méthode P&O.....	57
Fig. IV.13 : Algorithme type de la méthode INC.....	59
Fig. IV.14 : Modèle de simulation du GPV adapté par les deux techniques MPPT (P&O) et MPPT(INC).....	60
Fig. IV.15 : Modèle de simulation du GTE adapté par les deux techniques MPPT (P&O) et MPPT(INC).....	61
Fig. IV.16: Réponses des commandes MPPT INC et MPPT P&O pour des conditions environnementales standard et d'une pas de tension égale $dV= 0.001V$ .....	62
Fig. IV.17 : Réponses des commandes MPPT INC et MPPT P&O pour des conditions environnementales standard et du pas de tension égale $dV= 0.001V$ .....	63
Fig. IV.18 : Réponses des deux algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation d'ensoleillement avec une température constante et charge constante.....	64
Fig. IV.19 : Réponses des deux algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de la température de $25^{\circ}C$ à $40^{\circ}C$ avec un ensoleillement de $1000W/m^2$ .....	65
Fig. IV.20 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de la charge $35$ à $45\Omega$ avec un ensoleillement de $1000W/m^2$ et température de $25^{\circ}C$ .....	66
Fig. IV.21 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation d'ensoleillement, la température et la charge.....	67
Fig. IV.22 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de gradient de la température de $30^{\circ}C$ à $40^{\circ}C$ avec une charge consent.....	69
Fig. IV.23 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de la charge de $10\Omega$ à $20\Omega$ avec gradient de la température consent.....	70
Fig. IV.24 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation de gradient de la température et de la charge.....	71

---

**Chapitre V : la commande MPPT basée sur la passivité**

---

Fig. V.1: Point matériel soumis à une force externe.....	82
Fig. V.2 : Un point matériel soumis à deux forces externes.....	84
Fig. V.3-a: Une masse liée à un ressort soumis à une force externe.....	85

## Liste des Figures et des Tableaux

---

Fig. V.3-b: Une masse liée à un ressort soumis à une force externe.....	85
Fig. V.4 : illustration de la définition intuitive de la stabilité.....	88
Fig. V.5: Connexion parallèle.....	93
Fig. V.6: Connexion par rétroaction.....	93
Fig. V.7: Systèmes passifs interconnectés par retour d'état.....	96
Fig.V.8: Schéma du convertisseur Boost.....	106
Fig.V.9: Simulations de loi de commande obtenues par IDA-PBC.....	110
Fig.V.10 : Boucle de commande globale.....	111
Fig.V.11: Réponses de commandes INC PBC pour des conditions environnementales standard et de pas de tension égale $dV= 0.001V$ .....	112
Fig.V.12: Réponses de commande INC PBC pour des conditions environnementales standard et de pas de tension égale $dV= 0.001V$ .....	113
Fig.V.13 : Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une variation d'ensoleillement avec une température constante et charge constante.....	114
Fig.V.14 : Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une augmentation de la température de $5^{\circ}C$ à $40^{\circ}C$ avec un ensoleillement de $1000W/m^2$ .....	115
Fig.V.15 : Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une augmentation de la charge $35$ à $45\Omega$ avec un ensoleillement de $1000W/m^2$ et température de $25^{\circ}C$ .....	117
Fig.V.16 : Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une variation d'ensoleillement, la température et la charge.....	118
Fig.V.17 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de gradient de la température de $30^{\circ}C$ à $40^{\circ}C$ avec une charge consent.....	120
Fig.V.18 : Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCBPC pour une augmentation de la charge de $10\Omega$ à $20\Omega$ avec gradient de la température consent.....	121
Fig.V.19 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation de gradient de la température et de la charge.....	122

---

## Liste des Tableaux

---

Tableau I.1: Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	5
Tableau I.2 : Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.....	7
Tableau.III.1: Elément des cellules T E ECT-310.....	39
Tableau.IV.1 : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.....	51

## Nomenclature

---

### Chapitre II : Générateur Photovoltaïque

---

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque

$E_g$  : Gap de semi-conducteur (ev)

$I_{ph}$  : Le photo-courant (A).

$I_d$  : Courant de saturation (A).

$R_p$  : Résistances parallèle shunt. ( $\Omega$ )

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ).

$I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont les courants de saturation des diodes

$n_1$  et  $n_2$  les facteurs de pureté d'idéalité de la diode ( $1 < n < 3$ ).

$E$  : L'éclairement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

$T_{ref}$  : La température de référence en Kelvin (298 °K).

$I_{cc}$  : Le courant de court - circuit (A).

$V_{co}$  : La tension de circuit ouvert (V).

$FF$  : Facteur de forme.

$N_s$  : Nombre des cellules en série.

$N_p$  : Nombre des cellules en parallèle.

$P_{opt}$  : La puissance maximale produite PV (W), Ou la puissance max

$P_0$  : La puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface

## Nomenclature

---

totale des cellules.

$V_{opt}$  : Tension optimale (V) .ou (La Tension max)

$I_{opt}$  : Courant optimale (A). Ou (Le Courant max)

$K$  : Coefficient de Boltzmann

$q$  : La Charge de l'électron

GS : Générateur Solaire.

---

## Chapitre III : Générateur Thermoélectrique

---

$\lambda_e$  : la conductivité thermique électronique ( $K^{-1} m^{-1}$ ).

$\lambda$  : la conductivité thermique ( $K^{-1} m^{-1}$ ).

$\lambda_L$  : la conductivité thermique de réseau ( $K^{-1} m^{-1}$ ).

TE: Thermoélectrique

GTE : Générateur Thermoélectrique

$W$  : la puissance électrique utile délivrée dans la charge (W).

$\eta$  : le rendement d'un générateur thermoélectrique.

$Q_H$  : la puissance thermique absorbée du côté chaud (W).

$\vec{E}$  : le champ électrique ( $V.m^{-1}$ ).

$\vec{J}_q$  : le flux thermique (J).

$\vec{J}$  : la densité de courant électrique ( $A.m^{-2}$ ).

$\vec{\nabla}T$  : le gradient de température (K)

$\rho$  : la résistivité électrique ( $\Omega.m$ ).

$\alpha$  : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient Seebeck( V/K)

$\pi$  : le coefficient Peltier

$\alpha_n$  : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient Seebeck des matériaux des semiconducteurs de type **n** ( V/K)

$\alpha_p$  : le pouvoir thermoélectrique ou coefficient Seebeck des matériaux des

## Nomenclature

---

semiconducteurs de type **p**( V/K)

$\tau$  : Le coefficient Thomson

$Z_{np}$  ou  $Z$  : le facteur de mérite

$I_g$  : Courant délivré par la cellule TE (A).

$E_g$  : Tension délivrée par la cellule TE (A).

$V_g$  : Tension de sortie de la cellule TE (V).

$\alpha$  : Constante de Seebeck( V/K)

$\Delta T$  : Différence de Température de la cellule en (K)

---

## Chapitre IV : Recherche du Point de Puissance Maximum MPPT

---

DC : Courant Continu (Direct Current).

MPPT: Maximum Power Point Tracking

CS : convertisseurs statiques

$E$  : Tension d'entrée (V)

$V_{ch}$  : Tension de sortie (V)

$\alpha$  : Rapport cyclique

L: L'inductance (H)

K: intrèpeteur commandé

D: diode (intrèpeteur non commandé)

C : Capacité d'un convertisseur (F)

$I_{ch}$  : Courant de charge (A)

P&O : Perturbé&Observé

PPM : point de puissance maximale

INC : Incrément de conductance

---

### Chapitre V : La Commande MPPT Basée sur la Passivité

---

PBC : commande par passivité ( en l'anglais : Passivity-Based Control)

IDA-PBC : la commande basée sur la passivité par Assignement d'interconnexion et d'amortissement.

INCPBC: algorithme Incrément de conductance à base de passivité.

$u_{cd}$  : La tension de référence.

$T(q, \dot{q})$  : Énergie cinétique.

$V(q)$  : Énergie potentielle.

$D$  : Matrice d'inertie.

$F(\dot{q})$  : La fonction de dissipation de RAYLIEGH.

$M$  : Matrice de rang plein.

$L(q, \dot{q})$  : Lagrangien.

$Q$  : Vecteur de forces généralisées.

$GAS$  : Global asymptotique stability.

$H$  : Hamiltonien.

$p_e$  : Variables d'effort.

$p_f$  : Variables de flux.

$I_n$  : La matrice identité d'ordre  $n$ .

$0_n$  : La matrice nulle d'ordre  $n$ .

$J(x)$  : Matrice d'interconnexion.

$R(x)$  : Matrice d'amortissement.

$g(x)$  : Matrice d'entrées.

$S$  : Matrice symétrique semi-définie positive.

$g^\perp(x)$  : Une matrice annulatrice à gauche à rang complet.

$L_e$  : Structure de Dirac.

$L_{2e}$  : Espace des normes.



# Introduction générale

### **Introduction générale**

À l'ère du développement durable, la technologie de conversion d'énergie solaire ou la technologie des systèmes d'extraction d'énergie solaire par effet photovoltaïque et thermoélectrique (Générateur photovoltaïque et Générateur thermoélectrique) a montré son potentiel significatif comme des sources d'énergies renouvelables. Cette thèse est centrée sur l'amélioration des performances et du rendement d'un système de conversion d'énergie solaire ou un système d'extraction d'énergie solaire par effet photovoltaïque et thermoélectrique (Générateur photovoltaïque et Générateur thermoélectrique) à travers l'utilisation d'un algorithme approprié pour la commande de l'interface de puissance. L'objectif principal est de trouver un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV) et du générateur thermoélectrique (GTE).

L'objectif principal de notre travail est de trouver et appliquer un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur d'énergie solaire (photovoltaïque (GPV) et thermoélectrique(GTE) vis-à-vis les variations climatiques ainsi que des paramètres du système. Ajoutons à cela l'étude d'une unité regroupant l'algorithme MPPT et la gestion de l'énergie transmise du panneau solaire (photovoltaïque (GPV), thermoélectrique(GTE) à la charge par l'utilisation de loi de commande avancée (Passivity Based Control PBC).

Cette unité permettra d'améliorer la commande de l'interface de puissance et aussi d'optimiser le transfert de l'énergie dans un système générateur d'énergie solaire.

Pour ce système, le développement de modèles équivalents sera utile pour l'analyse et la simulation. Cette dernière sera faite sous Matlab/Simulink.

Deux tentatives de contribution à l'amélioration et l'optimisation du dispositif seront abordées. Premièrement, les algorithmes choisis, en l'occurrence l'algorithme Perturbation et Observation (Perturbe and Observe, P&O), et l'algorithme Incrément de conductance (INC). Deuxièmement, l'application de loi de commande avancée selon une approche différente sera abordée pour aboutir à une robustesse et des performances meilleures.

Cette approche est :

- synthèse d'une commande non linéaire dans le domaine temporel, à savoir, la Commande par Passivité (PBC).

Notre thèse est constituée de 5 chapitres. Le premier chapitre donne des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques et les méthodes de captage par deux effets photovoltaïque et thermoélectrique enfin la description du potentiel solaire en Algérie.

Le deuxième chapitre présente la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, les différents types de cellules disponibles, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques et l'analyse du panneau ou générateur photovoltaïque (GPV). Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que la modélisation du générateur, le principe de conversion dans les systèmes photovoltaïques et enfin la simulation sous Simulink .

Le troisième chapitre est consacré à présentation de la définition et le principe de fonctionnement de la cellule thermoélectrique, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques et l'analyse du panneau ou générateur thermoélectrique (GTE). Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que la modélisation du générateur, le principe de conversion dans les systèmes thermoélectriques et enfin la simulation sous Simulink.

Le quatrième chapitre aborde la description du convertisseur MPPT qui est un convertisseur de puissance (DC/DC), le principe de recherche du MPP, l'étude du fonctionnement du convertisseur de puissance, le dimensionnement du convertisseur, la classification des commandes MPPT et les différents techniques ou algorithmes MPPT présents dans la littérature. Ensuite, la simulation du convertisseur MPPT sous Simulink afin de valoriser les résultats pour choisir l'algorithme le plus robuste entre l'algorithme Perturbation et Observation (Perturbe and Observe, P&O), et l'algorithme Incrément de conductance (INC).

Le cinquième chapitre fait l'étude de la stabilité et de la robustesse des systèmes photovoltaïque et thermoélectrique. La caractéristique électrique du GPV et GTE qui sont approximés par un modèle non linéaire. Le modèle du convertisseur de puissance est établi puis analysé. L'approche pour la commande du convertisseur de puissance est étudiée visant une régulation robuste de la tension de sortie de Générateur Photovoltaïque et Générateur Thermoélectrique.

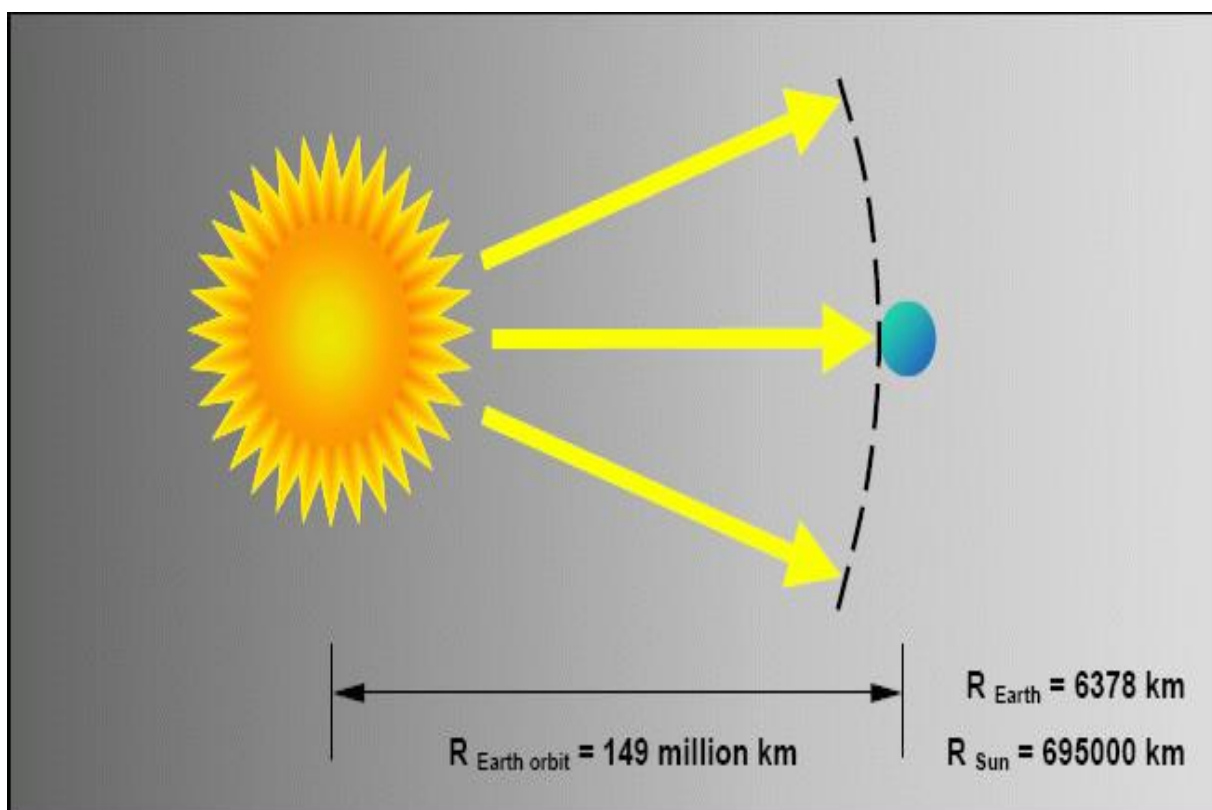
Cette approche est de nature non linéaire et elle est synthétisée dans le domaine temporel, il s'agit de la Commande par Passivité (Passivity based control IDA-PBC), enfin la simulation sous Simulink et on teste la robustesse de cette commande.

# **Chapitre I :Energie solaire**

## Introduction

Le Soleil est une grande sphère formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué, par la masse, de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et autres (2%). Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergie selon la fameuse formule d'Einstein,  $E = mc^2$ . Cette réaction maintient la surface du Soleil à une température approximative de 5800°K.

L'énergie du Soleil est transmise sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsque l'énergie a voyagé 150 millions de kilomètres du Soleil vers la Terre (figure I.2), sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m<sup>2</sup>. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire [1,2].



**Fig.I.1:** Distance Terre-Soleil

En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil ( $1.2 \cdot 10^{17}$  Watts) pour combler ses besoins pour presque une année. Ce qui fait du soleil une source d'énergie inépuisable. Les panneaux solaires permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique.

## I.1 Le rayonnement solaire

Le soleil émet, d'une manière uniforme, d'énormes quantités d'énergie dans l'espace. La puissance émise par le soleil est d'environ 63 500 kW par  $m^2$ . Du fait de la distance entre la terre et le soleil, qui est en moyenne de 150 millions de kilomètres, cette puissance se réduit à environ 1370 W par  $m^2$  à la limite de notre atmosphère. Comme cette valeur ne varie pratiquement pas.

### I.1.1 Caractéristiques du Rayonnement Solaire

L'irradiance ou l'éclairement est la mesure de la densité de puissance de la lumière du soleil, elle est mesurée en  $W/m^2$ . L'irradiance est ainsi, une quantité instantanée. La constante solaire correspond à l'irradiance venant du soleil et reçue par la terre au-dessus de l'atmosphère.

L'irradiation est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, elle est mesurée en  $kWh/m^2$ . L'irradiation est souvent exprimée en «heures de puissance crête», qui correspond à la durée en heures, à un niveau d'irradiance constant de  $1kW/m^2$ , nécessaire pour produire l'irradiation quotidienne. Le nombre d'heures de puissance crête est obtenu par intégration de l'irradiance sur toutes les heures de clarté (figure I.2). La connaissance de cette valeur permet de quantifier rapidement les possibilités offertes par le générateur solaire.

Un module de 50Wc fournira 150Wh dans un site correspondant à un ensoleillement de 3 heures de puissance crête [4, 5, 6].

L'irradiance et l'irradiation dépendent de l'emplacement, des conditions climatiques et de la période de l'année. Elles dépendent aussi de l'ombre des arbres et des bâtiments qui pourrait exister et de l'inclinaison de la surface.

Dans le cadre de l'utilisation des panneaux photovoltaïques, il serait utile de pouvoir déterminer avec exactitude, la durée d'insolation à un endroit particulier en un jour précis.

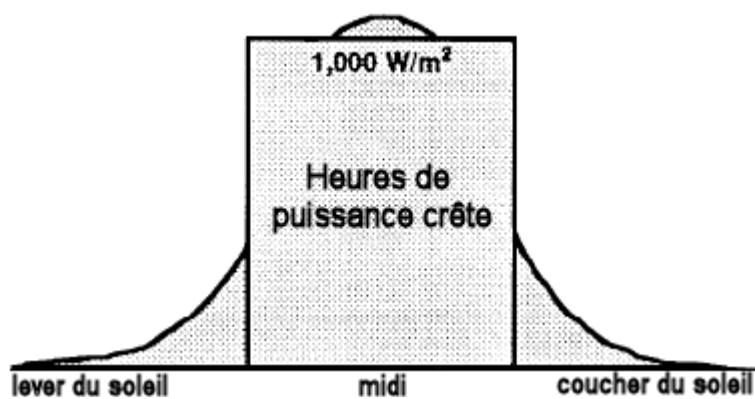


Fig.I.2: Heure de puissance crête

I.1.2 Répartition spectrale du rayonnement solaire

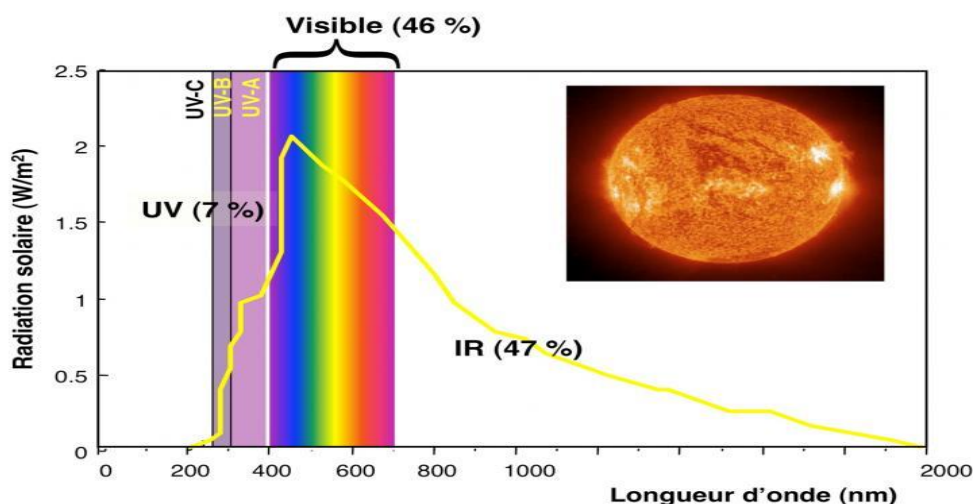


Fig.I.3: Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement global n'a pas une composition absolument stable, dans les diverses stations et aux différentes époques de l'année. Cependant, à titre de large approximation, on cite souvent les chiffres suivants :

Tableau I.1: Répartition spectrale du rayonnement solaire

ultraviolet < 0,4 $\mu$	1%
rayons visibles 0,4 à 0,7 $\mu$	48%
infrarouges 0,7 à 2,5 $\mu$	51%

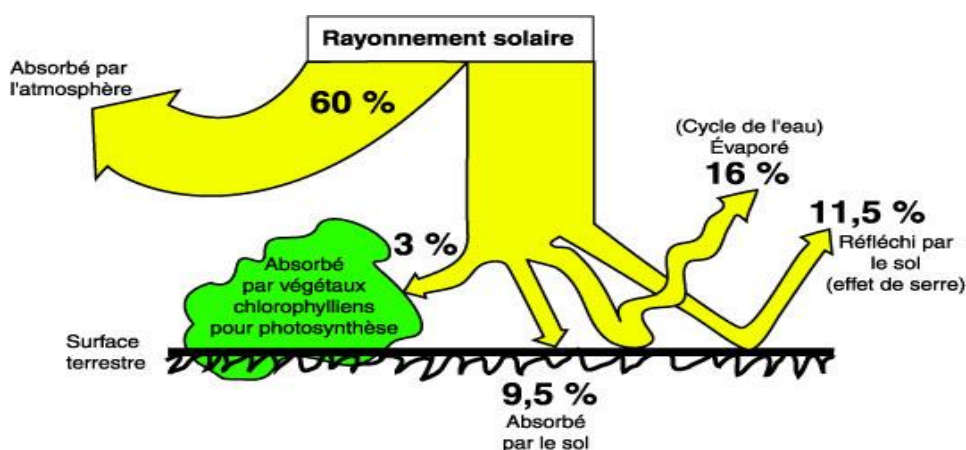


Fig.I.4: Pourcentage des parties du rayonnement solaire lors de sa propagation dans l'atmosphère

Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer :

- L'énergie thermique

- L'énergie photovoltaïque

## **I.2 Technique pour capter l'énergie solaire**

Un panneau solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie (électrique) utilisable par l'homme. Les panneaux sont habituellement plats d'une surface approchant plus ou moins le  $m^2$  pour faciliter et optimiser la pose. Les panneaux solaires sont les composants de bases de la plupart des équipements de production d'énergie solaire en trouve deux genre: Les panneaux solaires photovoltaïques et les panneaux solaires thermoélectriques.

## **I.3 Les panneaux solaires photovoltaïques**

Ces panneaux permettent de produire de l'électricité, la conversion directe de l'énergie solaire en électricité se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur comme le silicium. L'élément de base de ce panneau est la cellule photovoltaïque et le produit commercial s'appelle un module photovoltaïque.

## **I.4 Les panneaux solaires thermoélectriques**

Non seulement, il est possible de produire de l'énergie électrique au moyen de plaques solaires photovoltaïques, mais aussi grâce à la chaleur produite par la radiation solaire en utilisant la technologie solaire thermoélectrique ou la thermoélectricité. Le générateur thermoélectrique est un dispositif à semi-conducteurs qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique directement quand il y a un gradient thermique entre ses surfaces froides et chaudes.

## **I.5 Le Potentiel Solaire en Algérie**

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1m^2$  est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700KWh/m^2$  an au nord et  $2263kwh/m^2/an$  au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique.



Le tableau I.2 et la figure I.5 suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie, ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an [7, 8, 9].

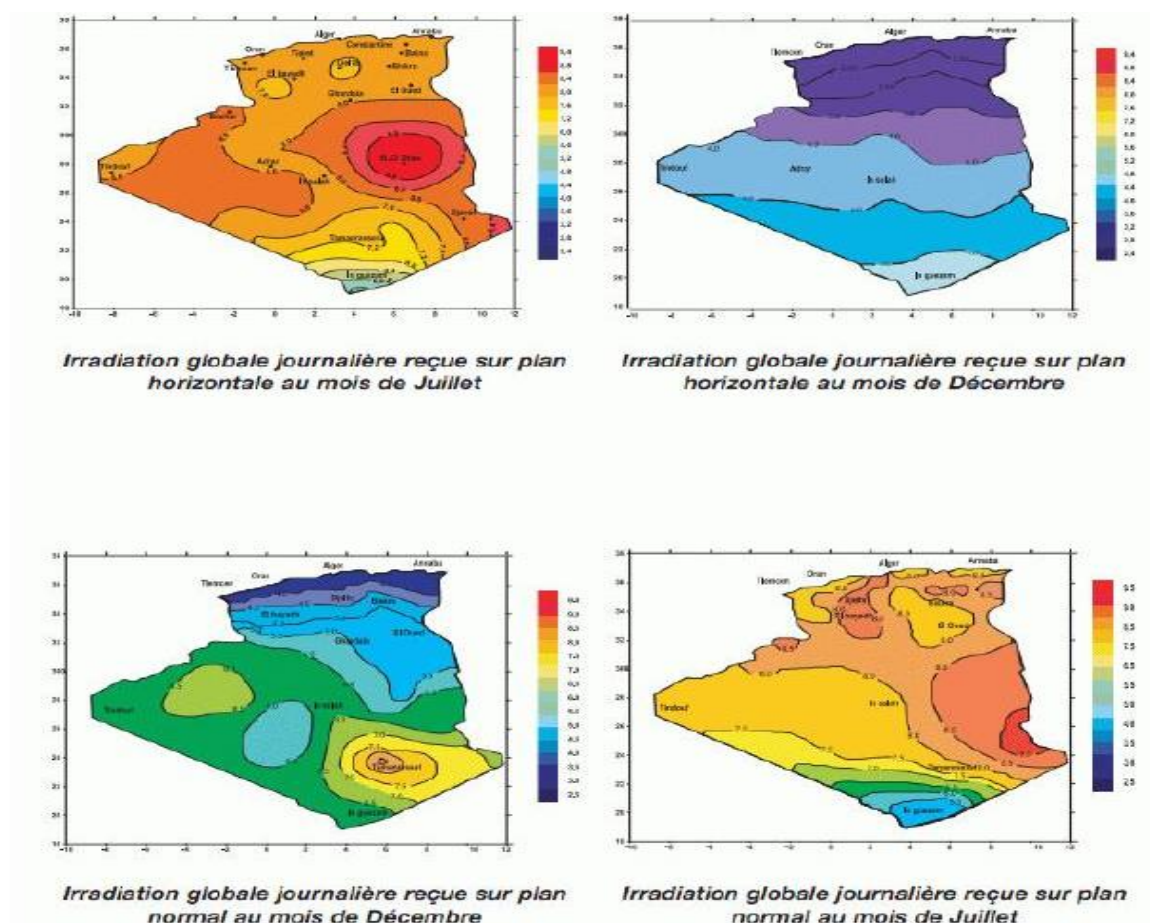


Fig.I.5 : Potentiel solaire en Algérie.

Le tableau I.2 : Le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures /an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermoélectrique, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules

photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

### **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques ainsi que les différents types de captage d'énergie solaire (systèmes photovoltaïques et thermoélectrique) existants et enfin le potentiel solaire en Algérie.

# **Chapitre II:**

## **Générateur Photovoltaïque**

## **Introduction**

Ces dernières années de nombreuses recherches se sont intéressées à l'utilisation des énergies renouvelables notamment l'énergie solaire ; cette dernière constitue une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre, elle ne produit pas de déchets et n'entraîne aucun risque majeur et aucune nuisance significative.

Notre étude porte sur la mise en équation des composants d'un système photovoltaïque (PV) ; à cet effet nous donnerons en premier lieu les notions de base des cellules PV, les panneaux solaires ainsi que l'influence des paramètres externes sur leur comportement [10].

### **II.1 La Cellule Photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt : unité de tension) sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité à courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires [11].

### **II.2 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure (II.1) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [11]. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

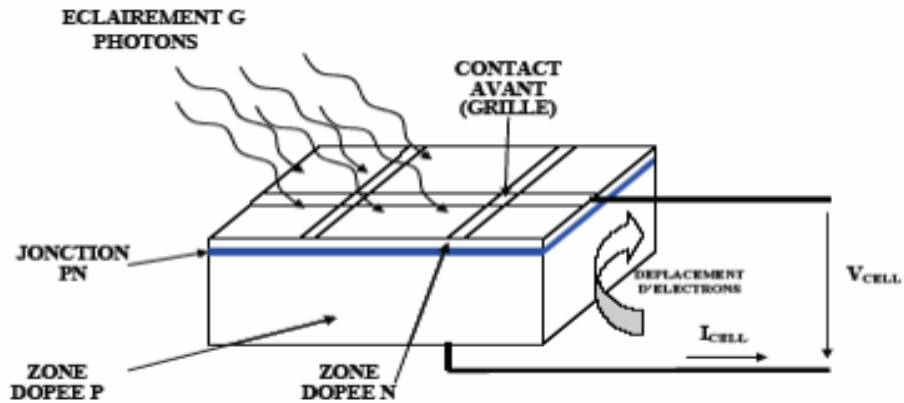


Fig. II.1 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.

### II.3 Jonction P-N

La jonction P-N est à la base de la plupart des applications des semi-conducteurs. Elle est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N (théoriquement). Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec les trous. De même, les trous du segment P pénètrent dans le segment N et se recombinent avec les électrons. Ce phénomène est appelé diffusion il résulte, au niveau de la transition des segments, l'apparition d'une zone exempte de charges mobiles appelée zone de transition (aussi nommée zone de charge d'espace ou zone d'épuisement), où seuls demeurent les atomes d'impuretés fixe les ions accepteurs dans le segment P (les ions donneurs dans le segment N) et les atomes de semi-conducteur neutres. Les charges constituées par les ions fixes sont à l'origine d'un champ électrique  $E$  dans la zone de transition, et par la même d'une différence de potentiel  $V_0$  (appelée barrière de potentiel) aux bornes de cette zone. Cette zone possède une grande impédance [12].

Le champ électrique  $E$  tend à maintenir les porteurs majoritaires dans leurs régions respectives et s'oppose ainsi à la cause qui lui donne naissance, ce qui conduit à un état d'équilibre.

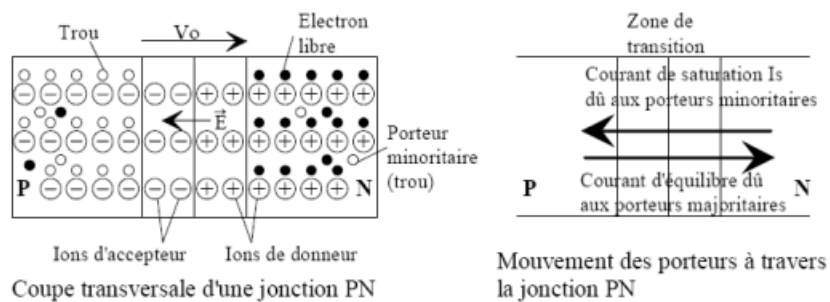


Fig II.2 : Jonction P-N

Cependant, le champ électrique  $E$  n'interdit pas le passage des porteurs minoritaires présents dans les segments de type P et N (courant de "saturation"  $I_s$ ). Ce mouvement est toutefois équilibré par les porteurs majoritaires qui possèdent l'énergie nécessaire au franchissement de la barrière de potentiel.

#### II.4 Rendement Photovoltaïque

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ces composants et définit leur performance. Le rendement est fonction du type de semi-conducteur utilisé et est directement lié au «band gap». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44 %. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, sa «band gap» est de 1.10 eV, celui de l'arséniure de gallium (GaAs) a un «band gap» quasi optimal de 1.4 eV. Le rendement commercial des cellules monocristallines est de l'ordre de 12 à 17 % maximum [13].

#### II.5 Modèle mathématique d'une cellule solaire

IL existe plusieurs modèles de cellules solaires, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. La différence entre ces modèles réside dans la procédure et le nombre des paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension. Pour notre étude nous élaborons le modèle à double exponentielle [10].

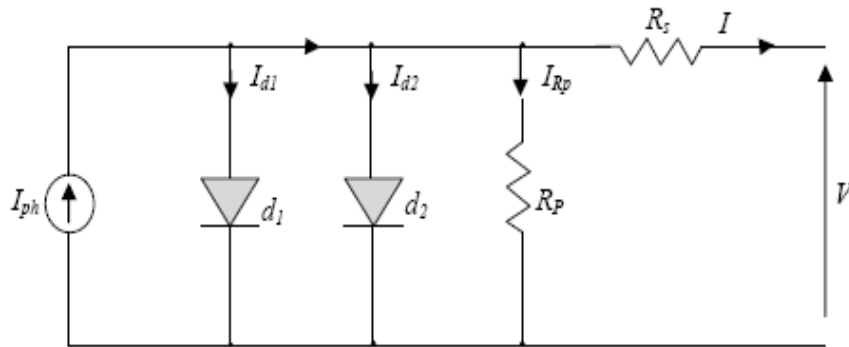
##### II.5.1 Modèle à deux diodes

C'est le modèle le plus cité dans la littérature, la cellule photovoltaïque est caractérisée par son schéma électrique (fig II.3) composé de :

- Source de courant: modélise la conversion de flux lumineux en courant électrique.
- Deux diode: modélise la jonction PN.
- Une résistance série  $R_s$  : est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

- Une résistance parallèle  $R_p$  : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [14].

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque peut être schématisé comme suit :



**Fig. II.3 :** Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

L'expression de la caractéristique courant-tension est décrite par l'expression ci-dessous [15] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (\text{II.1})$$

Le deuxième terme de l'équation (II.1) n'est rien que l'expression qui donne le courant de la diode ; il est représenté sous la forme de la superposition linéaire d'un courant de diffusion et d'un courant de génération-recombinaison selon l'équation (II.2) suivante :

$$I_d = I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] + I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

D'où le modèle à double exponentielle, dont la caractéristique courant-tension est décrit par l'expression (II.3) ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] - I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

La dépendance de la température est encore empilée par les propriétés du photocourant et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par : les équations (II.4, 5 et 6)

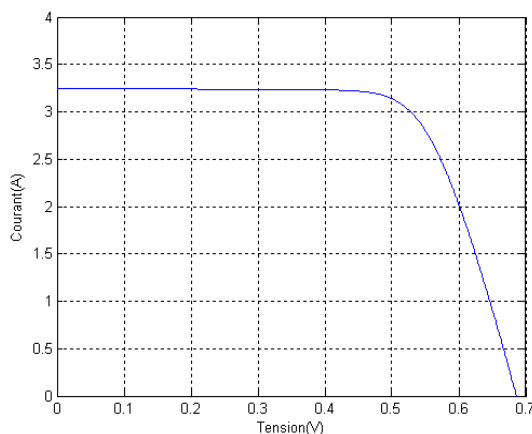
$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph}(T) = I_{ph0} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot [1 + (T - T_0) \cdot (5 \cdot 10^{-4})] \\ I_{d1} = A_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \\ I_{d2} = A_2 T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(II.4)} \\ \text{(II.5)} \\ \text{(II.6)} \end{array}$$

Avec :

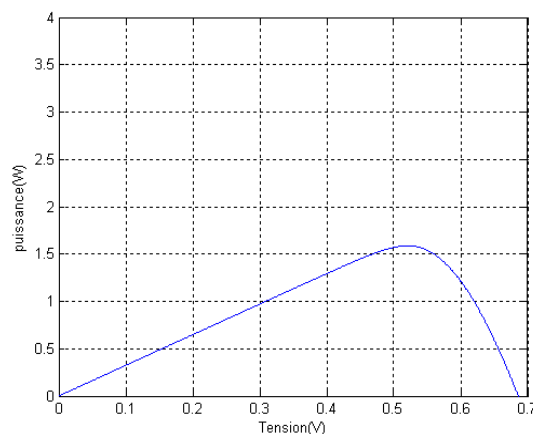
$$\left\{ \begin{array}{l} E_g = 1.76eV : \text{est la bande d'énergie du semi-conducteur} \\ A_1 = 1.2A/cm^2 \cdot K \\ A_2 = 2.9A/cm^2 \cdot K \end{array} \right.$$

### II.5.2 Simulation d'une cellule photovoltaïque

Les figures(II.4) et (II.5) ci-dessous représentent les caractéristiques courant-tension et puissance –tension d'une cellule photovoltaïque élémentaire, pour une température  $T=25^\circ\text{C}$  et un éclairement  $1000 \text{ W/m}^2$ .



**Fig. II.4 :** Caractéristique  $I=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque.



**Fig. II.5 :** Caractéristique de la puissance d'une cellule photovoltaïque.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance qui est insuffisante pour la plupart des applications, il est donc nécessaire de faire augmenter cette puissance en faisant associer plusieurs cellules PV dans différents montages.

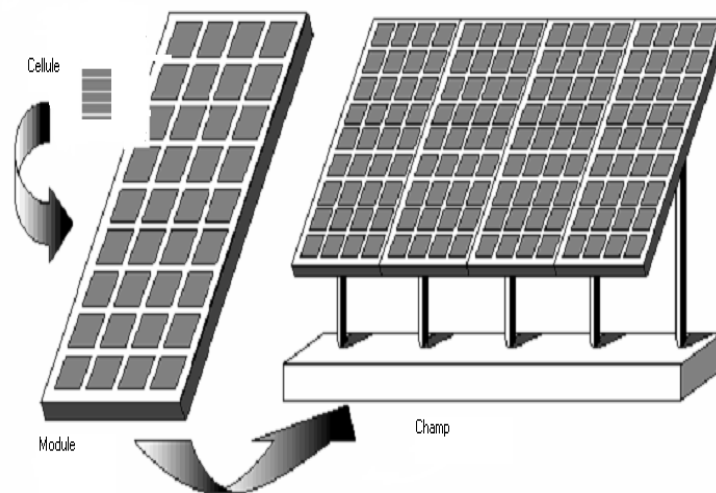


En effet, en associant ces cellules en série et en parallèle, on peut constituer des modules PV qui fournissent la puissance demandée selon les besoins de l'application visée.

## II.6 Module Photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc.) [14].



**Fig.II.6:** Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ

### II. 6.1 Caractéristiques d'un module Photovoltaïque

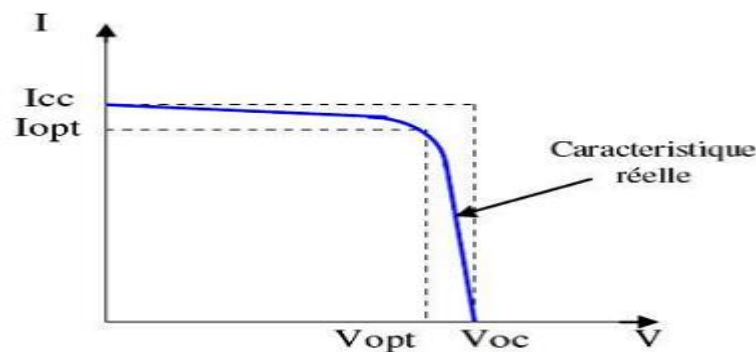
- ✓ La caractéristique  $I/V$  : Courbe représentante le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ✓ La puissance de crête  $P_c$  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).

- ✓ Tension à vide  $V_{co}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement "plein soleil".
- ✓ Courant de court-circuit  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement "plein soleil". Dans le cas idéal ( $R_s=0, R_p=\infty$ )

En pratique ce courant est très proche de la photo courant  $I_{ph}$

- ✓ Point de fonctionnement optimum,  $(V_{opt}, I_{opt})$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil :  $P_{opt} = V_{opt} \cdot I_{opt}$
- ✓ Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.  $\eta = P_{opt} / P_0$
- ✓ Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_{opt}$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $FF = V_{opt} * I_{opt} / V_{oc} * I_{cc}$

La figure (II.7) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$ .



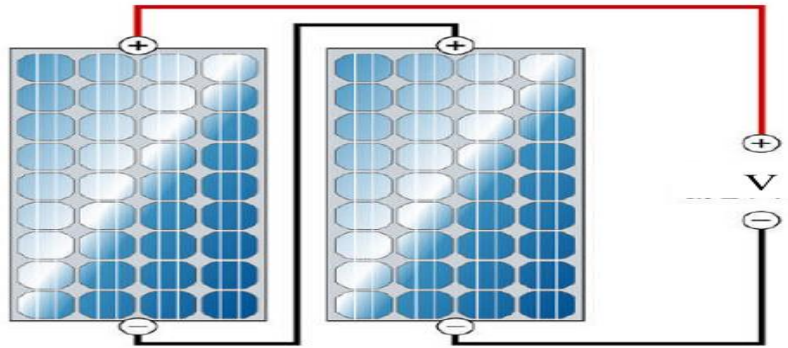
**Fig. II.7** : Caractéristique  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point  $P_{opt}$  [15].

## II.6.2 Association de cellules PV

### II.6.2.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné c-à-d augmente la tension (voir figure II.8) [16].



**Fig. II.8:** Association des modules en série.

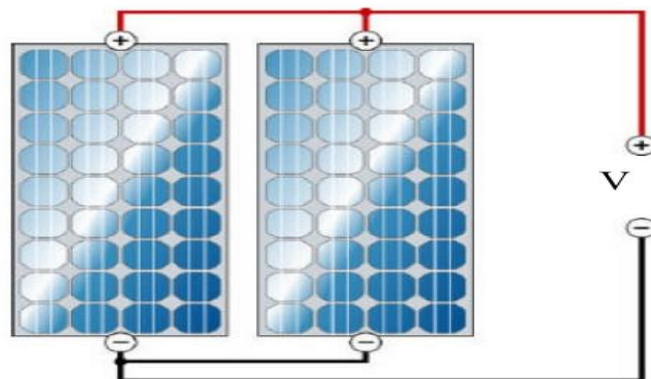
L'équation suivante montre le modèle mathématique d'un module photovoltaïque avec  $N_s$  cellules photovoltaïques raccordées en série :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V+I.N_s.R_s)}{N_s n_1 k T}} - 1 \right] - I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V+I.N_s.R_s)}{N_s n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + I.N_s.R_s}{N_s R_p} \quad (\text{II.7})$$

$N_s$  : Nombre des cellules en séries.

### II.6.2.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée c-à-d augmente le courant (voir figure II.9) [16].



**Fig. II.9 :** Association des modules en parallèle.

L'équation (II.8) suivante montre le modèle mathématique d'un module photovoltaïque avec  $N_p$  cellules photovoltaïques raccordées en parallèle :

$$I = I_{ph} - I_{d1} \left[ e^{\frac{q(V+I.N_p.R_s)}{N_p n_1 k T}} - 1 \right] - I_{d2} \left[ e^{\frac{q(V+I.N_p.R_s)}{N_p n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + I.N_p.R_s}{N_p R_p} \quad (\text{II.8})$$

$N_p$  : Nombre des cellules en parallèle

### II.6.3 Protection des cellules

Un problème persiste en montant les cellules solaires en série ou en parallèle pour générer une tension ou un courant suffisant pour le fonctionnement du système. En effet, lorsqu'une ou plusieurs cellules sont ombrées par un objet quelconque ou lorsqu'il existe des défaillances de quelques-unes, ces cellules deviennent des consommatrices de puissance et non des génératrices, ce qui cause des pertes d'énergie. Pour remédier à ce problème, on prend quelques cellules voisines et on les shunte par une diode en parallèle appelée 'Bypass diode'.

Ces diodes éviteront que le courant ne passe à travers ces cellules lorsque leur tension tombe au-dessous de la tension de seuil de la diode. On place aussi une diode en série avec le panneau pour éviter le retour du courant des autres panneaux montés en parallèles lorsqu'un panneau est mal ensoleillé [17].

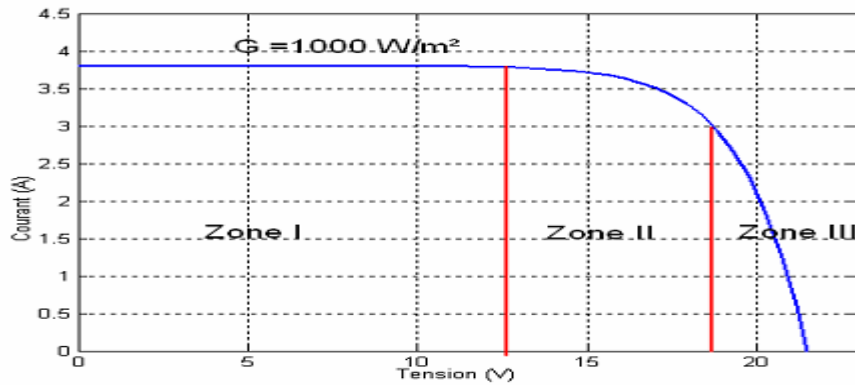
### II.6.4 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe  $I(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (II.10) représente trois zones essentielles [18].

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

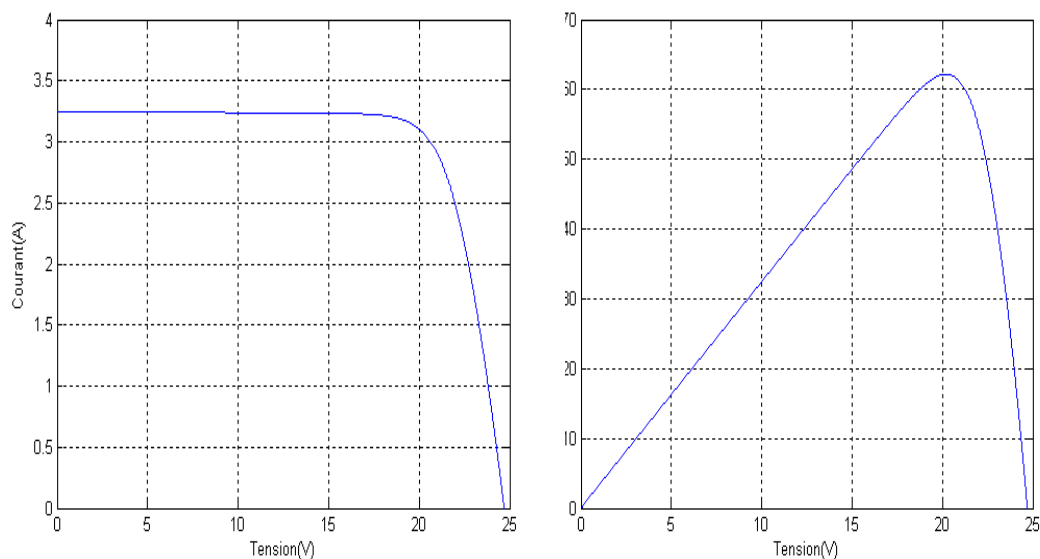


**Fig. II.10** : Les différentes zones de la caractéristique I (V),  $T=25^\circ\text{C}$

### II.6.5 Simulation d'un module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0.7V pour augmenter cette tension, on connecte un certain nombre des cellules (36 cellules), en série pour aboutir à une tension désirée de l'ordre de 25V. Dans une association en série, le même courant traverse chaque cellule tandis que la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules. La caractéristique courant-tension I (V), c'est une caractéristique fondamentale du module solaire d'un nombre de cellule 36.

On a choisi un module qui contient 36 cellules en série. ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).



**Fig. II.11** : Caractéristique I (V) et P (V) d'un module PV ( $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ).

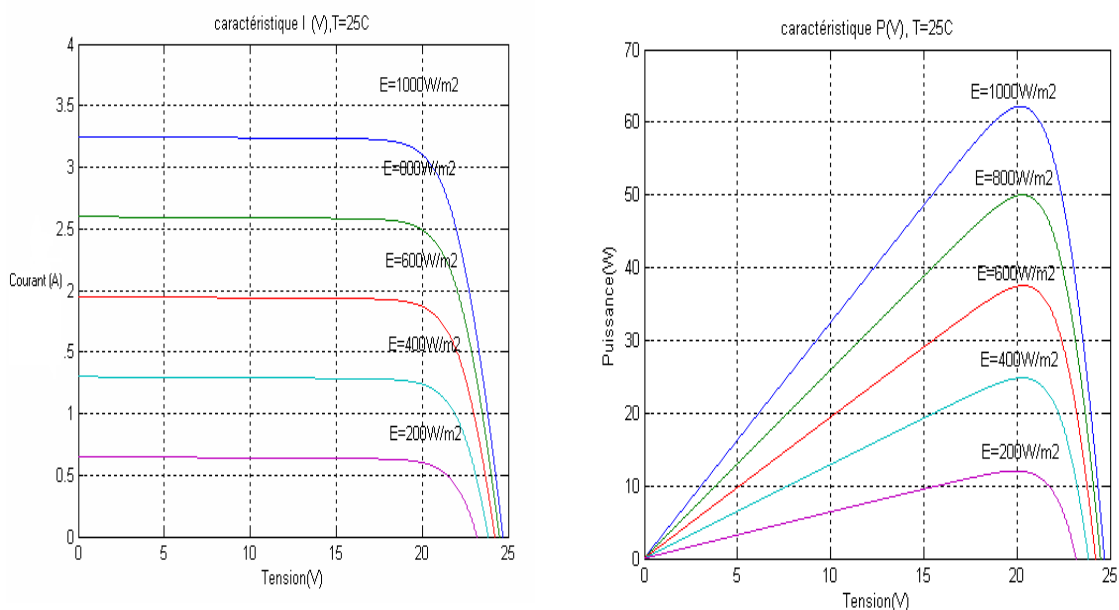
## II.7 Influence des paramètres externes et internes sur un module photovoltaïque

### II.7.1 Influence des paramètres externes

#### II.7.1.1 Influence de l'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit. La figure (II.12) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes  $I(V)$  se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante.



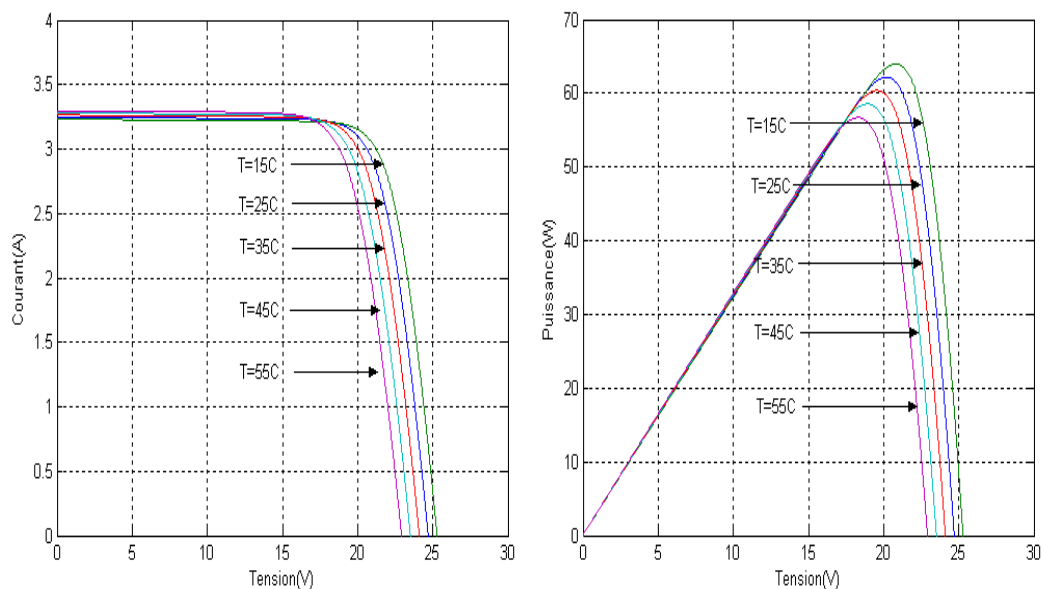
**Fig. II.12 :** Influence de l'éclairement sur le module pv

On remarque que la tension  $V_{max}$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_{max}$  qui augmente fortement avec l'éclairement.

#### II.7.1.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

La figure (II.13) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, à un éclairement constante ( $E=1000\text{W/m}^2$ ).



**Fig. II.13 :** Influence de la température sur le module PV.

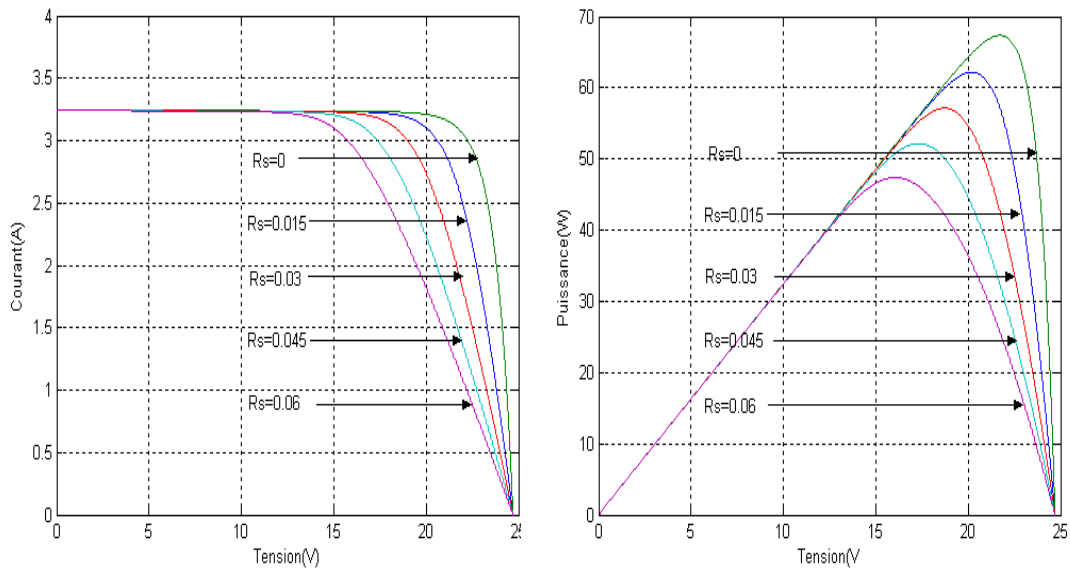
On remarque que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale

## II.7.2 Influence des paramètres internes

### II.7.2.1 Influence de la résistance série

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La figure (II.14) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique  $I = f(V)$  ( $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ).

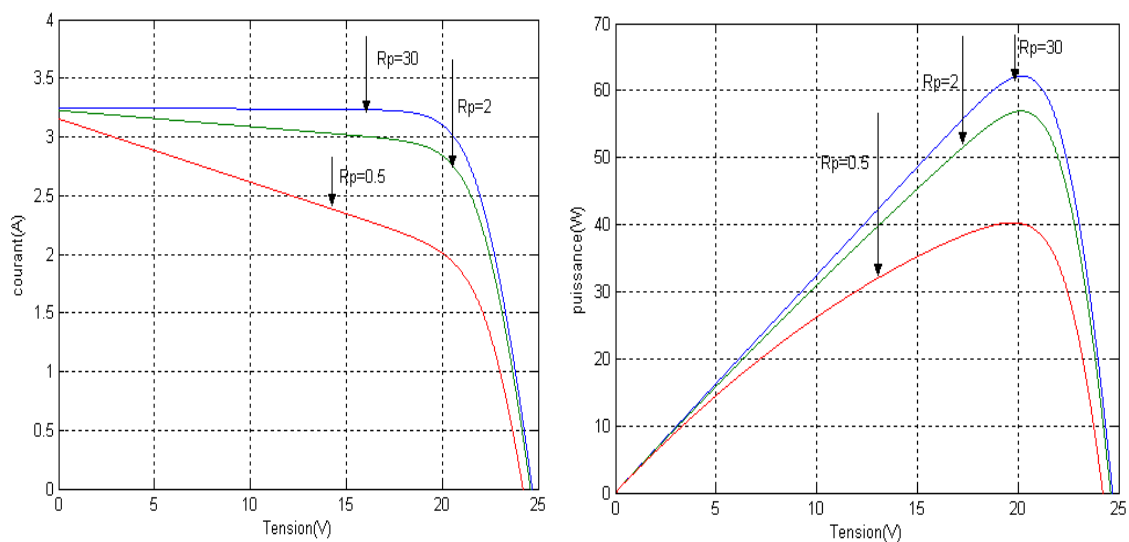


**Fig. II.14 :** L'influence de la résistance série  $R_S$  (Ohm) sur la caractéristique  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$ .

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit.

**II.7.2.2 Influence de la résistance shunt**

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes opposées positives d'une photopile. La figure (II.15) montre l'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique  $I=f(V)$  ( $E=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ C$ ).



**Fig. II.15:** L'influence de la résistance shunt  $R_p$  (Ohm) sur la caractéristique  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$



La résistance parallèle agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la Photo diode se comporte comme un générateur de courant lorsque la résistance shunt est très petite son influence est très remarquable, comme le montre la figure (II.15)

### II.8 Fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

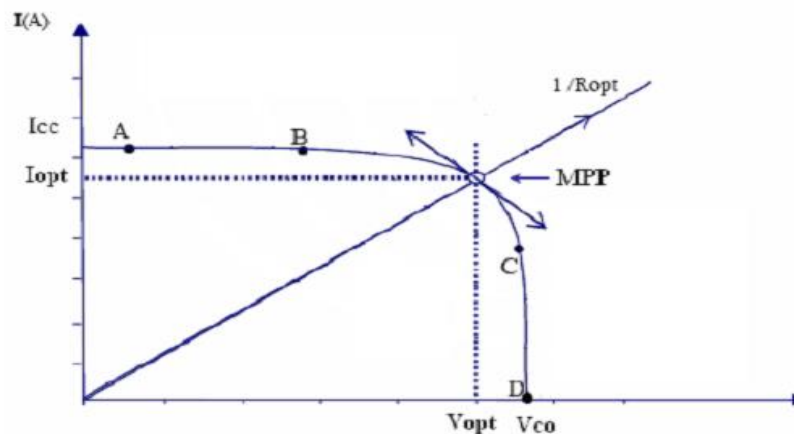
Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. C'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux le caractérisé relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie, l'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimal en ce point. Ce point est alors noté  $(V_{opt}, I_{opt})$ .

Le point du fonctionnement  $(V_{opt}, I_{opt})$  du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $(V_{opt}, I_{opt})$  permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans des conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge est

$$\text{donnée par la relation : } R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (\text{II.9})$$

Etant donné que ce point dépend totalement des conditions telles que l'éclairement  $E$  et la température  $T$ , il en est de même de l'impédance de charge optimale.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales  $R_{opt}$  lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire [19].



**Fig. II.16 :** Caractéristique I-V pour une charge résistive variable.

## II.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### Les Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir:

- une haute fiabilité – elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [16].

### Les Inconvénients

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée [16].

### Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et faible pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés. Dans notre pays, l'application du PV reste encore modeste. La première utilisation été dans le domaine des télécommunications. Après,

certain puits dans les hauts plateaux ont été équipés par des systèmes de pompes PV. A nos jours, quelques dizaines de villages sahariens de la région de Tamanrasset et Adrar jouissent des avantages de cette source d'énergie [20].

### **II.10 Conclusion**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donne lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module. Nous avons opté pour le modèle à deux diodes pour simuler le fonctionnement du module photovoltaïque pour différentes conditions d'irradiation et de température.

Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur. Et on a décrit ainsi que les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

# **Chapitre III:**

## **Générateur Thermoélectrique**

**Introduction**

Un effort important pour développer techniquement la conversion énergétique utilisant des matériaux solides a été engagé à partir des années 1950. C'est au cours des années 1960 qu'ont été développés les programmes de recherche les plus importants dans ce domaine à partir des matériaux semi-conducteurs. Les propriétés désirées pour les matériaux sont déterminées par le biais du facteur de mérite  $Z$  qui dépend des propriétés de transport du matériau comme la résistivité électrique, le coefficient de Seebeck et la conductivité thermique. La recherche de nouvelles sources d'énergies non polluantes est devenue un enjeu majeur pour nos sociétés. C'est pourquoi la production d'électricité à partir de chaleur perdue aux moyens de modules thermoélectriques (application de l'effet Seebeck) apparaît à ce jour comme une voie très prometteuse. Par ailleurs, des matériaux thermoélectriques peuvent être utilisés pour évacuer la chaleur par effet Peltier, notamment pour refroidir des composants de la microélectronique.

Ainsi, la thermoélectricité, ou conversion d'énergie à partir de la chaleur, fait partie de ces nouvelles sources d'énergies renouvelables. La conversion d'énergie thermique en énergie électrique est l'un des piliers des temps modernes. Des millions de tonnes d'énergie fossile sont chaque jour sacrifiées à la fée électricité pour notre confort. Pourtant, une large part de cette énergie se perd dans l'atmosphère sous forme de chaleur dans les centrales électriques, qui ne pouvant pas être efficacement exploitée. Les progrès des transports ont augmenté considérablement. Aujourd'hui le consommateur est aussi un nomade qui veut emporter son confort avec lui, créant de nouveaux besoins en sources d'énergie électrique. Ces besoins sont actuellement satisfaits au prix de la pollution de notre environnement par les métaux lourds contenus dans les batteries. La conversion thermoélectrique apporte une nouvelle voie à la demande croissante en source d'énergie électrique [21].

Dans ce chapitre, on va présenter la définition et le principe de fonctionnement de la cellule thermoélectrique, la modélisation mathématique de la cellule, l'effet des variations climatiques et l'analyse du panneau ou générateur thermoélectrique (GTE). Les différents groupements possibles des cellules sont décrits ainsi que la modélisation du générateur, le principe de conversion dans les systèmes thermoélectriques et enfin la simulation sous Simulink.

### III .1 La Thermoélectricité

La thermoélectricité régit la conversion à l'état solide d'énergie thermique en énergie électrique et vice versa. Il existe trois effets thermoélectriques : l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson. Après avoir rappelé ces effets, nous introduirons, en optimisant le rendement d'un générateur thermoélectrique, une grandeur adimensionnelle appelée facteur de mérite, qui va nous permettre de sélectionner la catégorie de matériaux pouvant être de bons candidats à la conversion thermoélectrique : les semi-conducteurs.

Le facteur de mérite qui est fonction de la conductivité électrique et thermique et du pouvoir thermoélectrique du matériau sera évalué en fonction du niveau de dopage, c'est-à-dire en fonction du niveau de Fermi, et de propriétés fondamentales de la matière telles que la conductivité thermique de réseau, la mobilité et les masses effectives des porteurs de charge (masse effective de densité d'états, masse inertielle).

Ceci nous permettra de sélectionner parmi les semi-conducteurs les matériaux susceptibles d'être les plus performants en faisant abstraction dans un premier temps de leur microstructure [22].

### III.2 Evaluation d'un matériau thermoélectrique

#### III.2.1 Les effets thermoélectriques

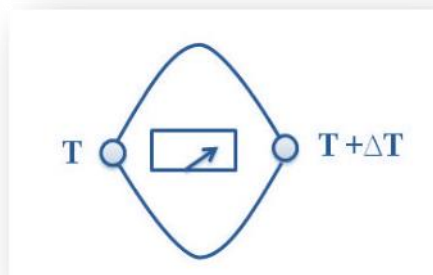
Les effets thermoélectriques sont observés chaque fois qu'il y a simultanément dans un conducteur, écoulement de chaleur et de charges électriques [21]. Lorsqu'un solide isotrope homogène est soumis à une densité de courant électrique  $\vec{J}$  et à un gradient de température  $\vec{\nabla}T$ , il y a dans ce solide un champ électrique  $\vec{E}$  et un flux thermique  $\vec{J}_q$  tels que

$$\begin{cases} \vec{E} = \rho\vec{J} + \alpha\vec{\nabla}T \\ \vec{J}_q = \pi\vec{J} - \lambda\vec{\nabla}T \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Où  $\rho$  est la résistivité électrique,  $\alpha$  le pouvoir thermoélectrique (ou coefficient Seebeck),  $\pi$  le coefficient Peltier et  $\lambda$  la conductivité thermique du matériau.

### III.2.1.1 Effet Seebeck

En 1821, le physicien allemand Thomas Seebeck remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de natures différentes et soumis à un gradient de température. Il attribua le phénomène à l'apparition d'un champ magnétique et crut ainsi trouver une explication au champ magnétique terrestre [1]. Plus tard, on expliquera le phénomène par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température (la figure. III. 1). Un matériau thermoélectrique va donc permettre de transformer directement la chaleur en électricité. L'utilisation la plus connue de cet effet est la mesure de la température à l'aide d'un thermocouple.



**Fig. III.1** : Premier dispositif expérimental décrit par Seebeck

Fixons  $\vec{\nabla}T \neq \vec{0}$  et  $\vec{J} = \vec{0}$  Le système d'équations (III. 1) devient :

$$\begin{cases} \vec{E} = \alpha \vec{\nabla}T \\ \vec{J}_q = -\lambda \vec{\nabla}T \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

La première égalité rend compte de l'effet Seebeck et la seconde exprime la loi de Fourier.

La première relation du système (III. 2) devrait permettre d'atteindre le pouvoir Thermoélectrique  $\alpha$  à partir de la différence de potentiel aux bornes du matériau. Mais la mesure est difficile et l'on préfère associer deux matériaux **A** et **B** (Figure III.2) en portant l'une des jonctions à la température  $T_H$  tandis que les deux autres extrémités sont maintenues à la température  $T_C$  avec  $T_C < T_H$

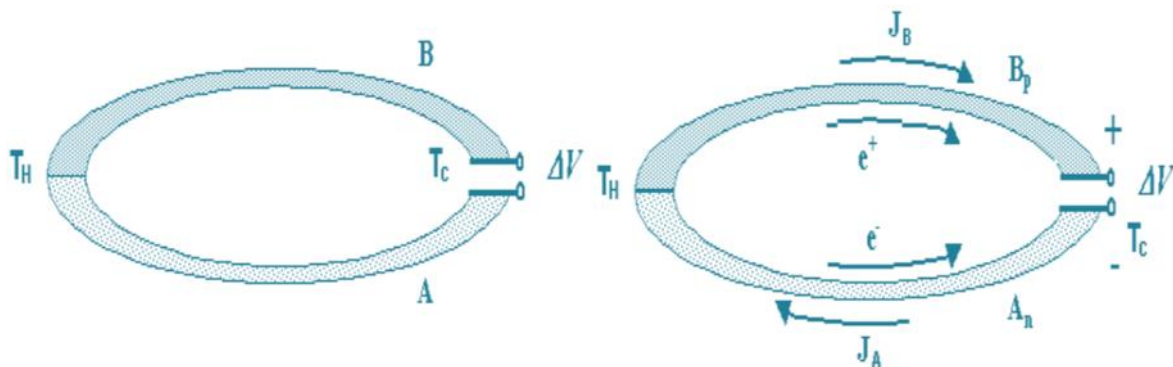
Ce faisant, on observe une tension  $\Delta V$  entre ces deux extrémités. Si on appelle  $\alpha_a$  le pouvoir thermoélectrique du matériau **A** et  $\alpha_b$  celui du matériau **B**, la différence de potentiel  $\Delta V$  s'exprime en fonction de la différence de température ( $T_H - T_C$ ) selon la relation :

$$\Delta V = -(\alpha_a - \alpha_b)(T_H - T_C) \quad (\text{III.3})$$

Si l'écart de température  $(T_H - T_C)$  est faible. En effet, le pouvoir thermoélectrique,  $\alpha$ , tout comme les autres coefficients  $\pi$ ,  $\rho$  et  $\lambda$  dépendent de la température.

Supposons que les matériaux **A** et **B** soient des semi-conducteurs de type n et respectivement. L'effet Seebeck s'explique par la diffusion des porteurs de charge, électrons (charge  $q = -e$ ) ou trous (charge  $q = +e$ ), du côté chaud vers le côté froid sous l'effet du gradient de température. Si le circuit est ouvert, les électrons (les trous) vont s'accumuler à l'extrémité du matériau de type n (de type p) du côté froid (Figure III. 2).

Cette densité de charges inhomogène crée un champ électrique  $\vec{E}$ , qui va s'opposer au mouvement des charges ( $\vec{F} = q\vec{E}$  étant la force électrique). Le champ et le potentiel électrique,  $V$ , étant reliés par  $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$ , l'extrémité froide du matériau de type n sera polarisée négativement, tandis que l'extrémité froide du matériau de type p sera polarisée positivement [22].



**Fig. III.2 :** Effet Seebeck.

### III.2.1.2 Effet Peltier

En 1834, le physicien français Jean Peltier découvrit le second effet thermoélectrique: une différence de température apparaît aux jonctions de deux matériaux de nature différente soumis à un courant électrique. Un matériau thermoélectrique permettra donc de générer du froid ou de la chaleur par l'application d'un courant électrique.

Fixons maintenant  $\vec{\nabla}T = \vec{0}$  et  $\vec{J} \neq \vec{0}$  Le système d'équations (III. 1) devient alors :



$$\begin{cases} \vec{E} = \rho \vec{J} \\ \vec{J}_q = \pi \vec{J} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

La première égalité exprime la loi d'Ohm tandis que la seconde rend compte de l'effet Peltier.

Soit un circuit formé de deux matériaux **A** et **B** ayant pour coefficients Peltier  $\pi_a$  et  $\pi_b$ , respectivement (Figure III.3.a). Le passage d'une densité de courant  $\vec{J}$  dans le circuit provoque le refroidissement de la jonction où le courant circule du matériau dont le coefficient Peltier est le plus faible vers le matériau dont le coefficient Peltier est le plus fort et provoque l'échauffement de l'autre jonction. Ce phénomène est à la base de la réfrigération par effet Peltier.

On montre facilement que le coefficient Peltier, compte tenu de sa définition (III. 4) est relié au coefficient Seebeck par la relation :

$$\pi = \alpha T \quad (\text{III.5})$$

Si les matériaux **A** et **B** sont respectivement des semi-conducteurs de type **n** et **p** de section unité, la densité de flux de chaleur  $\vec{J}_q$  pompée sera, compte tenu de (III. 5) :

$$\vec{J}_q = (\alpha_p - \alpha_n) T \vec{J} \quad (\text{III.6})$$

La jonction qui absorbe de la chaleur est alors celle dans laquelle le courant passe du matériau de type **n** (**A<sub>n</sub>**) au matériau de type **p** (**B<sub>p</sub>**) puisque  $\alpha_n < 0$  et  $\alpha_p > 0$  (Figure III. 3).

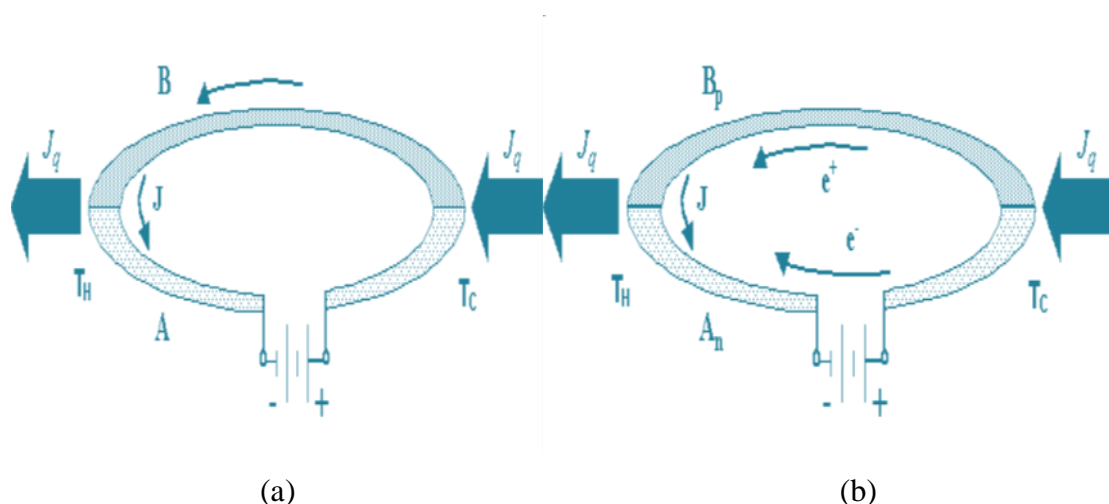


Fig. III. 3 : Effet Peltier.

### III.2.1.3 Effet Thomson

En 1851, le physicien anglais William Thomson (Lord Kelvin) montra que les effets Seebeck et Peltier sont liés. On met cette correspondance en évidence lorsqu'on applique simultanément un gradient de température et un courant électrique, la génération ou l'absorption de chaleur dans chaque segment du thermocouple. La différence fondamentale avec les deux premiers effets est ce dernier ne concerne un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction. Lorsqu'un conducteur, soumis à un gradient de température  $\vec{\nabla} T$ , est parcouru par un courant électrique  $I$ , il est le siège, en dehors de l'effet Joule, d'un échange de chaleur avec l'extérieur. La quantité de chaleur émise ou absorbée par unité de temps et de volume,  $dq$ , est proportionnelle à la densité de courant  $\vec{J}$  et au gradient de température :

$$dq = -\tau \vec{\nabla} T \cdot \vec{J} \quad (\text{III.7})$$

Où  $\tau$  est le coefficient Thomson du matériau.

Le coefficient Thomson est relié au coefficient Seebeck,  $\alpha$ , par la relation suivante :

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dt} \quad (\text{III.8})$$

L'effet Thomson présente une certaine analogie avec l'effet Peltier. Nous avons vu que l'effet Peltier provient de la différence de pouvoir thermoélectrique des deux matériaux.

Dans l'effet Thomson, il n'y a plus qu'un seul matériau parcouru par un courant et soumis à un gradient de température. Le pouvoir thermoélectrique du matériau varie d'un point à l'autre puisqu'il est dépendant de la température. Si par la pensée, on décompose le matériau en régions suffisamment petites pour que la température et le coefficient Seebeck y soient constants, on peut imaginer qu'il existe un effet Peltier entre deux régions voisines à des températures légèrement différentes et par conséquent ayant des coefficients Seebeck différents. L'effet Thomson apparaît ainsi comme un effet Peltier continu au sein du matériau.

### III.2.2 La recherche de bons matériaux thermoélectriques

En optimisant le rendement théorique d'un générateur thermoélectrique, nous allons faire apparaître une grandeur adimensionnelle  $ZT$  où  $Z$  est le facteur de mérite et  $T$  la température absolue. Cette grandeur joue un rôle essentiel puisque les performances de tout

dispositif thermoélectrique (générateur ou réfrigérateur) augmentent lorsque  $ZT$  croît. Le facteur de mérite dépend des propriétés de transport des matériaux et permet de les classer suivant leur capacité à convertir des flux de chaleur en électricité ou inversement. Nous montrerons que parmi les matériaux isolants, métalliques et semi-conducteurs, ce sont ces derniers qui ont les meilleures performances thermoélectriques [21].

### III.3 Rendement d'un générateur thermoélectrique

Dans la Figure (III.4), nous avons représenté le générateur thermoélectrique dont le rendement va être calculé. Le générateur est formé d'un couple de matériaux semiconducteurs de type n et p reliés en série par un élément métallique. Nous justifierons le choix de ces matériaux plus tard mais notons que la démarche reste générale. Le générateur est en contact thermique avec une source froide, de température  $T_C$ , et une source chaude, de température  $T_H$ , et est relié à une résistance électrique de charge  $R_L$ . Nous supposons que les conductivités électrique et thermique et le pouvoir thermoélectrique des branches n et p ne dépendent pas de la température. Cette hypothèse revient à négliger l'effet Thomson, compte tenu de l'équation (III. 8). De plus, nous négligerons les éventuelles résistances électriques et thermiques de contact aux jonctions. Enfin, nous supposons que la chaleur passe intégralement dans les éléments thermoélectriques.

Le rendement  $\eta$  d'un générateur thermoélectrique se définit comme le rapport de la puissance électrique utile  $W$  délivrée dans la charge utile de résistance  $R_L$  sur la puissance thermique absorbée du côté chaud,  $Q_H$  :

$$\eta = \frac{W}{Q_H} \quad (\text{III.9})$$

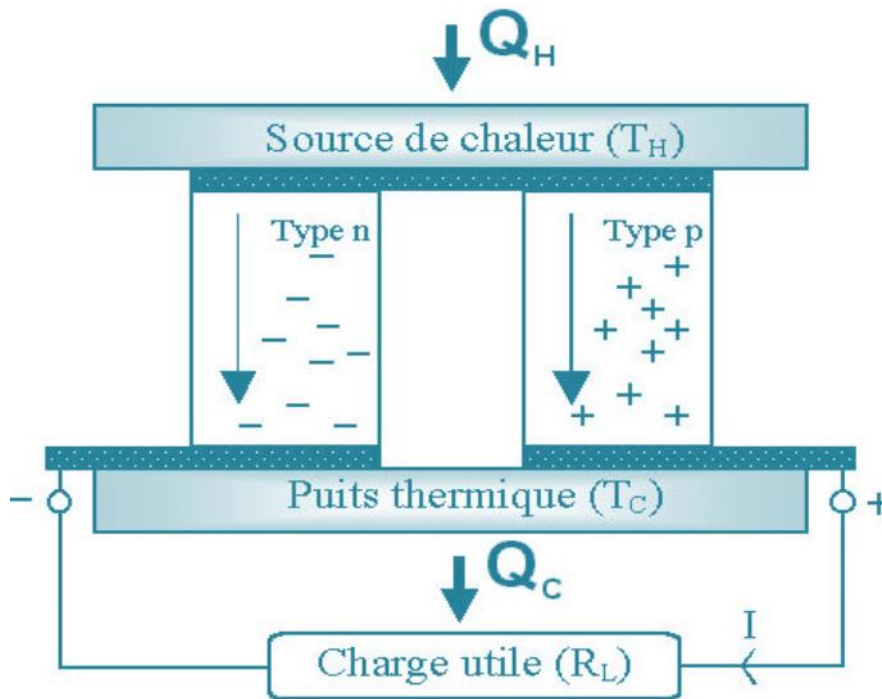
La puissance électrique utile est telle que :

$$W = R_L I^2 \quad (\text{III.10})$$

où  $I$  est le courant électrique donné par :

$$I = \frac{\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{R_n + R_p + R_L} \quad (\text{III.11})$$

où  $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$  et  $R_n$  et  $R_p$  sont les résistances électriques des branches n et p, respectivement.



**Fig III. 4 :** Représentation schématique d'un générateur thermoélectrique.

- Elément thermoélectrique semiconducteur de type **n**
- Elément thermoélectrique semiconducteur de type **p**
- Eléments métalliques connectant les éléments thermoélectriques

**T<sub>H</sub>, T<sub>C</sub>** Températures des sources chaude et froide

**R<sub>L</sub>** Résistance électrique de la charge utile

**I** Courant électrique

**Q<sub>H</sub>** Puissance thermique absorbée à la jonction chaude

**Q<sub>C</sub>** Puissance thermique libérée à la jonction froide

**a<sub>n</sub>, a<sub>p</sub>** Sections des éléments thermoélectriques de type **n** et **p**

**R<sub>n</sub>, R<sub>p</sub>** Résistances électriques internes des éléments thermoélectriques de type **n** et **p**

**K<sub>n</sub>, K<sub>p</sub>** Conductances thermiques des éléments thermoélectriques de type **n** et **p**

**α<sub>pn</sub>** Coefficient Seebeck du couple **n-p** ( $\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$ )

**ρ<sub>n</sub>, ρ<sub>p</sub>** Résistivités électriques des éléments thermoélectriques de type **n** et **p**

**λ<sub>n</sub>, λ<sub>p</sub>** Conductivités thermiques des éléments thermoélectriques de type **n** et **p**

La puissance électrique utile devient donc :

$$W = R_L \left( \frac{\alpha_{pn} (T_H - T_C)}{R_n + R_p + R_L} \right)^2 \quad \text{(III.12)}$$

La puissance thermique  $Q_H$ , absorbée à la jonction chaude est la somme de la puissance absorbée par effet Peltier  $Q_P$ , de la chaleur perdue par conduction thermique dans les éléments thermoélectriques  $Q_\lambda$  et de la moitié de la chaleur dégagée par effet Joule dans les éléments thermoélectriques  $P_J$ , avec :

$$Q_H = T_H \alpha_{pn} I \quad (\text{III.13})$$

$$Q_\lambda = (K_n + K_p)(T_H - T_C) \quad (\text{III.14})$$

$$P_J = \frac{1}{2}(R_n + R_p)I^2 \quad (\text{III.15})$$

L'équation (III. 9) du rendement devient donc :

$$\eta = \frac{W}{Q_H + Q_\lambda - P_J} \quad (\text{III.16})$$

$$\eta = \frac{R_L \left( \frac{\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{R_n + R_p + R_L} \right)^2}{T_H \alpha_{pn} I + (K_n + K_p)(T_H - T_C) - \frac{1}{2}(R_n + R_p)I^2} \quad (\text{III.17})$$

En posant :

$$r = \frac{R_L}{R_n + R_p} Z_{np} = \frac{\alpha_{np}^2}{(K_n + K_p)(R_n + R_p)} \quad (\text{III.18})$$

Où  $Z_{np}$  est appelé le facteur de mérite du couple n-p, le rendement devient :

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{r}{r + 1 + \frac{(r+1)^2}{Z_{np} T_H} - \frac{T_H - T_C}{2T_H}} \quad (\text{III.19})$$

Et la puissance électrique utile s'écrit :

$$W = \frac{\alpha_{np}^2}{(R_n + R_p)} (T_H - T_C)^2 \frac{r}{(r+1)^2} \quad (\text{III.20})$$

Le terme  $(T_H - T_C)/T_H$  qui apparaît dans l'équation (III. 18) est le rendement de Carnot d'une machine thermique idéale, le second terme est inférieur à l'unité et prend en compte les effets irréversibles. On notera que d'après son expression ce terme est d'autant plus élevé que le facteur de mérite du couple  $\mathbf{n,p}$  est élevé.

En fait, comme le montre l'équation (III. 19),  $Z_{np}$  n'est pas une quantité fixée pour une paire de matériaux donnée mais dépend des dimensions géométriques des deux branches à travers le facteur  $(R_n + R_p)(K_n + K_p)$ . Comme  $Z_{np}$  joue un rôle essentiel dans les performances d'un générateur, il est important d'optimiser les sections  $\mathbf{a}_n$  et  $\mathbf{b}_n$  des deux éléments thermoélectriques.  $Z_{np}$  est maximum quand le produit  $(R_n + R_p)(K_n + K_p)$  est minimum. Cette condition est réalisée lorsque :

$$\frac{A_n}{B_p} = \sqrt{\frac{\rho_n \lambda_n}{\rho_p \lambda_p}} \quad (\text{III.21})$$

Quand cette égalité est satisfaite, le facteur de mérite du couple devient :

$$Z_{np} = \frac{(\alpha_n - \alpha_p)^2}{(\sqrt{\rho_n \lambda_n} + \sqrt{\rho_p \lambda_p})^2} \quad (\text{III.22})$$

La résistance de charge qui maximise le rendement est telle que

$$\frac{d\eta}{dr} = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{d\eta}{dR_L} = 0 \quad (\text{III.23})$$

Ce qui conduit à :

$$r_0 = \sqrt{1 + Z_{np} T_m} \quad (\text{III.24})$$

Avec

$$T_m = \frac{(T_H - T_C)}{2} \quad (\text{III.25})$$

Le rendement maximum est alors :

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{r_0 - 1}{r_0 + \frac{T_H}{T_C}} \quad (\text{III.26})$$

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z_{np} T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z_{np} T_m} + \frac{T_H}{T_C}} \quad (\text{III.27})$$

Nous pouvons aussi calculer la résistance de charge optimale pour avoir une puissance électrique maximale. Un calcul équivalent montre que la résistance de charge optimale  $R_L$  est obtenue lorsque  $r = 1$  soit :

$$R_L = R_n + R_p \quad (\text{III.28})$$

La puissance électrique maximale est alors :

$$W = \frac{R_L}{4} \left( \frac{\alpha_{pn}(T_H - T_C)}{R_n + R_p} \right)^2 \quad (\text{III.29})$$

L'utilisation du facteur de mérite,  $Z_{np}$ , pour optimiser les matériaux thermoélectriques est difficile puisqu'elle nécessite l'élaboration de matériaux de type **n** et **p** et la mesure de leurs propriétés de transport ou la fabrication d'un générateur thermoélectrique. On préfère, et c'est la démarche qui est généralement adoptée, optimiser les propriétés thermoélectriques de chaque matériau en utilisant un facteur de mérite  $Z$  propre à chaque matériau. Par analogie avec la relation (III. 22), celui-ci est défini par :

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \lambda} \quad (\text{III.30})$$

Où  $\rho$ ,  $\alpha$  et  $\lambda$  sont respectivement la résistivité électrique, le pouvoir thermoélectrique et la conductivité thermique du matériau thermoélectrique étudié. Le terme  $\alpha^2/\rho$  est appelé facteur de puissance.

#### III.4 Sélection et optimisation des matériaux thermoélectriques

D'après la relation (III. 29), on peut voir que la recherche d'un bon matériau thermoélectrique à une température donnée passe par la recherche de matériaux possédant un

pouvoir thermoélectrique  $\alpha$  élevé, une faible résistivité électrique  $\rho$ , et une faible conductivité thermique  $\lambda$ . Cette dernière résulte en général de deux contributions distinctes:

la conductivité thermique électronique  $\lambda_e$  et la conductivité thermique de réseau  $\lambda_L$  :

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_L \quad (\text{III.31})$$

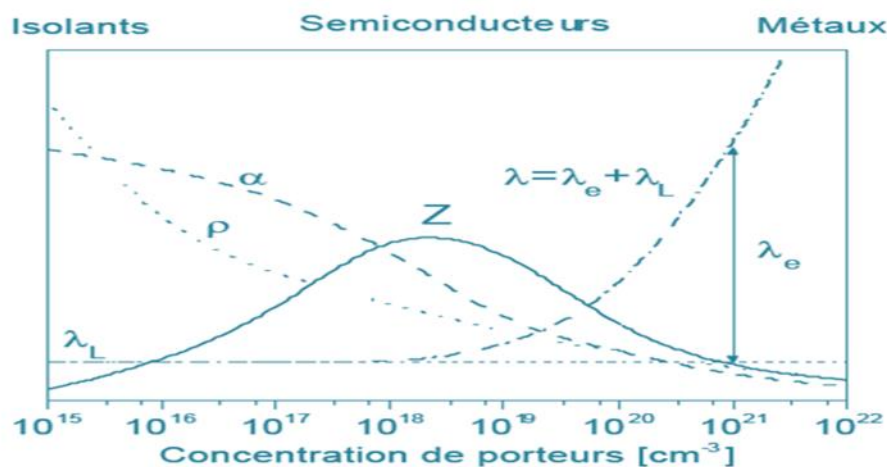
On montre que la conductivité thermique électronique peut se mettre sous la forme :

$$\lambda_e = \frac{L}{\rho} T \quad (\text{III.32})$$

où  $L$  est le facteur de Lorenz.

En fait, les trois propriétés de transport  $\rho$ ,  $\alpha$  et  $\lambda$  ne sont pas indépendantes et sont fonction de la concentration des porteurs de charge comme le montre la Figure III. 4. On peut noter que les métaux ne sont pas de bons matériaux thermoélectriques à cause de leur faible pouvoir thermoélectrique et de leur grande conductivité thermique électronique. Les isolants (ou les semiconducteurs faiblement dopés) ont certes un pouvoir thermoélectrique important et une faible conductivité thermique électronique mais leur densité de porteurs est trop faible ce qui résulte en une résistivité électrique trop importante et donc un faible facteur de mérite.

En fait, le meilleur compromis se situe pour des concentrations de l'ordre de  $10^{18}$ - $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ , valeurs que l'on retrouve dans les semiconducteurs fortement dégénérés ou les semimétaux.



**Fig. III. 5 :** Variation schématique des propriétés de transport des solides en fonction de la concentration de porteurs de charge à température ambiante.



Les propriétés de transport des semiconducteurs peuvent varier dans une très grande gamme de valeurs. Le silicium dopé ( $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) a un pouvoir thermoélectrique d'environ  $290 \mu\text{V.K}^{-1}$ , une résistivité de  $25 \mu\Omega.\text{m}$ , une conductivité thermique de  $100 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et un facteur de mérite  $ZT$  à température ambiante de 0,01. Les alliages à base de Tellure et de Bismuth ont un pouvoir thermoélectrique d'environ  $200 \mu\text{V.K}^{-1}$ , une résistivité de  $7 \mu\Omega.\text{m}$  et une conductivité thermique de  $1,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  soit un  $ZT$  de l'ordre de 1 pour une concentration de porteurs de  $10^{18}$ - $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous nous proposons dans les trois prochaines parties de définir des critères de sélection qui permettront de choisir parmi les semiconducteurs, ceux qui auront les meilleures propriétés thermoélectriques [22].

### III.5 Modélisation d'un générateur Thermoélectrique

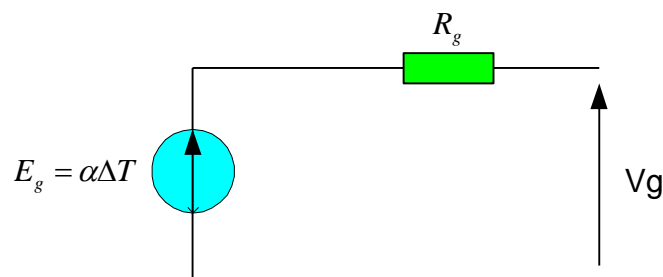
#### III.5.1 Modélisation d'une cellule Thermoélectrique

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire le fonctionnement de la cellule thermoélectrique et son comportement sous différentes conditions météorologiques (éclairage et température) ; ces modèles ont été affirmés au cours du temps et en fonction des moyens de calcul disponibles. Les modèles les plus utilisés sont :

- Modèle comme source de tension (Modèle de Thévenin).
- Modèle comme source de courant (Modèle de Norton).

##### III.5.1.1 Modèle comme source de tension

Ce modèle est connu comme une source de tension ou comme générateur de Thévenin avec source de tension en fonction de la différence de température et une résistance en série équivalent à la résistance interne, le schéma électrique équivalent de la cellule solaire comme la montre la figure (III.6) ci-dessous.



**Fig.III.6** : Schéma électrique équivalent d'une cellule thermoélectrique (modèle de Thévenin)

La caractéristique courant-tension est décrite par l'expression suivante :

$$V_g = \alpha \Delta T - R_g I_g \quad (\text{III.33})$$

Avec :

$I_g$  : Courant délivré par la cellule TE

$E_g$  : Tension délivrée par la cellule TE

$V_g$  : Tension de sortie de la cellule TE

$\alpha_g = \alpha_n + \alpha_p$  : Constante Seebeck V/K.

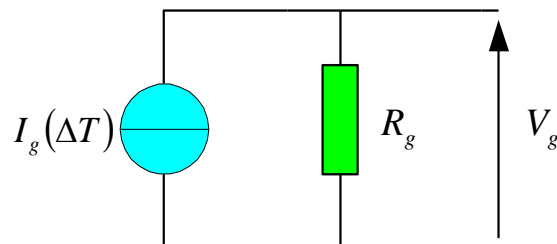
$R_g = R_n + R_p$  : Résistance série, représente les diverses résistances de contacts et de connexions.

$\alpha$  : Constante de Seebeck V/K

$\Delta T$  : Différence de Température de la cellule en ° K

### III.5.1.2 Modèle comme source de courant

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule thermoélectrique (Modèle de Norton) est représenté sur la figure (III.7) suivante :



**Fig. III.7** : Schéma électrique équivalent d'une cellule thermoélectrique (modèle de Norton)

La caractéristique courant-tension est décrite par l'expression suivante :

$$I_g = \frac{E_g - V_g}{R_g} \quad (\text{III.34})$$

$$I_g = \frac{\alpha \Delta T - V_g}{R_g} \quad (\text{III.35})$$

Avec :

$I_g$  : Courant délivré par la cellule TE

$E_g$  : Tension délivrée par la cellule TE

$V_g$  : Tension de sortie de la cellule TE

$\alpha_g = \alpha_n + \alpha_p$  : Constante Seebeck V/K.

$R_g = R_n + R_p$  : Résistance shunt, représente les diverses résistances de contacts et de connexions

$\alpha$  : Constante de Seebeck V/K

$\Delta T$  : Différence de Température de la cellule en ° K

La caractéristique Puissance-tension est décrite par l'expression suivante :

$$P_g = I_g V_g \quad (\text{III.36})$$

$$P_g = \frac{(\alpha \Delta T - V_g) V_g}{R_g} \quad (\text{III.37})$$

**Tableau.III.1:** Elément des cellules TE ECT-310

Caractéristique d'Elément TE ECT-310	
type	TEC2L-15-15-5.6/73CS
Constante de Seebeck V/K	12.5mV/K
Résistance interne	1.44Ω
la conductivité thermique	0.046W/K

Le module d'ECT 310 est un module thermoélectrique de générateur développé par EnOcean [ 25 ], qui est employé en cet travail. Ce module permet d'employer la chaleur en

tant que leur source d'énergie. Typiquement, ce module relie externe de l'élément Tec21-15-15-5.6/73 de Peltier.

### III. 5.1.3 Modèle d'étude

Pour notre cas, le modèle choisi est celui « Modèle de Norton » et la caractéristique du modèle choisi est décrite par l'expression (III.35) où les paramètres  $V_g$ ,  $R_g$ ,  $I_g$  sont fonction du gradient de la température.

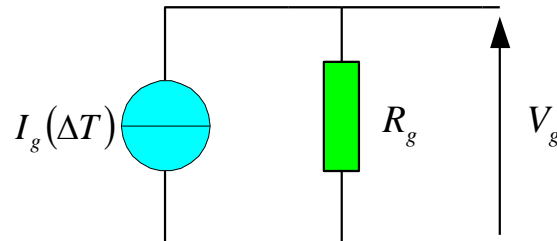


Fig. III.8 : Schéma électrique équivalent d'une cellule TE (modèle de Norton)

### III.5.2 Simulation de la caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule TE

Les figures ci-dessous représentent les caractéristiques courant-tension et puissance – tension d'une cellule Thermoélectrique élémentaire, pour un gradient ou différence de température  $\Delta T = 25$  K

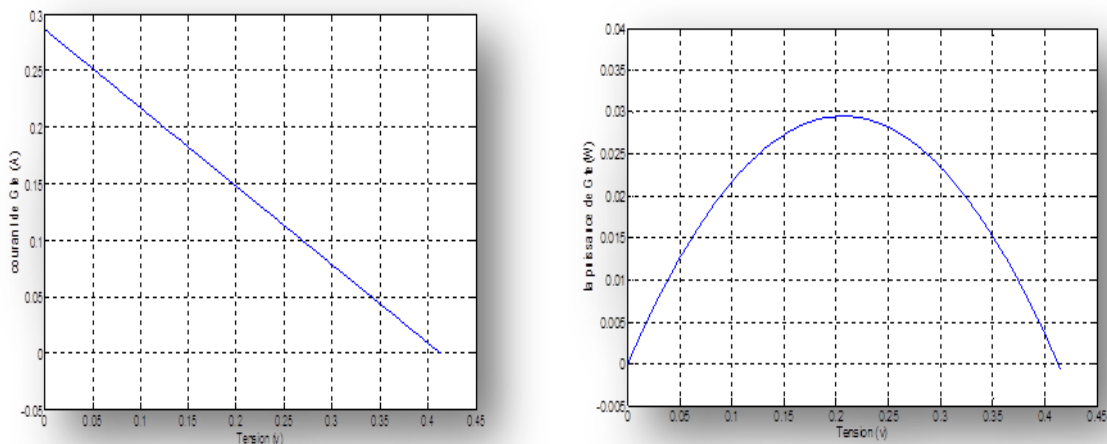


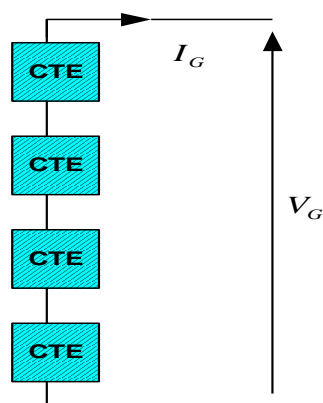
Fig. III.9 : la caractéristique Puissance-tension et caractéristique courant-tension

### III.5.3. Association de cellules TE

La cellule Thermoélectrique élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance qui est insuffisante pour la plupart des applications, il est donc nécessaire de faire augmenter cette puissance en faisant associer plusieurs cellules TE dans différents montages. En effet, en associant ces cellules en série et en parallèle, on peut constituer des modules TE qui fournissent la puissance demandée selon les besoins de l'application visée.

#### III.5.3.1. Association en série

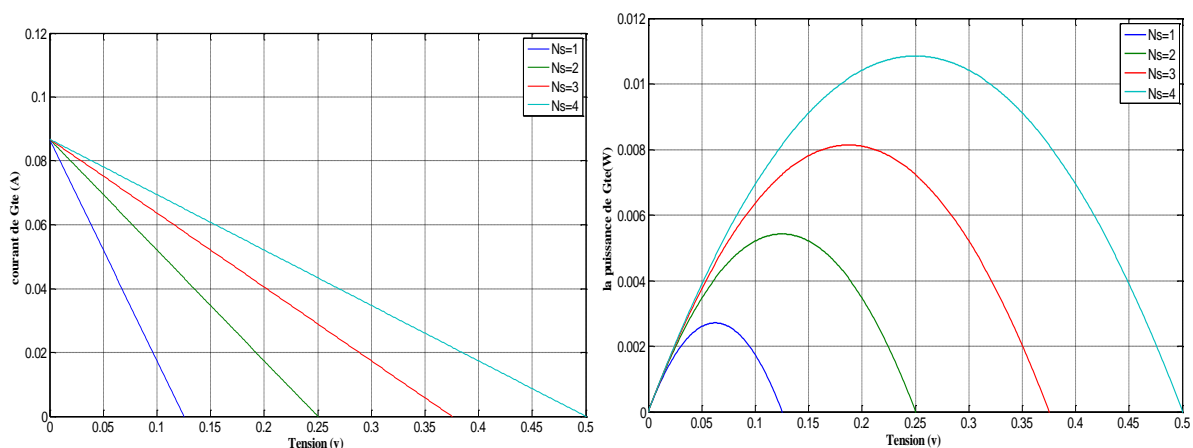
L'assemblage se présente sous la forme suivante :



**Fig.III.10** : Association en série de  $N_s$  cellules TE identiques

Si on assemble en série  $n_s$  cellules, la tension  $V$  aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

La caractéristique courant-tension résultante de cet assemblage est obtenue par l'addition des tensions comme on peut le constater dans la figure (III.11) suivante :



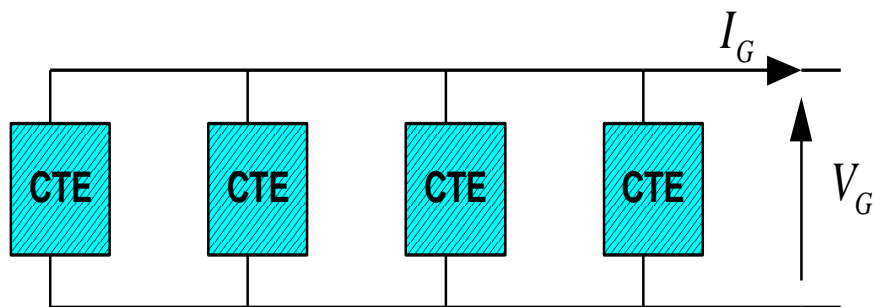
**Fig.III.11** : Caractéristique courant-tension et puissance-tension de l'association de  $N_s$  cellules identiques en série

Dans la figure (III.11) qui précède,  $V_{co}$  et  $V_{sco}$  représentent respectivement la tension du circuit ouvert d'une cellule et la tension de l'assemblage de  $N_s$  cellule en série,  $I_{cc}$  et  $I_{scc}$  sont respectivement le courant de court-circuit d'une cellule et le courant du regroupement.

### III.5.3.2 Association en parallèle

Dans le cas d'un assemblage en parallèle de  $N_p$  cellules TE, le courant  $I$  de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

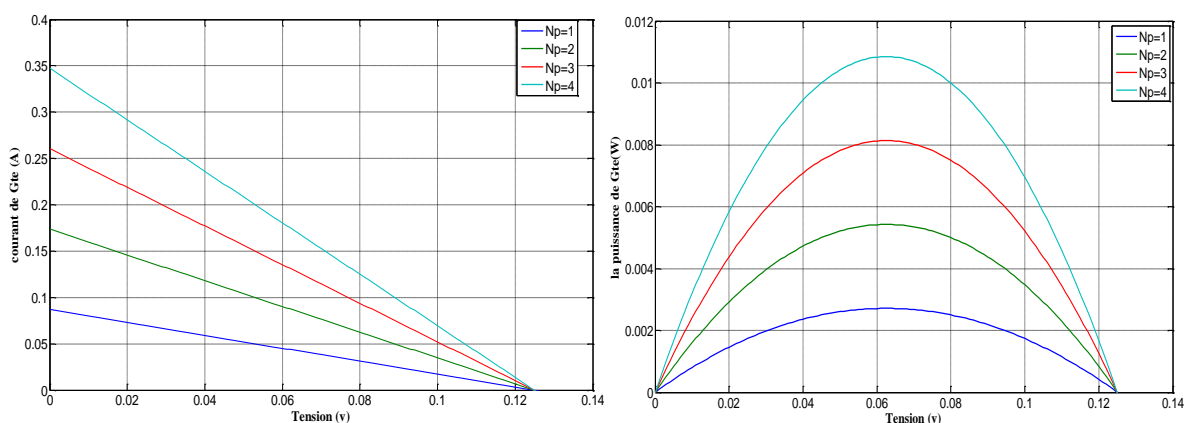
L'assemblage se présente sous la forme suivante :



**Fig.III.12:** Association en parallèle de  $N_p$  cellules TE identiques

Les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante est obtenue par l'addition des courants comme l'indique la figure (III.13).

Dans cette figure,  $V_{co}$  et  $V_{pco}$  représentent respectivement la tension d'une cellule et la tension de tout l'assemblage ;  $I_{cc}$  et  $I_{pcc}$  étant respectivement le courant de court-circuit d'une cellule et le courant de regroupement. Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent donc la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents.

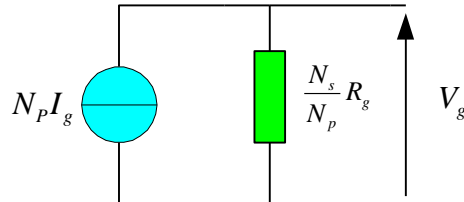


**Fig.III.13 :** Caractéristique courant-tension et puissance -tension de l'association de  $N_p$  cellules identiques en parallèle

### III.5.4 Modélisation d'un générateur Thermoélectrique

#### - Cas général: Association en mixte

Les études effectuées ont conduit au développement de nombreux modèles de générateurs, parmi lesquels celui schématisé sur la figure (III.14) suivante :



**Fig.III.14** : Schéma équivalent d'un générateur Thermoélectrique

L'équation donnant la caractéristique courant-tension (I-V) et d'un générateur TE peut s'écrire comme suit :

$$I_G = \frac{N_S \cdot \alpha \Delta T - V_G}{R_G} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$$I_G = N_p \cdot I_g \quad (\text{III.39})$$

$$E_G = N_s \cdot E_g \quad (\text{III.40})$$

$$V_G = N_s \cdot V_g \quad (\text{III.41})$$

$$R_G = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_g \quad (\text{III.42})$$

L'équation donnant la caractéristique puissance-tension (P-V) d'un générateur TE peut s'écrire comme suit :

$$P_G = I_G \cdot V_G \quad (\text{III.43})$$

$$P_G = \frac{(N_s \cdot \alpha \Delta T - V_G) \cdot V_G}{R_G} \quad (\text{III.44})$$

III.6.Caractéristique I=f (V) et P(V) d'un module TE

On a choisi un module qui contient  $N_S = 100 * N_P = 25$  cellules associé en mixte

III.6.1.Caractéristique I(V) et P(V) d'un panneau TE

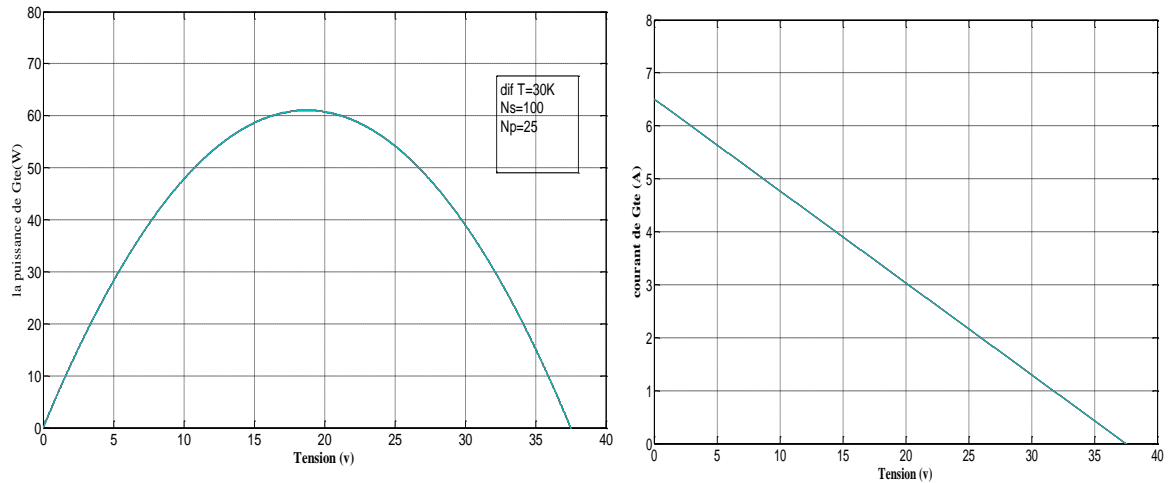


Fig. III.15 : Caractéristique courant-tension et puissance- tension résultante d'un groupement en série et en parallèle des modules identiques

III.6. 2. Influence de la température sur le fonctionnement du module TE

Les caractéristiques électriques d'une cellule TE dépendent du gradient de la température de jonction au niveau des surfaces exposées. Les figures (III.16) et (III.17) illustrent l'influence du gradient de température sur les caractéristiques I(V) et P(V) du module TE.

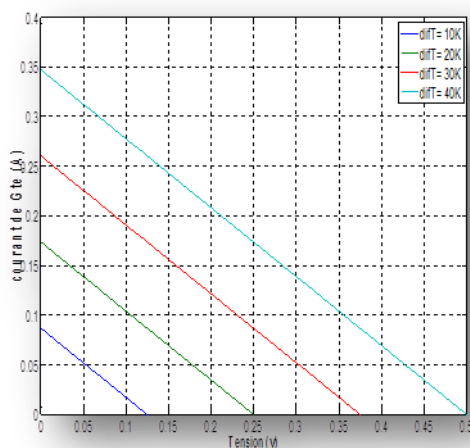


Fig. III.16 : Caractéristique courant-tension d'un module TE pour différentes valeurs de gradient de température

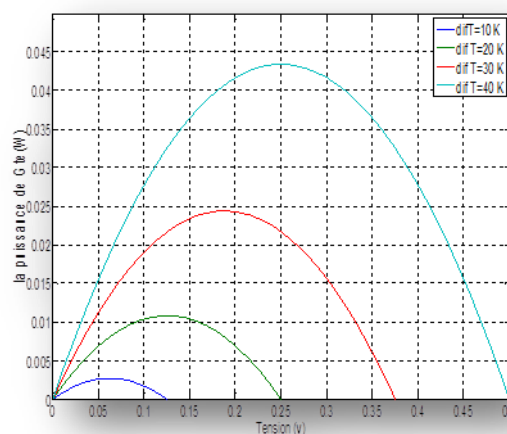


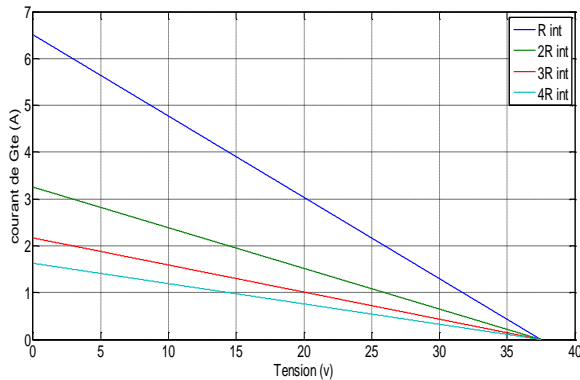
Fig. III.17 : Caractéristique puissance-tension d'un module TE Pour différentes valeurs de gradient de température



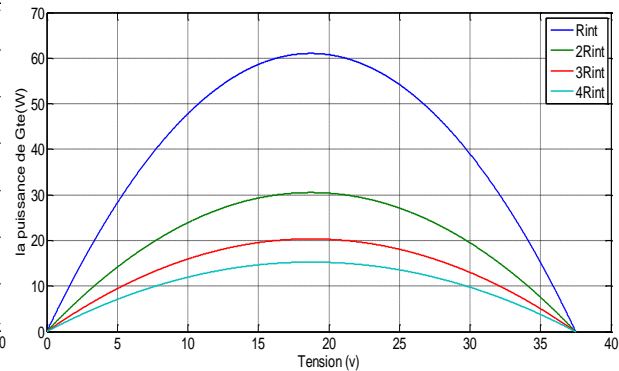
On observe que lorsque la température augmente, la tension du circuit ouvert augmente considérablement alors que le courant du court-circuit augmente. Donc, il est évident que, plus le gradient de température augmente, plus la puissance de la cellule augmente.

### III.6.3 Influence de la résistance interne

En faisant varier la résistance parallèle  $R_{int}$  de 1 jusqu'à 4 fois, on constate que la puissance au point de fonctionnement optimal diminue lorsque la résistance  $R_{int}$  augmente.



**Fig. III.18** : Influence de la résistance interne sur la caractéristique  $I=f(V)$  d'un générateur Thermoélectrique.



**Fig. III.19** : Influence de la résistance interne sur la caractéristique  $P=f(V)$  d'un générateur Thermoélectrique.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement des cellules TE et leur modèle mathématique en se basant sur un circuit électrique simple équivalent constitué d'une source de courant. Ainsi, le GTE a été défini comme un ensemble constitué de cellules TE, puis nous avons établi son modèle mathématique. Nous avons constaté que le fonctionnement du GTE dépend fortement des conditions climatiques (gradient de la température) et les paramètres internes (la résistance parallèle interne).

**Chapitre IV :**

**Recherche du Point de Puissance**

**Maximum MPPT**

## Introduction

La synthèse des différents comportements d'un générateur solaire GS (photovoltaïque, thermoélectrique) dans les chapitres II et III, montre que dans la plupart des cas, cette source n'est pas correctement adaptée à une charge électrique. Généralement un étage d'adaptation, comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques, permet de transformer les grandeurs électriques continues en grandeurs adaptées à la charge. Cet étage peut être commandé par une ou plusieurs lois de commande afin de maximiser la puissance produite par le générateur.

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GS de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximums ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ). Pour cela, plusieurs systèmes ont été publiés dans la littérature. Nous avons fait un classement en fonction de leur principe et de leur performance et implantation. Ainsi, nous avons pu constater que malgré la quantité d'études menées dans ce domaine, beaucoup présentaient des imperfections.

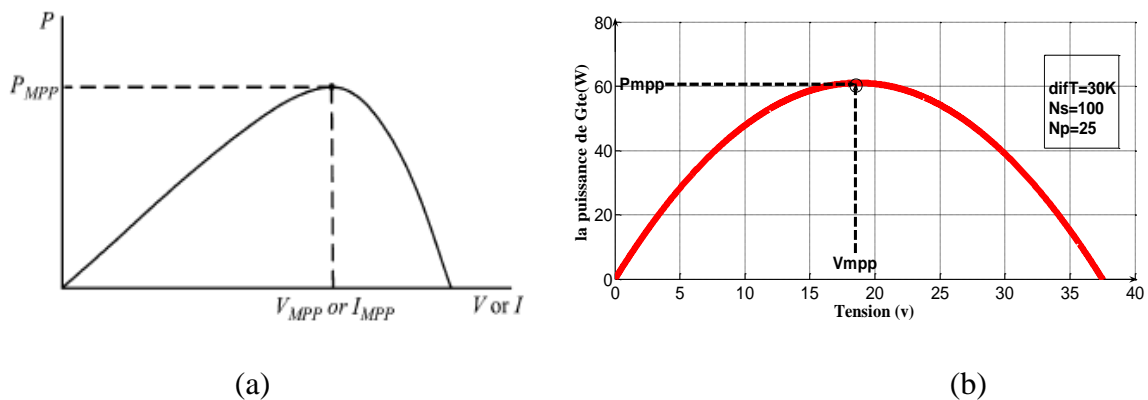
Cette commande spécifique doivent amener le GS à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni qu'on sache à quel moment ils ont été modifiés (changement aléatoire). (Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglais MPPT). Donc la MPPT est une recherche du point de puissance maximal PPM tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT, plus ou moins performantes, basées sur les propriétés du GS.

Dans ce chapitre, on va présenter le concept général de la commande MPPT par deux algorithmes *Perturb&Observ (P&O)* et *Incrément de conductance (INC)*, et l'application de cette commande sur le système solaire thermoélectrique et photovoltaïque. En premier lieu, nous introduisons les notions générales de la commande MPPT. Ensuite on décrit le système GS avec les différents convertisseurs utilisés et nous présentons l'application de cette technique à GS. Deux algorithmes sont implantés *Perturb&Observ (P&O)* et *Incrément de conductance (INC)*.

Enfin, pour terminer ce chapitre, une étude sur la robustesse des régulateurs « MPPT INC et MPPT P&O » sera réalisée par variation des paramètres électriques et des conditions climatiques de système.

#### IV.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale (figure IV.1). 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'une générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur.



**Fig. IV.1** : Courbe caractéristique de puissance d'un GS : a) GPV, b) GTE

Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). La figure IV.2 représente une chaîne élémentaire de conversion solaire élémentaire associée à une commande MPPT.

Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, dans le cas de la conversion solaire.

L'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GS corresponde à la puissance maximale ( $P_{max}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [22, 23, 24].

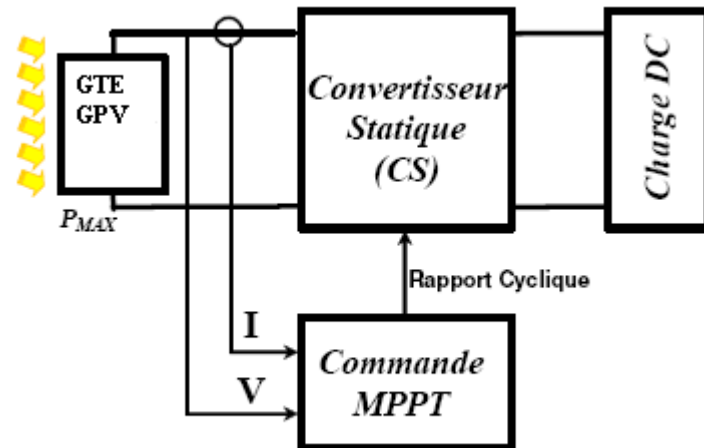


Figure VI.2 : Schéma de principe du convertisseur MPPT

#### IV.2 Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque, ils sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure IV.3), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

La figure (IV.3) rappelle le schéma de principe d'un convertisseur DC-DC.

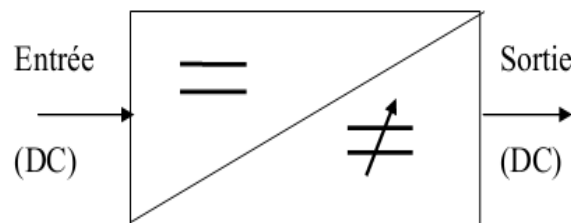


Fig. IV.3 : Schéma de principe du hacheur.

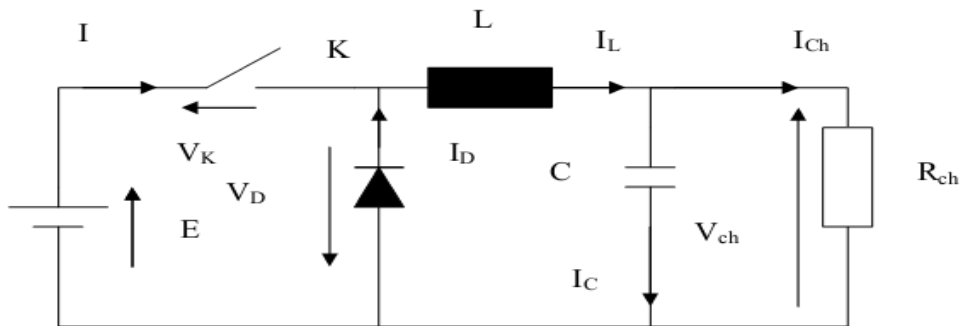
Il existe plusieurs types des Hacheurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes Charges [26].

**IV.2.1 Hacheur série**

Le Hacheur série peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur dévolteur, ou hacheur abaisseur.

Le schéma de base de ce type figure (IV.4) ici le Switch est en série, la diode est en parallèle et la self est toujours en série. La capacité de sortie C sert à stabiliser la tension de sortie.

Son application est un convertisseur statique qui convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $\alpha = \frac{V_{ch}}{E}$  change avec le rapport cyclique du commutateur [27].

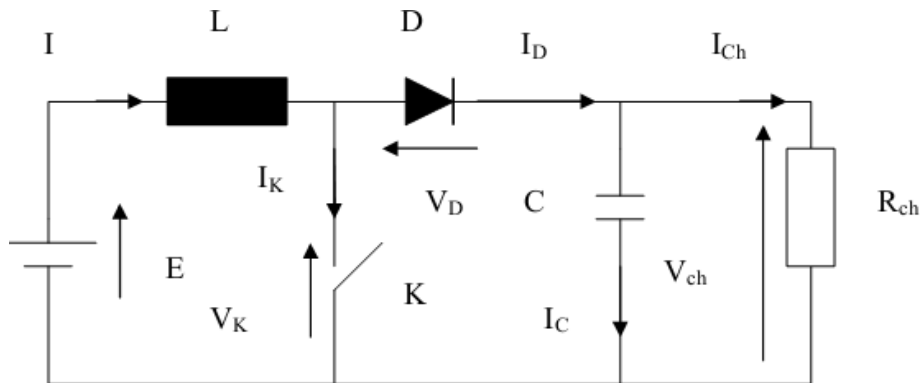


**Fig .IV.4 :** Schéma de principe d'un hacheur série

**IV.2.2 Hacheur parallèle**

Ce dernier est un convertisseur parallèle, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur survolteur; son schéma de principe de base est celui de la figure (IV.5).

Son application est un convertisseur statique qui convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur où le rapport de conversion  $\frac{1}{1-\alpha} = \frac{V_{ch}}{E}$  change avec le rapport cyclique du commutateur [28].



**Fig. IV.5 :** Schéma de principe d'un hacheur

IV.2.3 Hacheur série-parallèle

La configuration en buck - boost se rapproche du buck mais ici, la diode et la self sont inversées et la diode est mise dans l'autre sens.

Quand k est fermé on charge toujours la self et lorsque ce switch s'ouvre, la self tire le courant à travers la diode D [27].

Où le rapport de conversion  $\frac{-\alpha}{1-\alpha} = \frac{V_{ch}}{E}$  change avec le rapport cyclique du commutateur

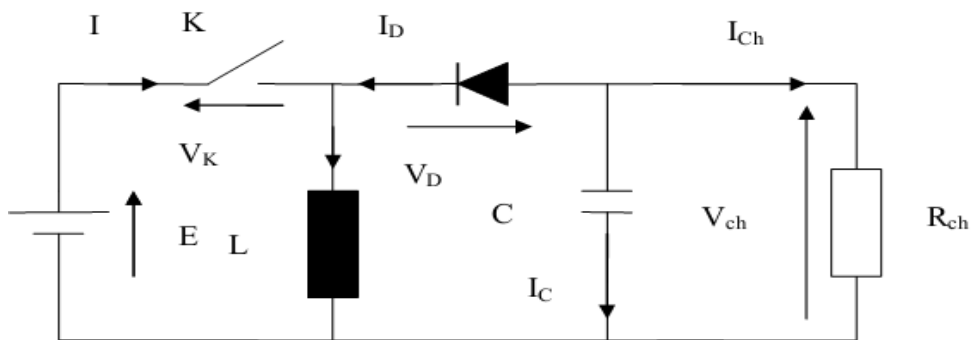


Fig .IV.6 : Schéma de principe d'un hacheur série- parallèle

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).

Le tableau IV.1 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques [29].

Tableau. IV.1 : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de ( $\alpha$ )
Buck	$\alpha$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$
Buck-Boost	$\frac{-\alpha}{1-\alpha}$

Pour assurer le fonctionnement optimal du GPV, un équipement de commande doit être mis entre le GPV et la charge, dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de GPV, nous utilisons pour cela un convertisseur DC-DC (hacheur) muni d'une commande MPPT, ce qu'on appelle poursuite de point de puissance maximale [10].

### IV.3. Hacheur survolteur

#### IV.3.1 Principe et modélisation

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension, abaisseur de courant. Le schéma ci-dessous représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps  $DT_s$ , le transistor  $S$  est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Le transistor s'ouvre et l'inductance  $L$  délivre le courant  $I_L$  et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge  $Z$  à travers la diode  $D$ .

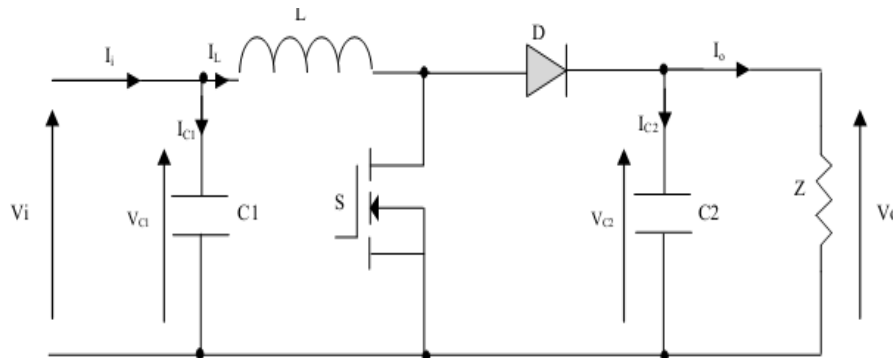


Fig .IV.7 : Circuit électrique du hacheur Boost

##### IV.3.1.1 Modèle mathématique équivalente

Pour obtenir le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement ( $S$  fermé, et  $S$  ouvert). Les figures (IV.10, IV.11) donnent les équations suivantes :

Pour la première période  $\alpha T$  :



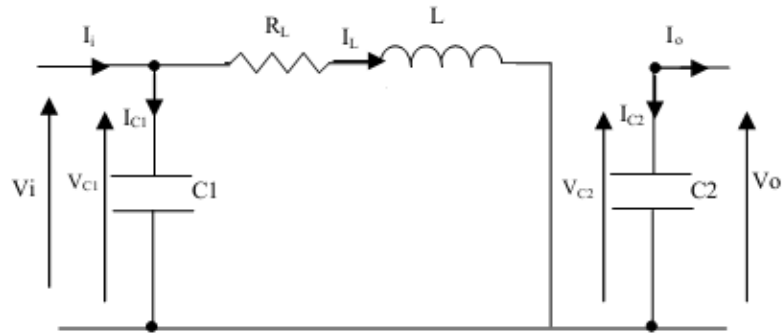


Fig. IV.8 : Circuit équivalent du Boost lorsque S fermé.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = c_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = c_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = -v_i \end{array} \right. \quad (IV.1)$$

Pour la deuxième période  $(1 - \alpha)T$

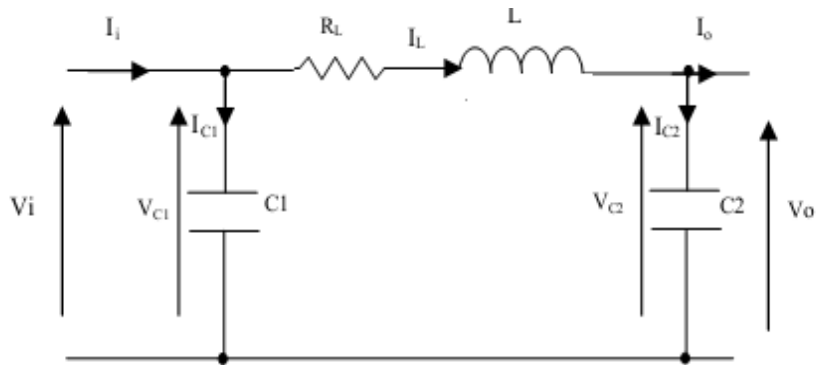


Fig. IV.9 : Circuit équivalent du Boost lorsque S ouvert.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = c_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_L \\ i_{c2} = c_2 \frac{dv_o}{dt} = i_L - i_o \\ v_L = L \frac{di_L}{dt} = v_i - v_o \end{array} \right. \quad (IV.2)$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, on obtient la modélisation dynamique du Boost :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L = i_i - c_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1 - \alpha)i_L - c_2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = (1 - \alpha)v_o + L \frac{di_L}{dt} \end{array} \right. \quad (IV.3)$$

### IV.3 .1.2 Conception d'un hacheur Boost

Les valeurs des composants à choisir sont calculées comme suit:

$$L = \frac{v_i \cdot \alpha}{f \cdot \Delta i_L} \quad (IV.4)$$

$$C_2 = \frac{v_i \cdot \alpha}{f \cdot R_{ch} \cdot \Delta v_o (1 - \alpha)} \quad (IV.5)$$

$$C_1 = \frac{i_i - i_L}{2 \cdot \Delta v_i} \quad (IV.6)$$

## IV.4 Stratégie de recherche du point de fonctionnement optimale

La définition mathématique de l'optimum d'une fonction est le point par lequel sa dérivée par rapport à une variable donnée s'annule. Tous les algorithmes de calcul du point de puissance maximum consultés se basent sur ce principe.

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque .Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire

une évaluation comparative. Seuls les algorithmes qui nous semblent décrire une méthode de recherche spécifique sont reportés dans ce manuscrit et brièvement analysés.

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Dans notre travail on s'intéresse par deux méthodes *Perturb & Observ (P&O)*, *Incrémentation de la Conductance (INC)* nous rappelons brièvement les principes de ces méthodes

#### IV.4.1 Algorithme perturbation et observation (P&O)

La méthode de P&O est une approche largement répandue dans le domaine des techniques *MPPT*, due à sa simplicité. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du GS et son courant de sortie. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne par la perturbation de la tension  $V$  du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance du GS.

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{GS}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{GS}$ , comme l'illustre la figure (IV.10) dans le cas de GPV, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{GS}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{GS}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du *PPM*.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le *PPM*. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{GS} = f(V_{GS})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au *PPM*, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance GS augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

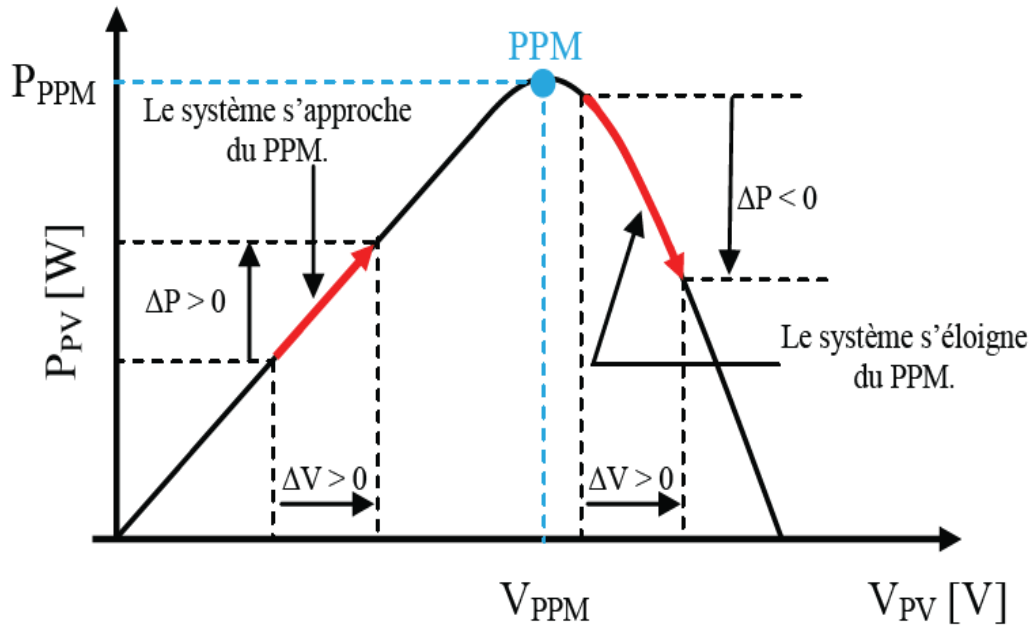


Fig. IV.10 : Caractéristique  $P_{GS}(V_{GS})$  d'un panneau solaire GPV.

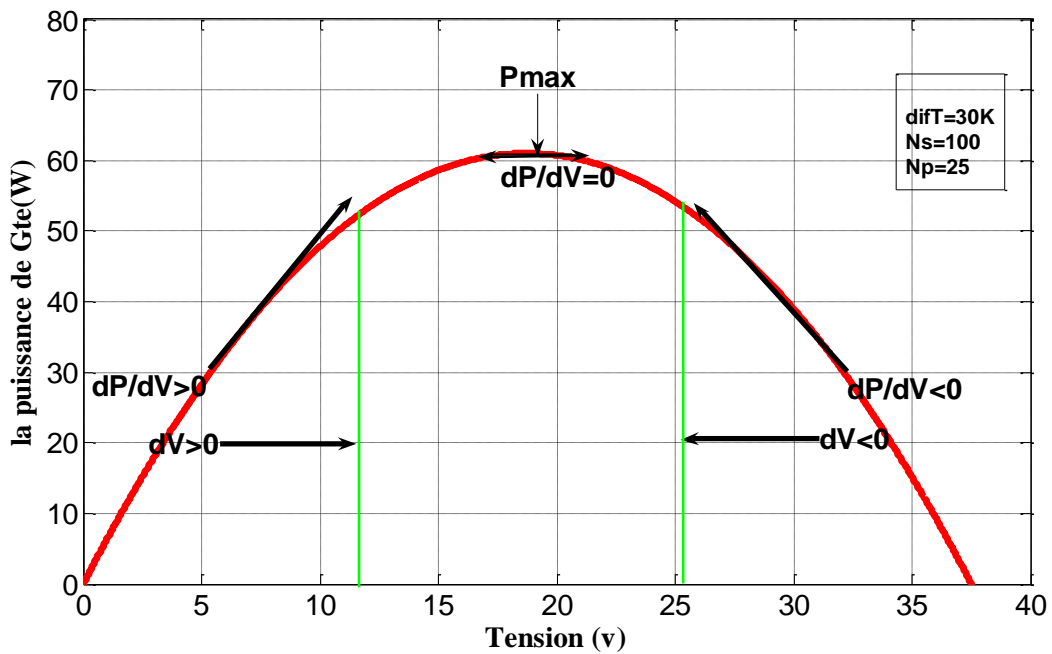
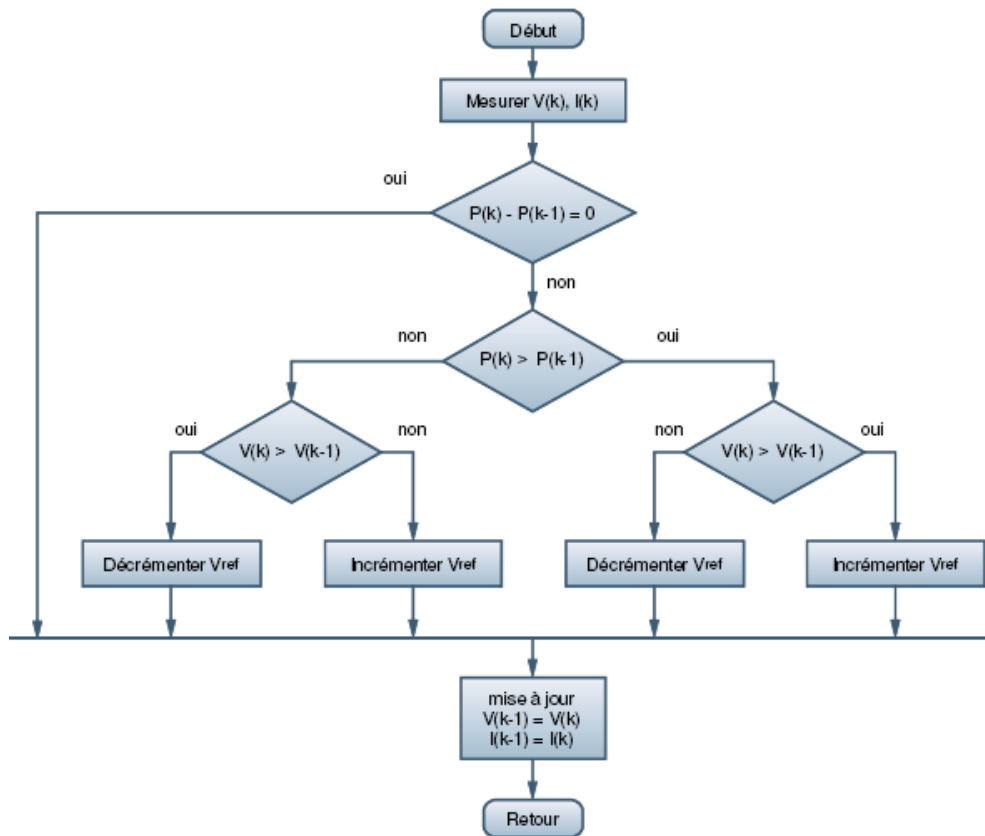


Fig. IV.11 : Caractéristique  $P_{GS}(V_{GS})$  d'un panneau solaire GTE.

La figure (IV.12) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type  $P\&O$ , où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.



**Fig IV.12 :** Algorithme type de la méthode P&O

Si plus généralement, on désire suivre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation, (P&O).

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence ( $V_{ref}$ ), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

#### IV.4.2 Algorithme 'incrémental conductance' (INC)

Dans cet algorithme, on calcul la dérivée de la puissance de sortie du panneau. Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite du point MPP [31 ,32 ,36].

La puissance du GS (GPV, GTE) est :  $P = VI$  (IV.7)

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0 \dots\dots P = P_{\max} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \dots\dots P < P_{\max} \\ \frac{dP}{dV} > 0 \dots\dots P > P_{\max} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

La dérivée partielle  $\frac{dP}{dV}$  est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{IV.9})$$

Alors, l'équation (IV.9) peut être écrite comme suit

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \dots\dots P = P_{\max} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} 0 \dots\dots P < P_{\max} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \dots\dots P > P_{\max} \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ( $G = I/V$ ) à l'incrément de la conductance ( $\Delta G = \Delta I / \Delta V$ ), comme le montre l'organigramme de la figure (IV.16)  $V_{ref}$  est la tension de référence pour laquelle le panneau GS est forcé à fonctionner. Au MPP,  $V_{ref} = V_{MPPT}$  Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans  $\Delta I$  est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue  $V_{ref}$  pour suivre le nouveau MPP.

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme INC pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape.

Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  sur le courant de court-circuit  $I_{cc}$ .

Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux.

Une manière moins évidente pour effectuer la méthode INC est d'utiliser conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur [31,36].

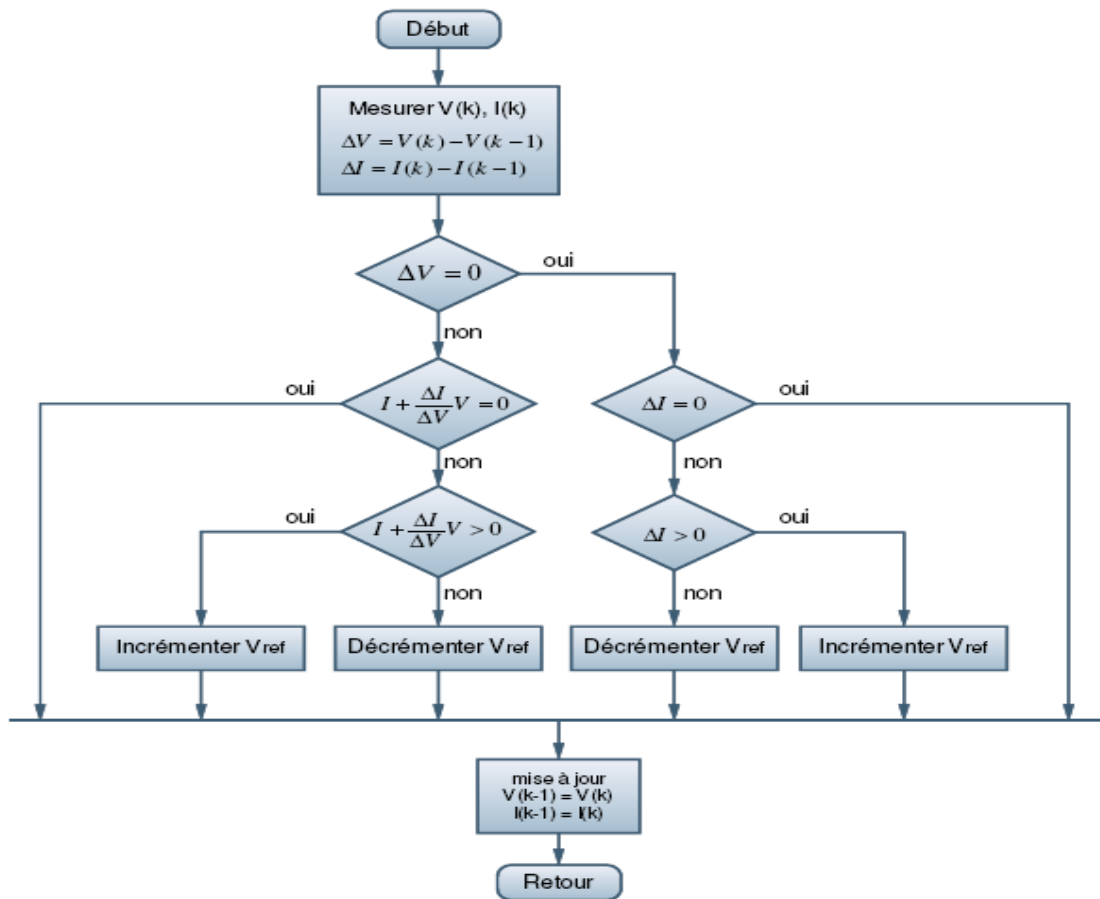


Fig .IV.13 : Algorithme type de la méthode INC

#### IV.4.3 Autres méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer :

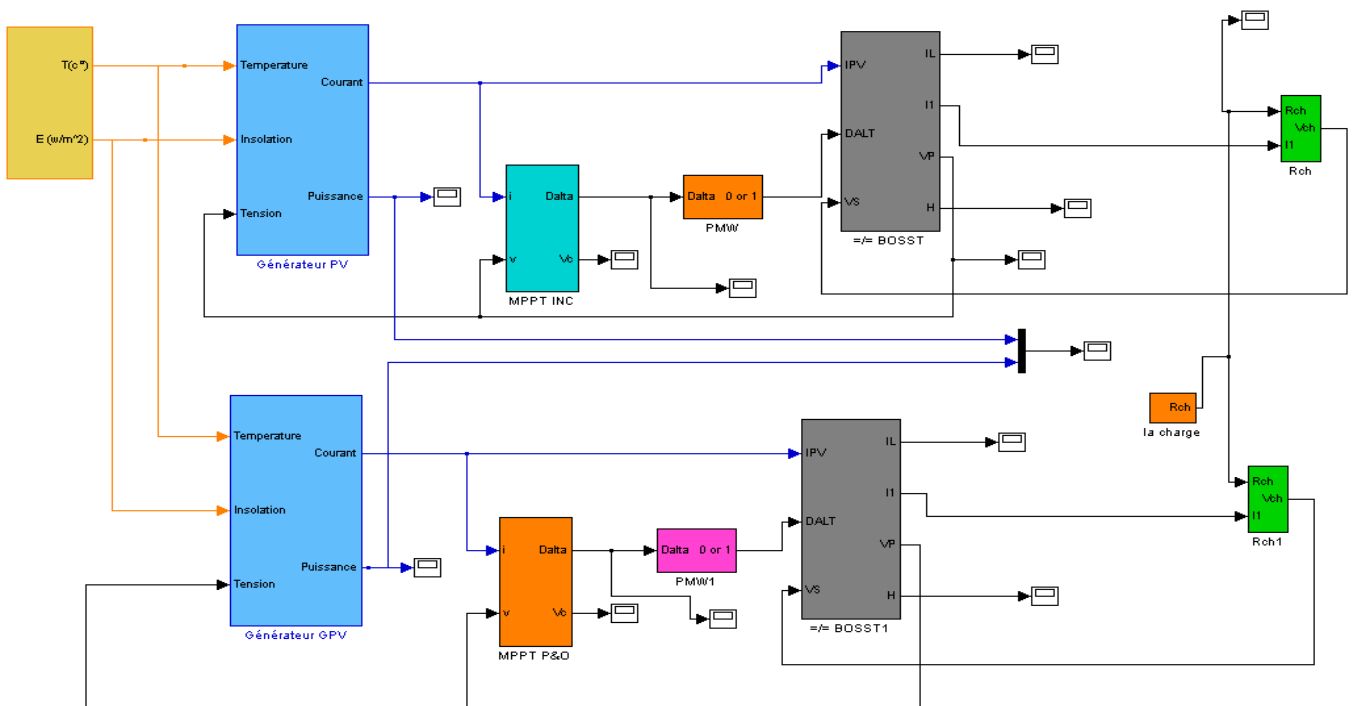
- les algorithmes basés sur la logique floue [36,37,38,39].
- les algorithmes à base de réseau de neurones [36].
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP [40].
- Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance) [32].
- la méthode de 'oscillation forcée' [31,35].

#### IV.4.4 Critères de Qualité d'une Commande MPPT

Pour savoir si un gain est apporté par l'utilisation d'une commande MPPT d'un type ou d'un autre, des critères de qualité sont utilisés. Dans un premier temps, la commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et un coût raisonnable. De plus, concernant ses performances, la commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique et en statique pour assurer une adaptation rapide aux changements climatiques. Elle doit aussi pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GS soit le plus près possible du MPP dans n'importe quelle condition météorologique ou état de la charge alimentée. Aussi, la stabilité et la robustesse du système doit être assurée.

En résumé, l'utilisation d'un type de commande MPPT par rapport à une connexion directe doit apporter un gain énergétique et économique quantifiable. Il est important de préciser qu'il n'existe pas de standard international qui définisse comment il faut mesurer les performances d'une commande MPPT [34].

Les figures ( IV.14 et IV.15) montre les modelés simulink pour la comparaison des algorithmes pour les deux systèmes GTE et GPV.



**Fig. IV.14** Modèle de simulation du GPV adapte par les deux techniques MPPT (P&O) et MPPT(INC).



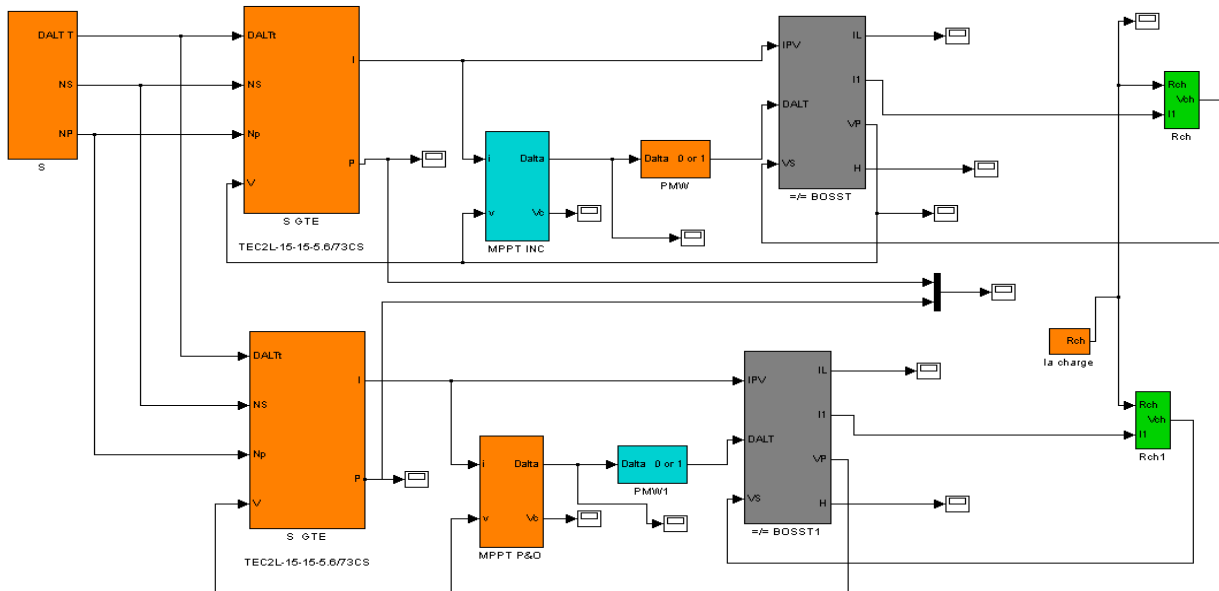


Fig. IV.15 Modèle de simulation du GTE adapte par les deux techniques MPPT (P&O) et MPPT(INC).

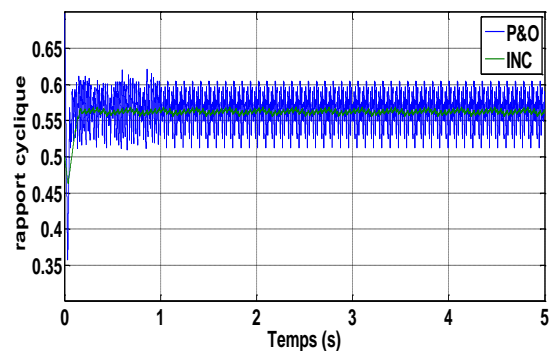
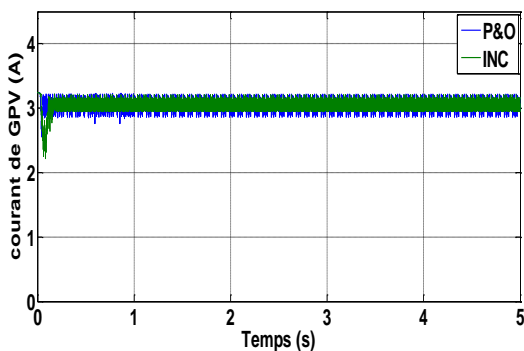
### IV.5 Résultats de simulation

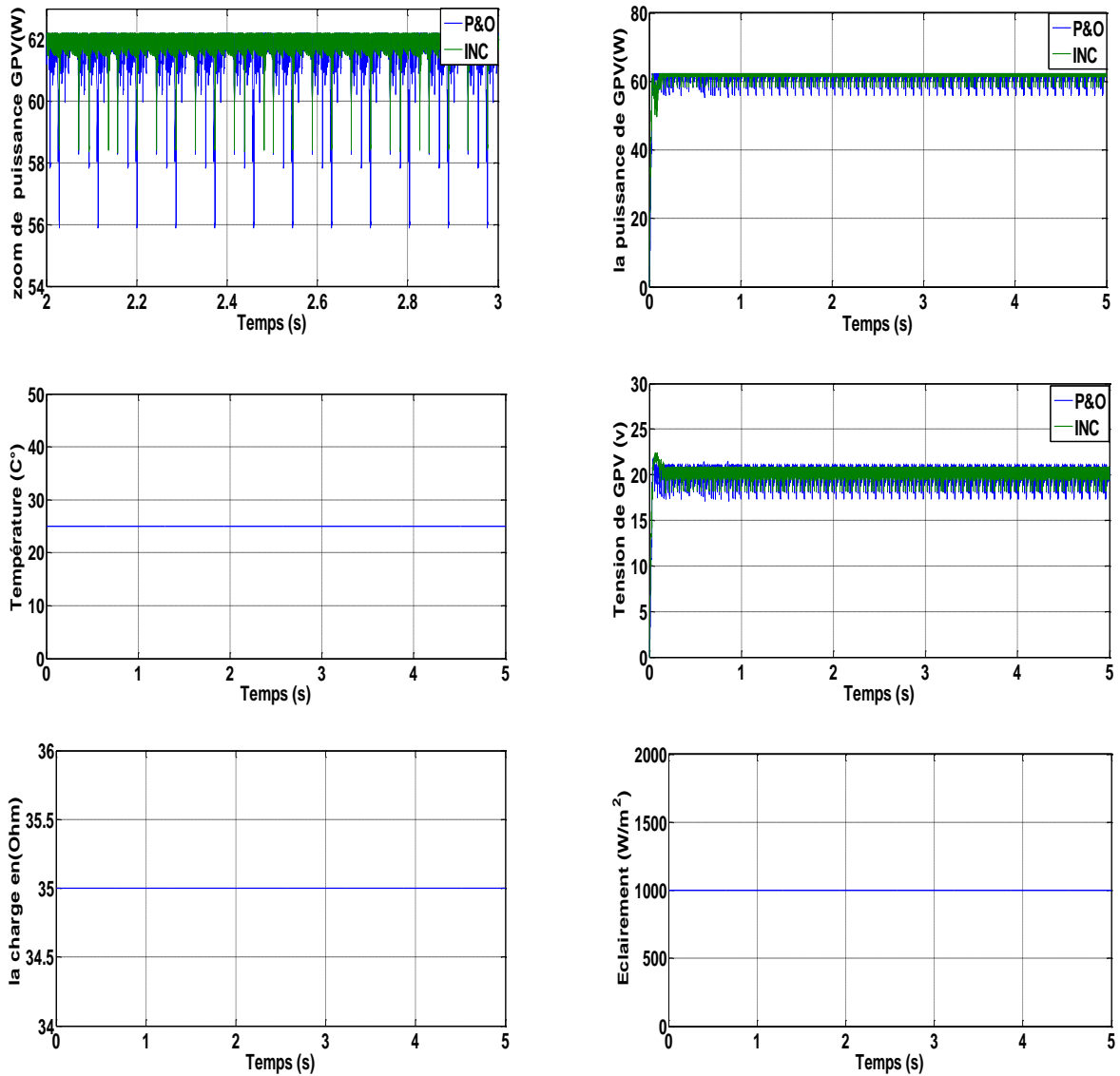
Nous avons utilisé un module solaire contenant 36 cellules en série, et une résistance comme une charge.

#### IV.5.1 Test de performance

Pour faire une étude des performances des deux algorithmes : MPPT (celles dites méthode de P&O et INC) et voir la différence entre eux. Nous avons effectué un test où les deux systèmes subissent les mêmes conditions environnementales standard.

##### IV.5.1.1 Résultats de Simulation pour GPV

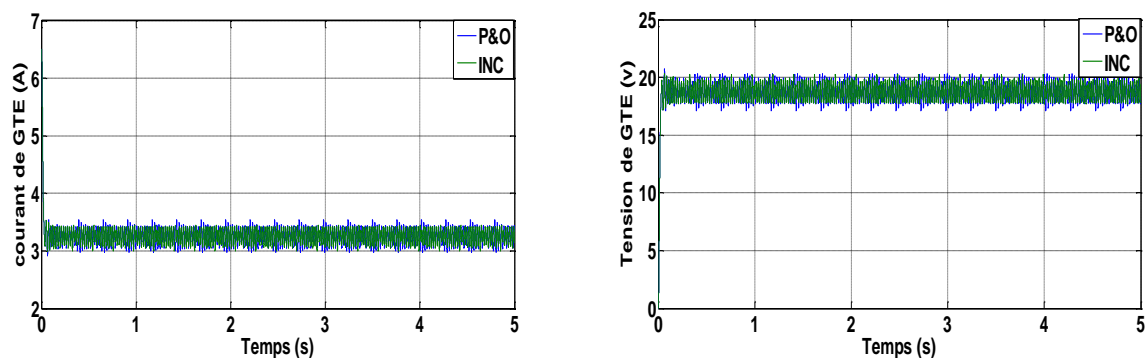


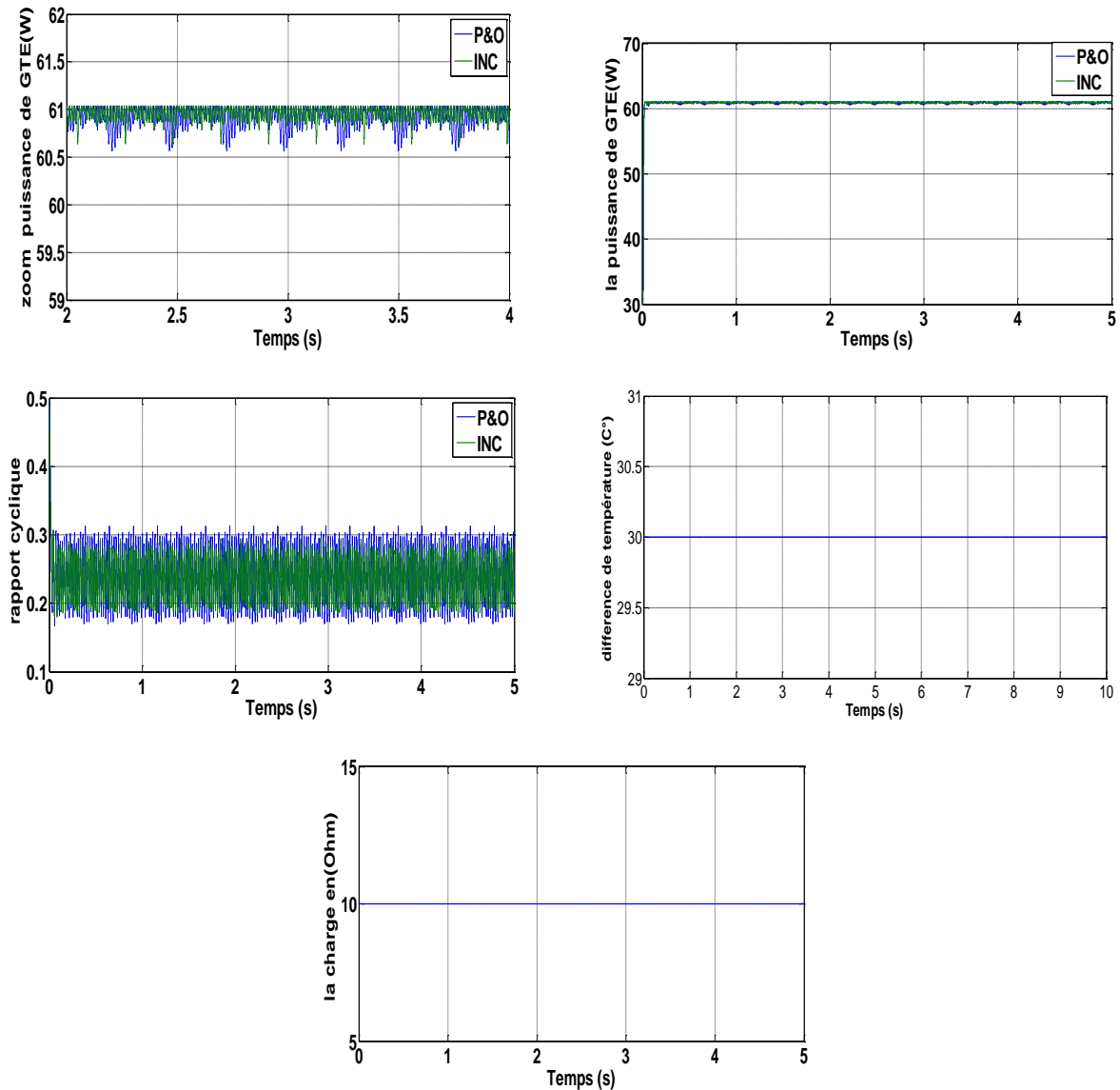


**Fig.IV.16:** Réponses des commandes MPPT INC et MPPT P&O pour des conditions environnementales standard avec un pas de tension égal  $dV = 0.001V$ .

#### IV.5 .1.2 Résultats de Simulation pour GTE

Nous avons utilisé un module solaire thermoélectrique contenant  $N_s = 100$  \*  $N_p = 25$  cellules associé en mixte et une résistance comme une charge.





**Fig.IV.17** : Réponses des commandes MPPT INC et MPPT P&O pour des conditions environnementales standard avec un pas de tension égal  $dV= 0.001V$ .

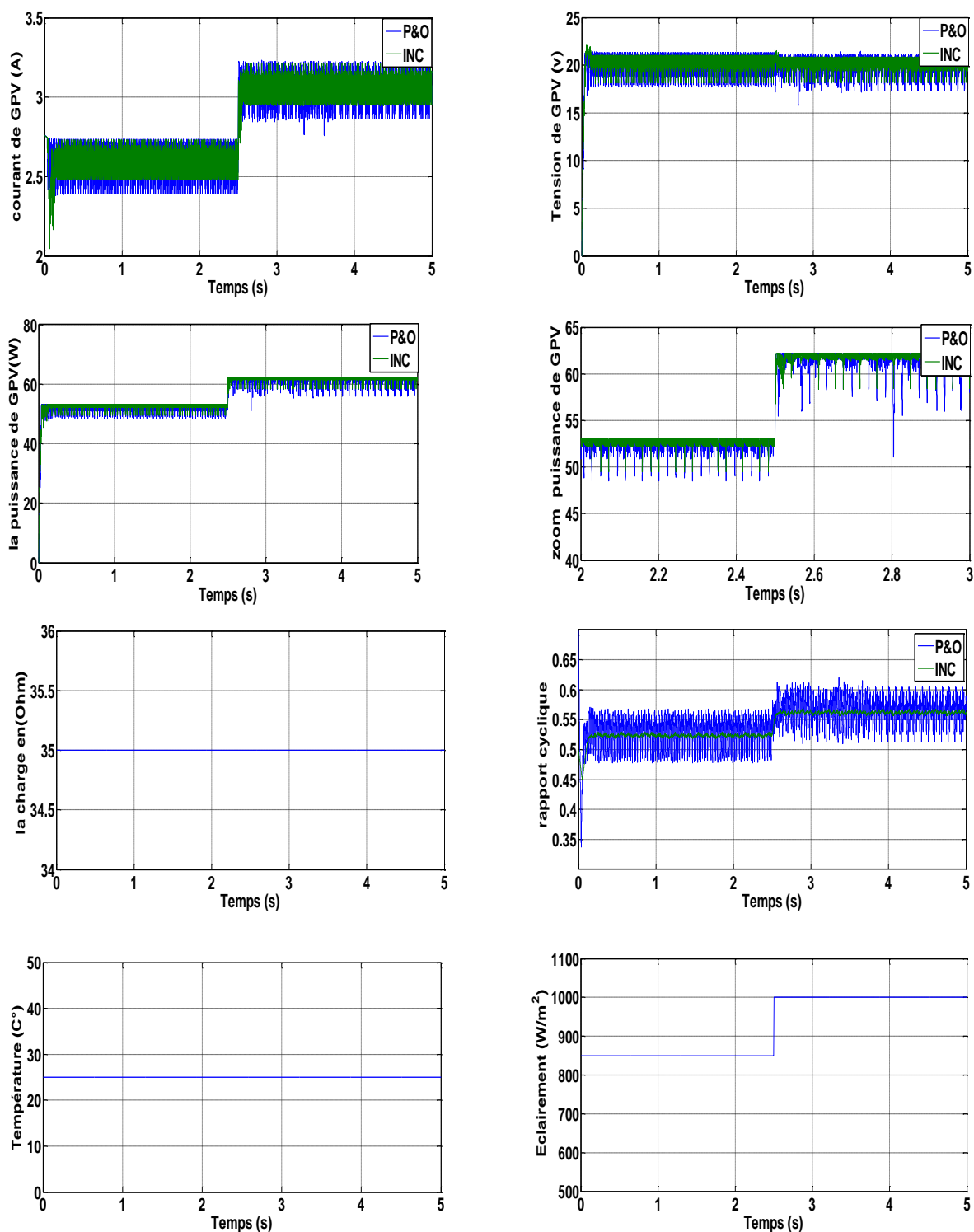
Les figures (IV.16) et (IV.17) nous montre la différence entre les deux algorithmes concernant la réponse dynamique avec des conditions environnementales standard appliquées sur le GS (GTE et GPV). L'algorithme INC est plus rapide que celui P&O et moins perturbé pour un pas de tension égal  $dV= 0.001 V$ .

#### IV.5.2 Etude de la robustesse des MPPT INC et P&O applique sur GPV

Afin de valider le fonctionnement des algorithmes MPPT sur le GPV, on procède par l'introduction des variations sur les différentes grandeurs intervenantes sur le fonctionnement de MPPT avec un pas de tension égal  $dV= 0.001V$ . Pour cela, nous avons introduit des échelons pour quelques grandeurs à instant  $t=2.5s$ .

## IV.5.2.1 Variation d'ensoleillement

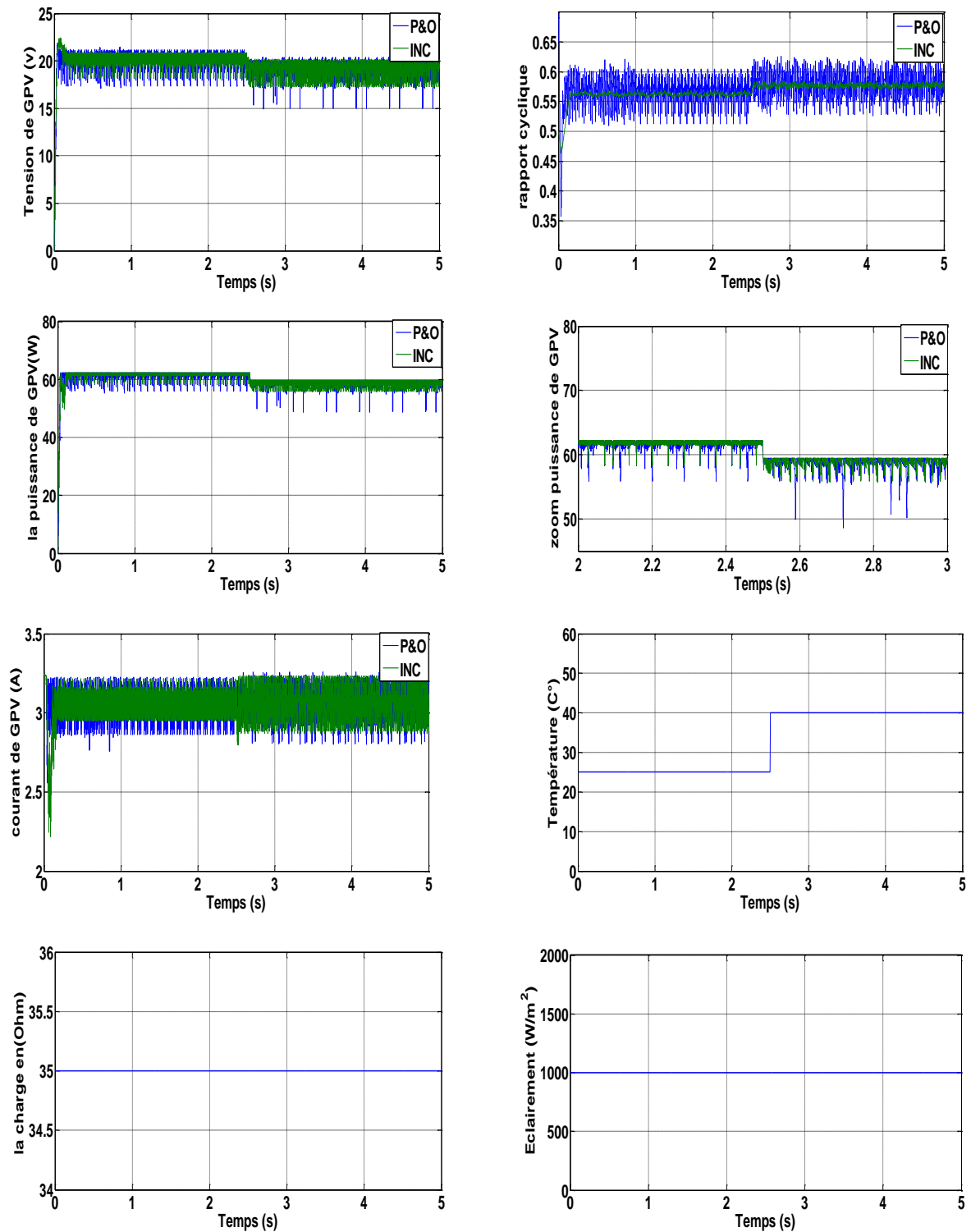
On suppose une augmentation de l'éclairement de  $850$  à  $1000 \text{ w/m}^2$  à instant  $t=2.5 \text{ s}$ . Les résultats de la simulation sont représentés sur la figure (IV.18)



**Fig.IV.18 :** Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation d'ensoleillement avec une température constante et charge constante.

## IV.5.2.2 Variation de la température

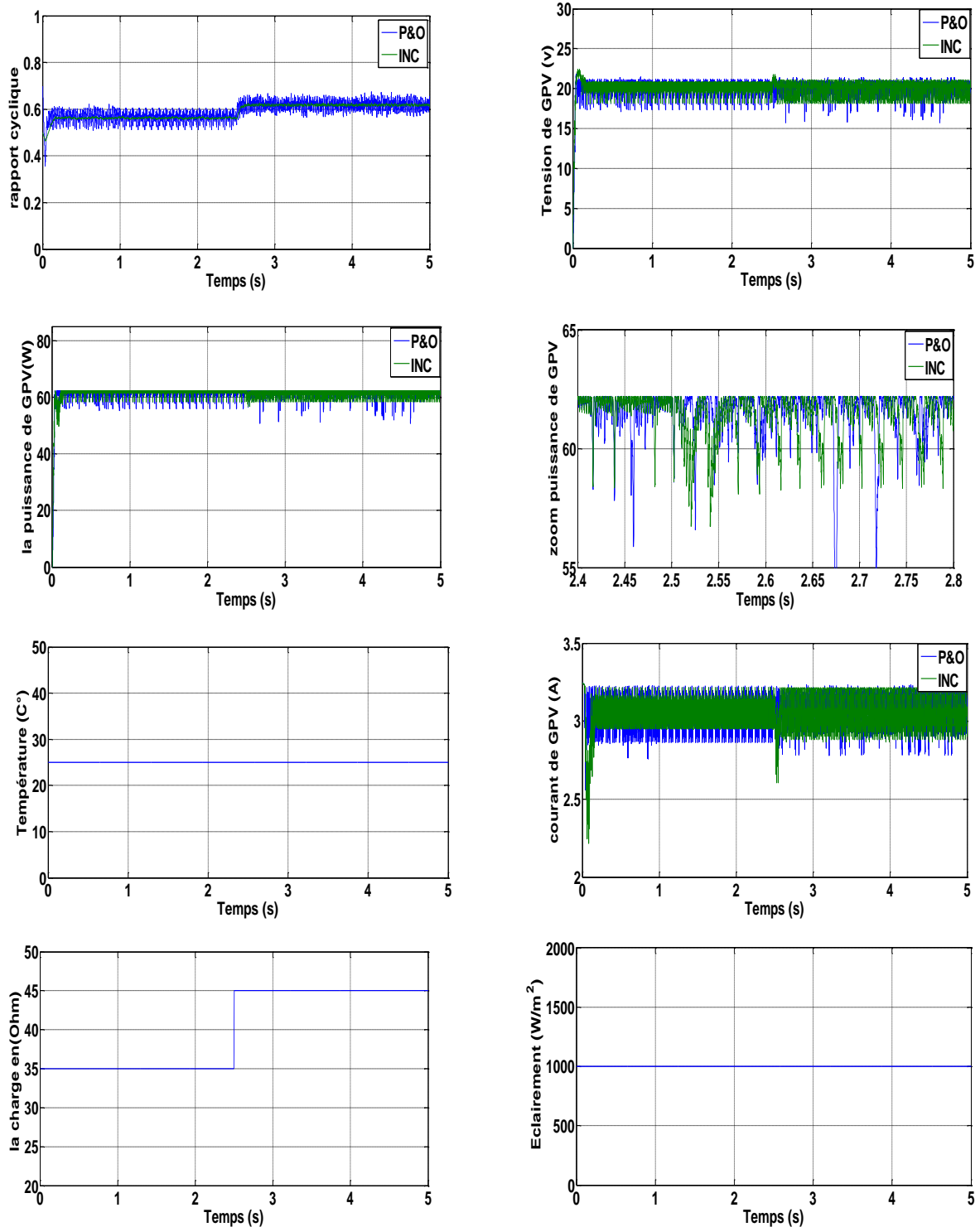
On suppose une augmentation de la température de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $40^{\circ}\text{C}$  à instant  $t = 2.5$  s, les résultats de simulation sont représentés sur la figure (IV.19)



**Fig.IV.19 :** Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de la température de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $40^{\circ}\text{C}$  avec un ensoleillement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$

## IV.5.2.3. Variation de la charge

On suppose une augmentation de la charge de  $35$  à  $45\text{Ohm}$  à instant  $t = 2.5\text{s}$ , les résultats de simulation sont représentés sur la figure (IV.20)



**Fig.IV.20 :** Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de la charge  $35$  à  $45\text{Ohm}$  avec un ensoleillement de  $1000\text{W/m}^2$  et température de  $25^\circ\text{C}$

## IV.5.2.4 Variation de la charge, d'enseillement et de la température

Et enfin, on soumit les deux algorithmes MPPT à un changement de différentes paramètres : la température, l'éclairement solaire et la charge au même temps, Les résultats de simulation sont représentés sur la figure (IV.21).

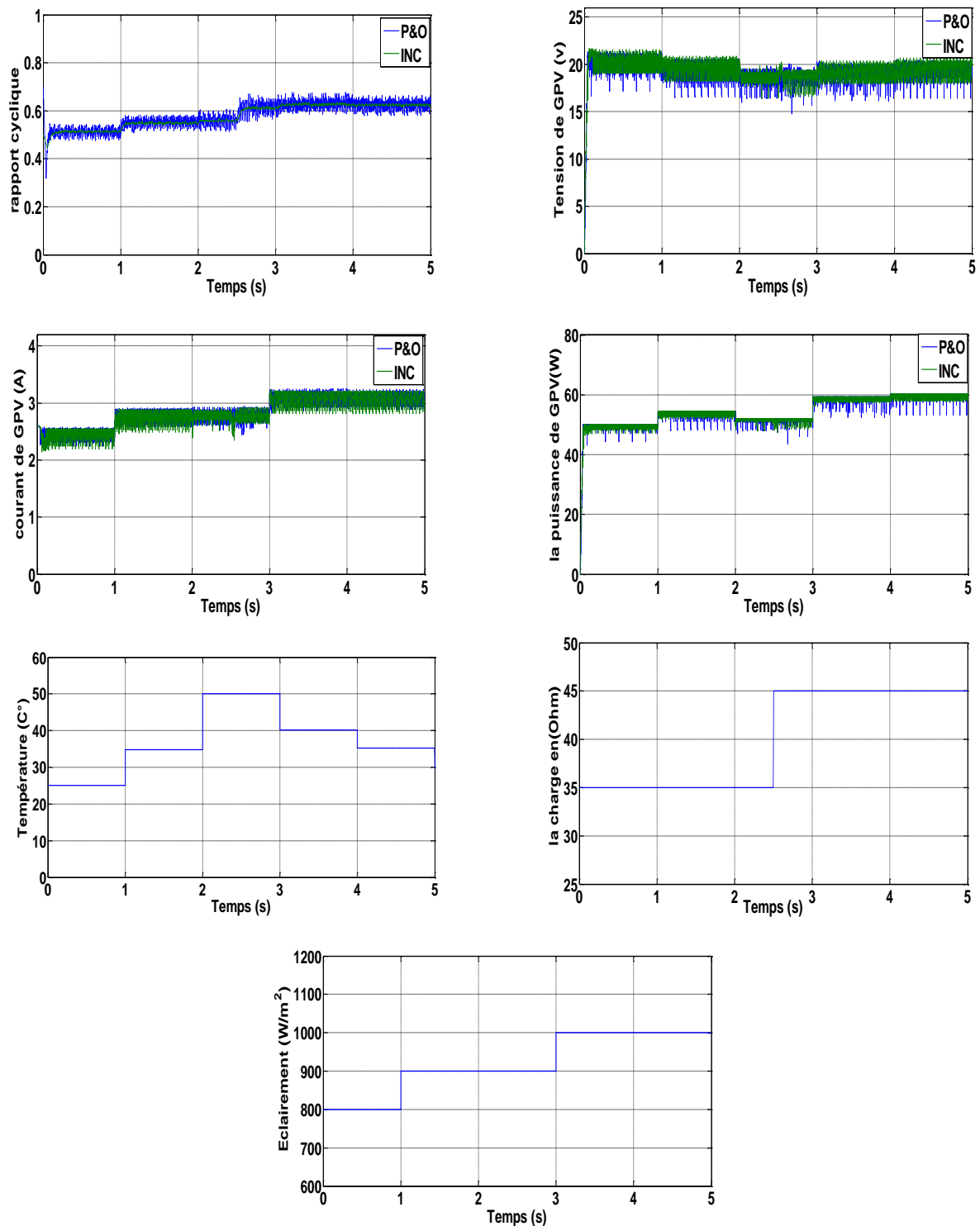


Fig.IV.21 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation d'enseillement, de la température et de la charge.

### IV.5.3. Interprétation des résultats de GPV

La figure (IV.18), montre l'effet d'augmentation de la puissance, causée par une augmentation de l'ensoleillement, ce qui engendre une déviation du point de puissance maximale MPP pour les deux algorithmes avec d'augmentation de courant et de tension ainsi que le rapport cyclique. Une fois l'ensoleillement se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité avec moins de perturbation pour MPPT INC.

La figure (IV.19), montre que l'augmentation de la température implique une diminution de la puissance maximale pour les deux algorithmes avec diminution de tension ainsi que le rapport cyclique, ce qui provoque un déplacement du point de puissance maximale. Une fois la température se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité.

On constate aussi que, dans La figure (IV.20), malgré le changement de la charge, les deux algorithmes MPPT a conservé les valeurs optimales de la puissance du GPV avec d'augmentation de rapport cyclique, donc un bon rendement par rapport à un GPV sans MPPT.

La figure (IV.21) montre les performance de deux algorithmes dans le cas de variation de toutes les conditions climatiques et de la charge Les résultats obtenus par cet essai montrent la bonne poursuite des deux algorithmes mais avec une rapidité et une stabilité plus élevées et moins perturbation en qualité des réponses pour le contrôleur MPPT INC par rapport au contrôleur MPPT P&O.

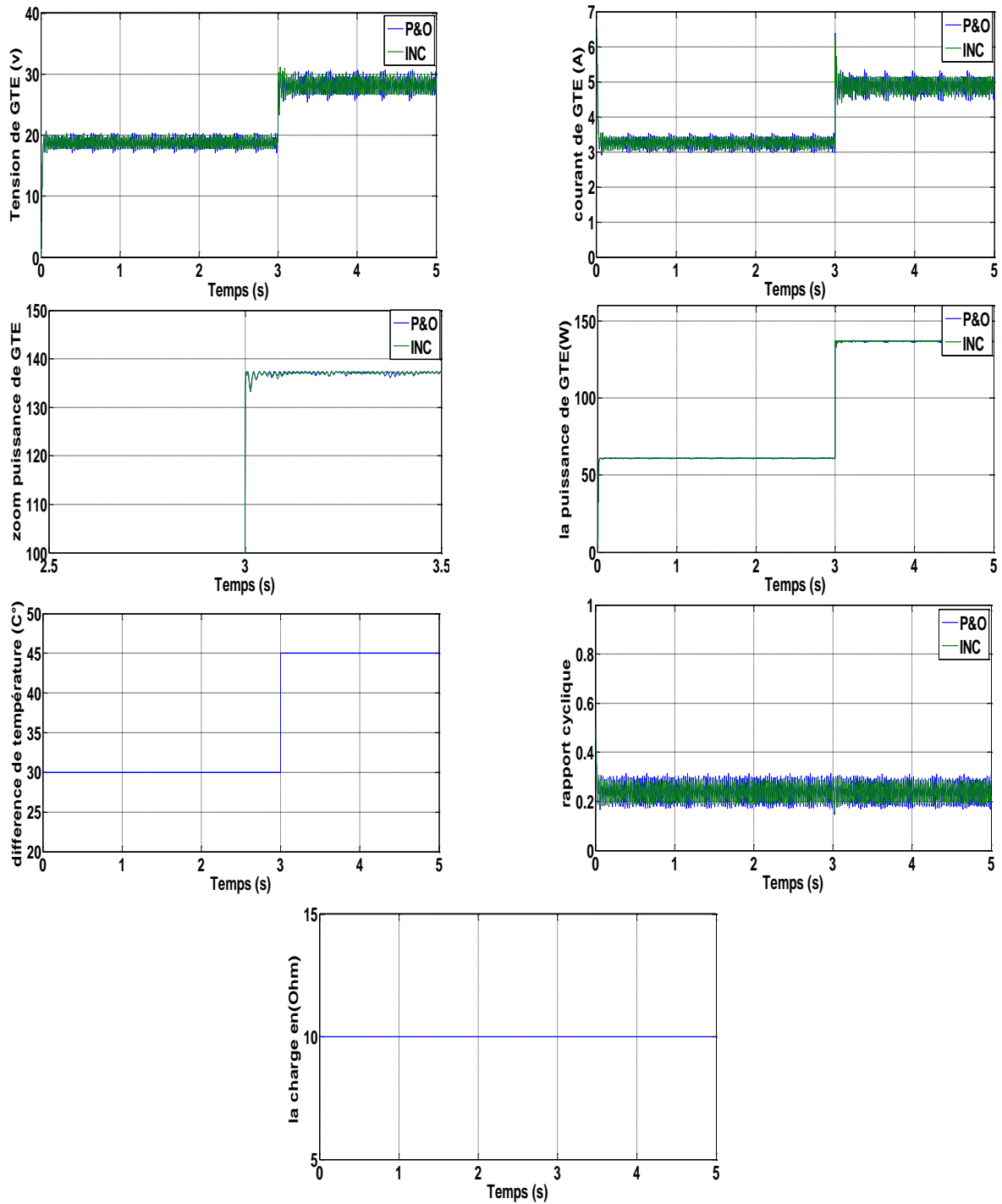
### IV.5.4 Etude de la robustesse des MPPT INC et P&O appliquée sur GTE

Afin de valider le fonctionnement des algorithmes MPPT appliquée sur le GTE, on procède par l'introduction des variations sur les différentes grandeurs intervenantes sur le fonctionnement de MPPT avec un pas de tension égal  $dV = 0.001V$ . Pour cela, nous avons introduit des échelons pour quelques grandeurs.

#### IV.5.4.1 Variation de Gradient de la Température

On suppose une augmentation de gradient de la température de  $30^{\circ}C$  à  $45^{\circ}C$  à instant  $t = 3$  s, les résultats de simulation sont représentés sur la figure (IV.22)

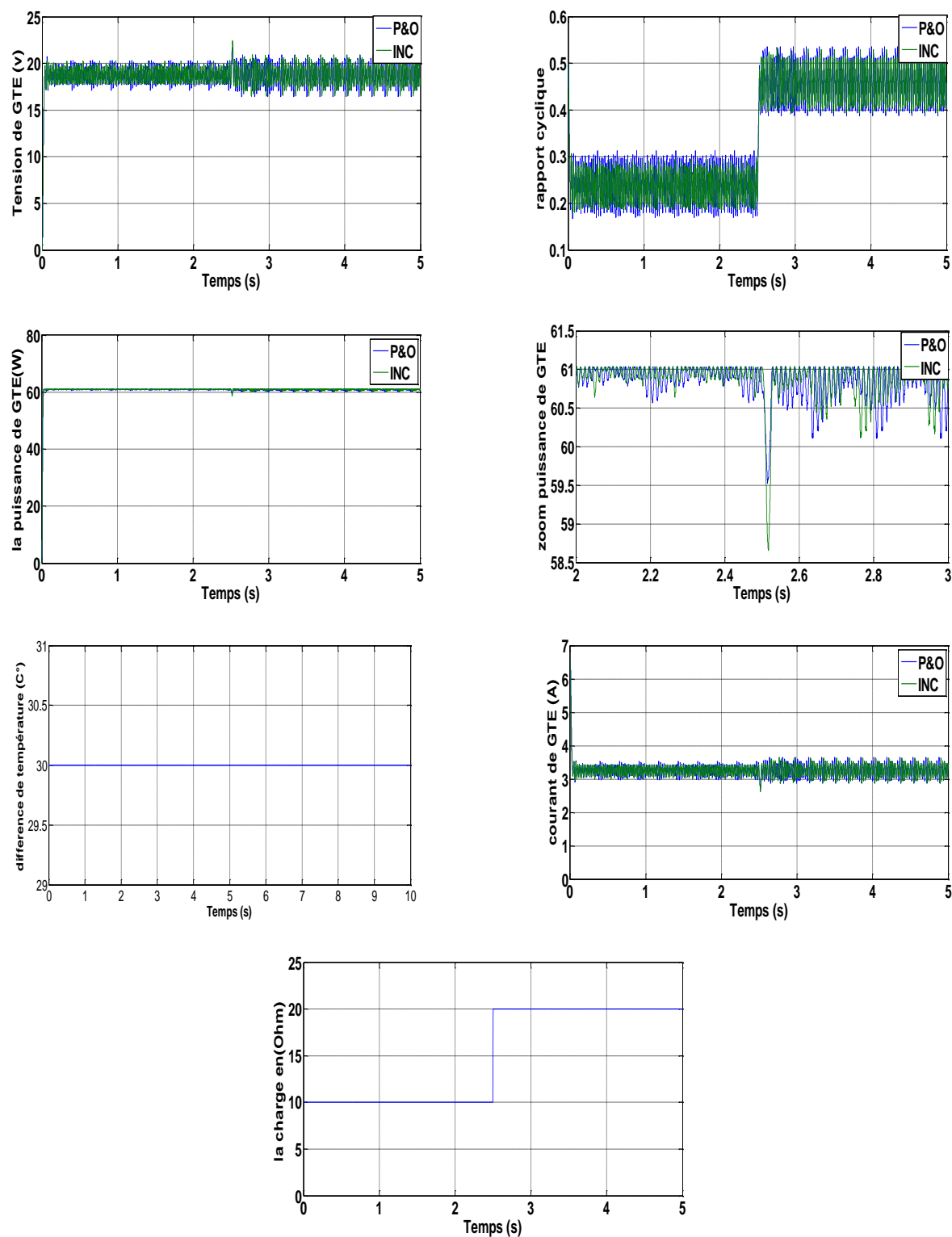




**Fig.IV.22 :** Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de gradient de la température de 30°C à 40°C avec une charge constante.

#### IV.5.4.2 Variation de la charge.

On suppose une augmentation de la charge de 10 à 20 Ohm entre à instant  $t = 2.5s$ , les résultats de simulation sont représentés sur le figure (IV.23)



**Fig.IV.23 :** Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de la charge de 10 Ohm à 20 Ohm avec gradient de la température constante.

## IV.5.4.3 Variation de la charge et de la température

Et enfin, on soumet les deux algorithmes MPPT à un changement à différentes paramètres la température et la charge au même temps, Les résultats de simulation sont représentés sur la figure (IV.24).

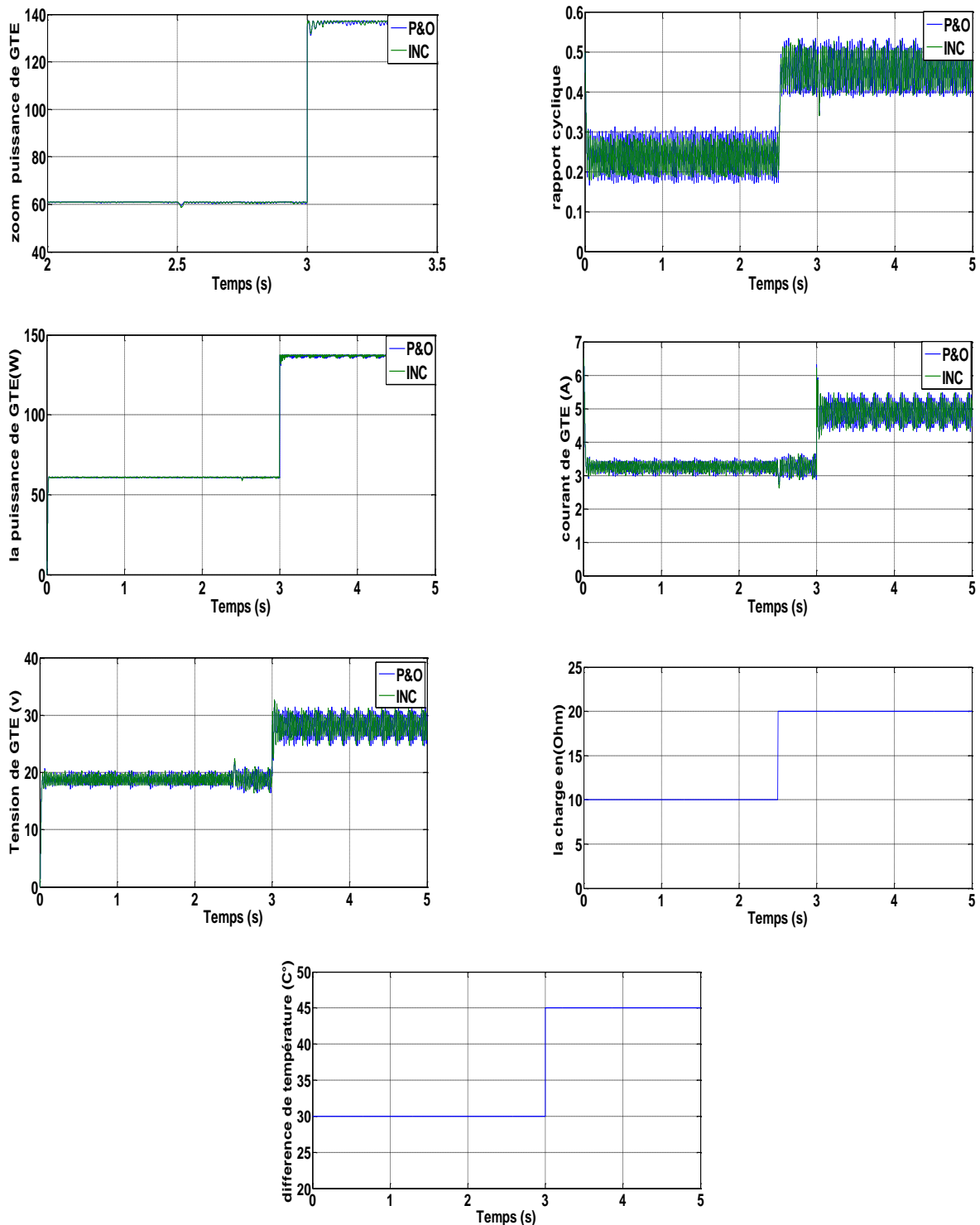


Fig.IV.24 : Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une variation de gradient de la température et de la charge.

### IV.5.5 Interprétation des résultats de GTE

La figure (IV.22), montre l'effet d'augmentation de la puissance de GTE, causée par une augmentation de gradient de la température, ce qui engendre une déviation du point de puissance maximale MPP pour les deux algorithmes avec d'augmentation de courant et de tension. Une fois gradient de la température se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité avec moins de perturbation pour MPPT INC .

On constate aussi que, dans La figure (IV.23), malgré le changement de la charge, les deux algorithmes MPPT a conservé les valeurs optimales de la puissance du GTE et d'augmentation de rapport cyclique, donc un bon rendement par rapport à un GTE sans MPPT.

La figure (IV.24) montre les performance de deux algorithmes dans le cas de variation de toutes les conditions climatiques et de la charge pour le GTE Les résultats obtenus par cet essai montrent la bonne poursuite des deux algorithmes mais avec une rapidité et une stabilité plus élevé et moins perturbation en qualité des réponses pour le contrôleur MPPT INC par rapport au contrôleur MPPT P&O.

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la commande MPPT. Ce choix a été justifié par la simplicité de la conception de cette commande. Pour améliorer davantage les performances de cette commande, nous avons proposé deux techniques de contrôle: la première technique représente l'algorithme MPPT P&O. La deuxième, concerne l'algorithme MPPT INC. Ainsi, on a présenté une étude comparative des performances statiques et dynamiques et la sensibilité aux variations des paramètres électriques et climatiques des deux types d'algorithmes: commande MPPT par P&O et MPPT par INC. Les résultats obtenus montrent la bonne poursuite des deux algorithmes mais avec une rapidité et une stabilité plus élevées et moins perturbation en qualité des réponses du contrôleur MPPT INC par rapport au contrôleur MPPT P&O. Malgré les résultats obtenus par la commande MPPT INC, un tel réglage classique ne contrôle pas d'une manière satisfaisante le régime transitoire de système, et il est beaucoup affecté par les perturbations .En effet, dans ce cas, plusieurs maxima locaux peuvent apparaître induisant l'algorithme MPPT en erreur, menant de la sorte à une perte de puissance non négligeable.

Afin d'avoir de hautes performances dans le régime dynamique, et pour réduire l'influence des variations ainsi que les perturbations du système, la technique de commande par passivité (IDA-PBC) est introduite et fera l'objet du cinquième chapitre.

**Chapitre V :**

**La Commande MPPT Basée sur la**

**Passivité**

## Introduction

Le terme commande basée sur la passivité (passivity based control PBC) a été introduit pour la première fois en 1989 pour définir une méthodologie de conception de commandes qui assurent la stabilité des systèmes en rendant passifs des sous-systèmes convenablement définies. Cette idée a été couronnée de succès pour la commande de systèmes physiques, tels que des systèmes mécaniques, électriques et électromécaniques, en particulier ceux décrits par des équations d'Euler-Lagrange et Hamiltonien [51].

L'approche énergétique ou l'approche par passivité est un outil très utile dans l'analyse et la commande des systèmes non linéaires, en raison de sa forte liaison avec les méthodes de Lyapunov [41]. Les notions énergétiques, à la base de ces méthodes, les rendent compréhensibles, adaptables et applicables aux systèmes dynamiques fondés sur les concepts de flux d'énergie, tels que les convertisseurs de puissance. En outre, la commande par passivité (PBC de l'anglais : Passivity-Based Control) a été appliquée en utilisant la méthode de modélisation dédiée et principalement fondée sur la modélisation hamiltoniens [42], ce qui a permis d'avoir une bonne cohérence et inter-action entre la modélisation et la commande.

Dans ce chapitre, on présente le concept général de la commande par l'approche énergétique. Cette approche est de nature non linéaire et elle est synthétisée dans le domaine temporel, il s'agit de la Commande par Passivité (Passivity based control PBC). On applique la commande par passivité (IDA-PBC) dans le but de la poursuite du MPP du système solaire thermoélectrique et photovoltaïque. La caractéristique électrique du GPV et GTE qui sont approximés par un modèle non linéaire. Le modèle du convertisseur de puissance est établi puis analysé. L'approche pour la commande du convertisseur de puissance est étudiée visant une régulation robuste de la tension de sortie de photovoltaïque et thermoélectrique.

Enfin, pour terminer ce chapitre, une étude sur la robustesse de cette commande sera réalisée par variation des paramètres électriques et des conditions climatiques de système.

## V.1 Méthode Lagrangienne et Hamiltonienne pour la modélisation des systèmes physique

L'importance de l'énergie dans la modélisation des systèmes physique a été amplement montrée dans le domaine de la mécanique par les méthodes lagrangienne et Hamiltonienne. Ces méthodes obtenues à partir de la transformation de Legendre, sont des exemples de l'utilisation de l'approche énergétique dans l'étude du comportement dynamique des systèmes [43].

### V.1.1 La méthode Lagrangienne

La méthode Lagrangienne, issue du calcul variationnel, a comme idée principale la définition des fonctions d'énergie en termes de coordonnées et vitesses généralisées, ce qui mène à la définition d'une fonction appelée Lagrangienne. La dynamique d'un système mécanique lagrangien est définie par l'ensemble d'équation différentielles appelé équation d'Euler-Lagrange [43].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = Q \quad (\text{V.1})$$

Ou :

$q \in \mathfrak{R}^n$  : représente le vecteur des coordonnées généralisées pour un système avec n degrés de liberté.

$\dot{q}$  : Le vecteur des vitesses généralisées correspondant.

$Q$  : Le vecteur qui représente l'ensemble des forces généralisées auxquelles est soumis le système.

$L(q, \dot{q})$  : La fonction Lagrangienne est définie pour les systèmes mécaniques simples, la différence entre l'énergie cinétique  $T(q, \dot{q})$  et l'énergie Potentielle  $V(q)$ .

#### V.1.1.1 la formulation lagrangienne

Les systèmes Euler-Lagrange sont caractérisés par les paramètres EL [44]:

$$\{T(q, \dot{q}), V(q, \dot{q}), F(\dot{q}), M_m\} [16]$$

Avec :

$$T(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} : \text{La fonction d'énergie cinétique.}$$



$D(q)$  : La matrice d'inertie satisfait  $D(q) = D^T(q) \succ 0$ .

$V(q)$  : La fonction d'énergie potentielle qui suppose est bornée par en dessous,

C'est-à-dire qu'il existe un  $c \in \mathbb{R}^n$  tel que  $V(q) \succ c$  Pour tout  $q \in \mathbb{R}^n$ .

$F(\dot{q})$  : est la fonction de dissipation de RAYLIEGH.

$M_m$  : est une matrice de rang plein qui applique les entrées aux coordonnées généralisés.

Selon cette notation, on peut distinguer deux classes de systèmes [44]:

- Un système EL est dit totalement amorti si  $(\alpha \succ 0)$  :

$$\dot{q}^T \frac{\partial f(\dot{q})}{\partial \dot{q}} \geq \alpha \|\dot{q}\|^2 \quad (\text{V.2})$$

- Un système EL sous-amorti si :

$$\dot{q}^T \frac{\partial f(\dot{q})}{\partial \dot{q}} \geq \alpha \|\dot{q}_c\|^2 \quad (\text{V.3})$$

On fera aussi une distinction entre deux autres classes de systèmes EL en fonction de la structure de la matrice  $M_m$ .

- Un système EL est dit totalement-actionné si :  $M_m = I_n$
- on dira qu'un système est sous- actionné si :  $M_m = \left( \begin{bmatrix} 0 & I_m \end{bmatrix} \right)^T$

Dans ce cas-là,  $q$  peut être divisé en coordonnées agies et non agies c'est-à-dire des coordonnées dont la ligne correspondante dans la matrice  $M_m$ , contient des '1' et des '0' respectivement.

### V.1.1.2 Propriétés des systèmes Euler-Lagrange

Les propriétés fondamentales des systèmes « EL » les quelle son a classifiées en propriétés « de stabilité entrée-sortie » et propriétés « de stabilité de Lyapunov » [44].

#### V.1.1.2.1 Propriétés de stabilité entrée-sortie

Il est connu que les systèmes « EL » ont quelques propriétés de dissipations d'énergie (de passivation) [47]:

#### Proposition

(Passivité) un système EL définit un opérateur passif des entrées  $u$  aux vitesses généralisées (agies)  $M_m^T \dot{q}$  ; c'est à dire, il existe un  $b \in \mathfrak{R}$  tel que :

$$\langle u | M_m^T \dot{q} \rangle \geq b \quad (\text{V.4})$$

Pour tout  $u \in L_{2e}^m$ . D'ailleurs, cet opérateur est strictement passif à la sortie si la fonction de dissipation *RAYLEIGH* définit un opérateur strictement passif à la sortie. Dans ce cas :

$$\langle u | M_m^T \dot{q} \rangle \geq \alpha \|M_m^T \dot{q}\|_2^2 + b \quad (\text{V.5})$$

Pour un  $\alpha \geq 0$  et pour tout  $b \in \mathfrak{R}$  et  $u \in L_{2e}^m$ .

#### V.1.1.2.2 Propriétés de la stabilité de LYAPUNOV

On mentionne d'autres propriétés des systèmes Euler-lagrange qui sont liée directement à la stabilité dans le sens de Lyapunov. Par souci de clarté on distinguera deux classes de systèmes, l'un totalement amortis et l'autre sous-amorti [44].

##### a) Systèmes totalement amortis

La proposition ci-dessous établit des conditions suffisantes pour assurer la stabilité interne des systèmes complètement amortis.

##### Proposition (GAS avec amortissement complet)

Les équilibres d'un système EL complètement amorti, en état libre, c'est-à-dire  $u \equiv 0$ , sont  $(q, \dot{q}) = (\bar{q}, 0)$  ou  $\bar{q}$  est une solution de

$$\frac{\partial V(q)}{\partial q} = 0 \quad (\text{V.6})$$

L'équilibre est unique et stable s'il est un point minimum global et unique de la fonction d'énergie potentielle  $V(q)$ , avec  $V(q)$  radialement non bornée.

##### b) Systèmes sous-amortis

Dans la proposition ci-dessous on montre que les systèmes avec un amortissement partiel sont aussi asymptotiquement stables si la matrice d'inertie présente une certaine structure diagonale par blocs et la dissipation est adéquatement propagée à travers toutes les coordonnées généralisées [44].

Pour distinguer entre les coordonnées amorties et les non amortis, on introduit la partition  $q$  suivante

$$q_c = [0 | I_{nc}]q, \quad q_p = [I_{np} | 0]q \quad ; \quad n = n_p + n_c$$

**Proposition.** (GAS avec amortissement partiel)

L'équilibre d'un système EL sous-amorti, libre ( $u = 0$ ) est GAS si la fonction d'énergie potentielle est radialement non bornée avec un minimum global et unique et si :

$$\left\{ \begin{array}{l} D(q) = \begin{bmatrix} D_p(q_p) & 0 \\ 0 & D_c(q_c) \end{bmatrix}, \text{ ou } D_c(q_c) \in \mathfrak{R}^{n_p \times n_c}. \\ \frac{\partial f(\dot{q})}{\partial \dot{q}} \geq \alpha \|\dot{q}_c\|^2, \text{ pour un } \alpha > 0. \end{array} \right. \quad (\text{V.7})$$

Pour chaque  $q_c$ , la fonction  $\frac{\partial V(q)}{\partial q_c} = 0$  à uniquement des zéro isolés dans  $q_p$ .

Il est important de remarquer que la condition sur la structure diagonale par blocs de la matrice d'inertie est intéressante pour découpler les parties amorties et non amorties du système par rapport à l'énergie cinétique.

### V.1.1.3 Récapitulation

Les propriétés fondamentales que l'on utilisera par la suite dans nos contributions peuvent être résumées en :

- Les systèmes « EL » définissent des opérateurs dissipatifs.
- Les systèmes « EL » sont caractérisés par ses paramètres à savoir énergie cinétique, énergie potentielle, fonction de dissipation et la matrice d'entrées généralisées.
- Les équilibres stables d'un système « EL » sont déterminés par le minima de sa fonction d'énergie potentielle.
- Les systèmes « EL » sont asymptotiquement stables s'ils ont un amortissement adéquat.
- L'interconnexion de deux systèmes « EL » constitue un système lagrangien, les paramètres des systèmes « EL » sont simplement l'addition des paramètres de chaque sous-système.

### V.1.2 La méthode Hamiltonienne

Dans la méthode Hamiltonienne, les équations sont écrites en fonction de la position et de la quantité de mouvement généralisée au lieu de la position et de la vitesse généralisée. De plus, dans la méthode on définit, par transformation de Legendre de  $L(q, \dot{q})$ , une fonction d'énergie totale  $H(q, p)$ , qui pour les systèmes mécaniques simples, est égale à la somme des énergies cinétiques et potentielle du système, ceci en constate avec la méthode lagrangienne qui considère la fonction lagrangienne  $L(q, \dot{q})$  comme la différence entre ces deux énergies [43].

#### V.1.2.1 Le formalisme Hamiltonienne

Dans le formalisme Hamiltonien on cherche à décrire le mouvement en équation différentielle ayant  $2n$  variables indépendantes. Le choix de ces variables à coordonnées généralisés  $q_i$  et les moments conjugués généralisés  $p_i$ . Les deux variables sont connues sous le nom de variables canoniques [43].

Avec :

$$p_i = \frac{\partial L(q_j, \dot{q}_j)}{\partial \dot{q}_j}$$

$$L = T(q, \dot{q}) - V(q) \text{ 'Lagrangien' .}$$

Le système hamiltonien peut être défini par ses équations canoniques (V.8).

$$\begin{cases} \dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \\ -\dot{p}_i = \frac{\partial H}{\partial q_i} \end{cases} \quad (\text{V.8})$$

Pour les systèmes mécaniques simples sans dissipation on a :

$$\begin{cases} \dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}(p, q) \\ \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}(p, q) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_n & I_n \\ -I_n & 0_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_n \\ I_n \end{bmatrix} Q \quad (\text{V.9})$$

Où :

$I_n$  : la matrice identité d'ordre  $n$ .

$0_n$  : la matrice nulle d'ordre  $n$ .

Les systèmes dont la dynamique est décrite par l'équation (V.9), sont appelés systèmes hamiltoniens. La fonction d'énergie totale  $H(q, p)$  est appelée la fonction Hamiltonienne.

Ces méthodes ont été conçues pour les systèmes mécaniques, leur application a été étendue à d'autres domaines de l'ingénierie basée sur la combinaison des modèles de type réseau avec la formulation Hamiltonienne (PCH).

Le problème d'application dans le domaine électrique est le choix des variables d'état. L'introduction du moment généralisé comme variable d'état dans la méthode hamiltonienne résout ce problème, ce sont les charges dans les capacités et les flux dans les inductances [43].

## V.2 Structure de Dirac

Dans le domaine électrique les équations de kirchoff définissent une structure géométrique dans l'espace des variables de puissance, que l'on appelle : structure de *Dirac* elle peut être associée à la conservation d'énergie dans les interconnexions des modèles de type réseau.

En, effet, ayant défini les ports d'interconnexion comme les points auxquels les éléments échangent de l'énergie, on va considérer que le bilan de puissance dans ces points est égale à zéro. Cette conservation d'énergie est exprimée par le théorème de Tellegen qui permet de définir la structure de *Dirac* [44].

### V.2.1 Théorème de Tellegen

Soit la représentation de type réseau d'un système physique compose de  $ne$  éléments . Notons  $p_f \in \mathcal{R}^{ne}$  les variables de flux et  $p_e \in \mathcal{R}^{ne}$  les variables d'effort définies dans l'espace dual. Les lois de *Kirchhoff* induisent [44]:

$$\langle p_e, p_f \rangle = 0, \text{ ou } \langle \bullet, \bullet \rangle \text{ désigne le produit de dualité.}$$

### V.2.2 Structure de Dirac sur $\mathcal{R}^{ne} \times \mathcal{R}^{ne}$

Soit  $F_e \in \mathcal{R}^{ne}$  l'espace vectoriel des flux et  $\eta \in \mathcal{R}^{ne}$  l'espace vectoriel dual des efforts. Une structure de Dirac est un sous-espace vectoriel  $L_e \subset F_e \times \eta$  de dimension  $ne$  , avec la propriété  $\forall (p_f, p_e) \in L_e, \langle p_e, p_f \rangle = 0$  .

De cette façon, une structure de Dirac représente la structure d'interconnexion d'un système physique avec conservation d'énergie. Les structures de Dirac ont été étudiées formellement par courant comme une généralisation des structures symplectiques et des structures de poisson. En même temps, Dorfman a développé une théorie algébrique de

structures de *Dirac* dans le contexte de l'étude des systèmes complètement intégrables d'équations différentielles partielles. Des applications de cette approche à l'analyse des circuits électriques LC et à des systèmes mécaniques ont été présentées. Finalement, l'extension des applications des structures de *Dirac* à des systèmes à paramètres distribués a été proposée dans l'intérêt de la structure de *Dirac* dans la description des systèmes *Hamiltoniens* vient du fait qu'elle permet de représenter analytiquement (dans le cadre de la géométrie différentielle) l'interconnexion (vérifiant la continuité de puissance) dans les systèmes physiques. En particulier elle représente les lois de *Kirchhoff* dans les modèles circuit. Une structure de Dirac dans un espace vectoriel, peut être définie sous différente représentation noyau, entrée sortie, flux contraint, effort contraint, image et représentations canoniques. On utilise les trois premières, dont les définitions sont rappelées en suite [44].

### V.2.2.1 Représentation Noyau

Toute structure de *Dirac*  $L_e \subset F_e \times \eta$  est définie de façon unique dans une base  $B = (b_1, \dots, b_{n_e})$  par un couple de  $ne \times ne$ , les matrices  $F'$  et  $E'$  appelées matrices de structure qui respectent les conditions [14] :

$$E F^T + F E^T = 0 \tag{V.10}$$

$$ran[E|F] = ne \tag{V.11}$$

Pour  $L_e = \{(p_f, p_e) \in F_e \times \eta / F \cdot p_e + E \cdot p_f = 0\}$

### V.2.2.2 Représentation Entrée-Sortie.

Soit une structure de *Dirac*  $L_e$ , définie par les matrices de structure  $E$  et  $F$ .

Supposez que  $rang(F) = n_1 (\leq n_e)$ . Choisissez  $n_1$  colonnes indépendantes de  $F$  et groupez-les dans une matrice  $F_1$ . Ecrivez, peut être après quelques commutations des colonnes de  $F = [F_1|F_2]$  avec  $rang(F_1) = n_1$ . Nous avons pour  $E = [E_1|E_2]$  et pour les vecteurs des variables de puissance [45] :

$$p_f = \begin{bmatrix} p_{f1} \\ p_{f2} \end{bmatrix} \text{ et } p_e = \begin{bmatrix} p_{e1} \\ p_{e2} \end{bmatrix}$$

Donc la matrice  $F = [F_1|F_2]$  est inversible et la structure de Dirac  $L_e$  est définie de façon unique dans une base  $B = (b_1, \dots, b_{n_e})$  par :

$$L_e = \left\{ \left( \begin{bmatrix} p_{f1} \\ p_{f2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p_{e1} \\ p_{e2} \end{bmatrix} \right) \in F_e \times \eta / \begin{bmatrix} p_{f1} \\ p_{f2} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} p_{e1} \\ p_{f2} \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{V.12})$$

Avec :

$$J = -J^T = -[F_1 : E_2]^{-1} [E_1 : F_2]$$

Où :

$J$  : Matrice antisymétrique.

### V.2.2.3 Représentation Flux Contraint

Toute structure de *Dirac*  $L_e \subset F_e \times \eta$  est définie dans une base  $B = (b_1, \dots, b_{n_e})$  par un couple de matrices  $(\tilde{J}, D)$ , appelées matrices de structure. La structure de *Dirac* est définie par[43]:

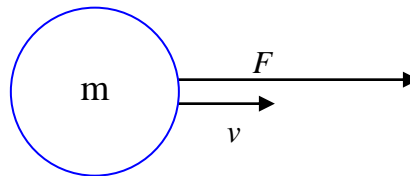
$$L_e = \left\{ (p_f, p_e) \in \mathfrak{R}^{n_e} \times \mathfrak{R}^{n_e} / p_e = \tilde{J} \cdot p_f + D \cdot l_e \cdot D^T \cdot p_f = 0, l_e \in \mathfrak{R}^l \right\} \quad (\text{V.13})$$

### V.2.4 Exemples d'interconnexion

Nous présentons quelques exemples élémentaires d'interconnexion en utilisant la structure de Dirac [55].

#### V.2.4.1 Point matériel soumis à une force externe

On considère un point matériel de masse qui se déplace à une vitesse, et on lui applique une force externe voir la figure (V.1) [55].



**FigV.1:**Point matériel soumis à une force externe.

Ce système dynamique est décrit par les variables :

$$x = P \in \mathfrak{R},$$

Avec :

$$P = mv$$

Et la fonction d'énergie :  $H(P) = \frac{1}{2m} P^2$

Les éléments de la structure de Dirac sont :

$$f^p = -\dot{p}, e^p = \partial_p H(P) = \frac{P}{m} = v, e = F, f = v^F.$$

Avec :

$v^F$  est la vitesse du point lorsque la force est lui appliqué.

Les lois physiques d'interconnexion :

$$\dot{P} = F, v = v^F$$

La première relation c'est la deuxième loi de *Newton*, quand la première montre que la force externe est appliquée à la particule.

Les deux lois d'interconnexion peuvent être écrites sous la forme de la structure de *Dirac* avec :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{F(p)} \begin{bmatrix} -\dot{P} \\ v^F \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{E(p)} = 0$$

Satisfais la relation :

$$FE^T + EF^T = F + F^T = 0.$$

#### V.2.4.2 Un ressort idéal

On considère un ressort idéal, sa fonction d'énergie est décrite par [55] :

$$H(q_m) = \frac{1}{2} K_m q_m^2$$

Où :

$q_m \in \mathfrak{R}$  : La position d'équilibre.

$K_m$  : est la constante de raideur.

Dans ce cas les éléments de la structure de *Dirac* sont :

$$f^p = -\dot{q}, e^x = K_m q_m, e = F_m, f = v$$

Où :

$F_m$  : C'est la force sur le ressort

$v$  : C'est la vitesse ou elle est appliquée.

$$\dot{q}_m = v, F_m = K_m q_m$$

La force change avec le déplacement  $-F_m = -K_m q_m$ , la force appliquée sur le ressort.

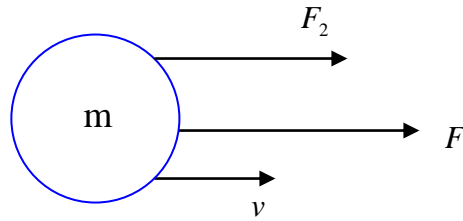


$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{F(q)} \underbrace{\begin{bmatrix} -\dot{q}_m \\ v \end{bmatrix}}_{E(q)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}}_{E(q)} \underbrace{\begin{bmatrix} K_m \\ F_m \end{bmatrix}}_{E(q)} = 0$$

### V.2.4.3 Un point matériel soumis à deux forces externes

on considère ici un point matériel de masse  $m$  soumis à deux forces externes  $F_1, F_2$ , la

variable dynamique est  $x = P \in \mathfrak{R}$  et sa fonction d'énergie  $H(P) = \frac{1}{2m} p^2$ .



**FigV.2:** Un point matériel soumis à deux forces externes

Les éléments de la structure de *Dirac* sont [55] :

$$f^p = -\dot{p}_m, \quad e^p = \frac{P}{m} = v, \quad e_1 = F_1, \quad f_1 = v_1, \quad e_2 = F_2, \quad f_2 = v_2 \quad \text{et} \quad e_i, i=1,2 \quad \text{sont les}$$

vitesse du point lorsque les forces  $F_i$  sont appliquées.

$$\dot{P} = F_1 + F_2, \quad v_1 = v_2 = v$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{F(q)} \underbrace{\begin{bmatrix} -\dot{P} \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}}_{E(q)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{E(q)} \underbrace{\begin{bmatrix} v \\ F_1 \\ F \end{bmatrix}}_{E(q)} = 0$$

### V.2.4.4 une masse liée à un ressort soumis à une force externe

On considère une masse  $m$  connectée à un ressort idéal de constante de raideur  $K_m$  soumis à une force  $F_m$ .

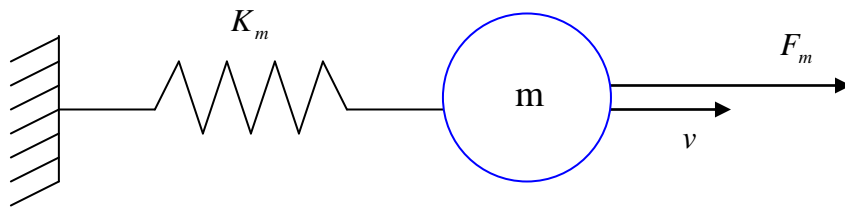
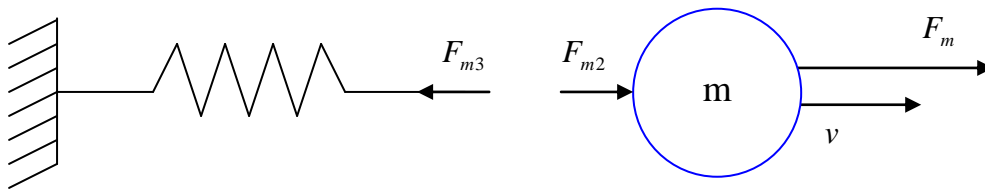


Fig V.3.a : Une masse liée à un ressort soumis à une force

Dans ce cas deux variables apparaissent, une du sous système masse soumis à deux forces externes et l'autre c'est le ressort idéal [55].



FigV.3.b:Une masse liée à un ressort soumis à une force externe.

Les deux sous systèmes séparés où on décrit les structures de Dirac :

Masse :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{F(q)} \begin{bmatrix} -\dot{P} \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ F_m \\ F_{m2} \end{bmatrix} = 0$$

L'interconnexion

$$F_{m3} = -F_{m2}, v_3 = v_2$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{F_c} \begin{bmatrix} v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}}_{E_c} \begin{bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = 0$$

Mettons les tous ensembles

$$-\dot{P} + F_m + F_{2m} = 0, v = v_2 = v^{F_m}, -\dot{q}_m + v_3 = 0, F_{3m} = K_m q_m, F_{3m} = -F_{m2}, v_3 = v_2$$

Eliminations les variables auxiliaires d'interconnexions

$$F_m - K_m P - \dot{P} = 0, \quad v^{F_m} = v, \quad \dot{q}_m = v$$

La structure de Dirac s'écrit sous forme:

La fonction d'énergie est la somme des fractions d'énergie partielles

$$H(P, q_m) = \frac{1}{2m} P^2 + \frac{1}{2} K_m q_m^2$$

### V.3 Définition Système Hamiltonien commandé par port

Le formalisme de modélisation des systèmes hamiltoniens commandés par port permet la représentation de la dynamique d'un système physique sous la forme d'un réseau d'échange d'énergie. Une paire de variables de puissance est associée aux ports d'interconnexion. La variable  $p_{fi}(t)$  dénote la variable de flux associée au port  $i$  et  $p_{ei}(t)$  sa variable d'effort. de la même façon, une paire de variables d'énergie est associée aux ports d'interconnexion. Ces variables génériques permettent de caractériser l'interaction entre deux sous-systèmes [43], [45].

Un système Hamiltonien commandé par port (PCH) sur  $\mathfrak{R}^n$  est défini par une matrice de structure  $J(x)$  anti-symétrique de dimension  $(n \times n)$ , une fonction hamiltonienne  $H(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ , une matrice d'entrées  $g(x)$  de dimension  $(n \times m)$  et les équations dynamiques :

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x} = J(x) \frac{\partial H}{\partial x}(x) + g(x).u \\ y = g^T(x) \frac{\partial H}{\partial x}(x) \end{cases} \quad (\text{V.14})$$

Ou :

$x \in \mathfrak{R}^n$  : Vecteur d'état de variables d'énergie.

$H(x): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  Représente l'énergie totale stockée.

$u, y \in \mathfrak{R}^m$  : Les ports (entrées-sorties) de puissances variables.

$u$  et  $y$  sont des variables conjuguées, leur produit dual est une puissance échangée avec l'environnement du système, par exemple les courants et les tensions dans les circuits électriques.

si on introduit la dissipation dans cette équation avec la condition (V.23)

$$\begin{bmatrix} g(x) & g_R(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u_R \end{bmatrix} = g(x)u + g_R(x)u_R \quad (\text{V.15})$$

On aboutira à :

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x}(x) + g(x).u \\ y = g^T(x) \frac{\partial H}{\partial x}(x) \end{cases} \quad (\text{V.16})$$

#### V.4 la stabilité des systèmes dynamiques

D'une manière générale, on peut définir la stabilité comme la capacité d'un système physique à revenir à l'équilibre lorsqu'il est perturbé légèrement. La stabilité est une notion relativement intuitive. Il est cependant difficile d'en donner une définition précise. Plusieurs définitions de la stabilité peuvent être proposées, stabilité BIBO, stabilité MIMO, stabilité au sens Lyapunov...etc [46].

##### V.4.1 Notion intuitive de la stabilité

Nous allons considérer les systèmes décrits par :  $\dot{x} = f(x)$ ,  $x \in \mathfrak{R}$  Une notion qui est primordiale dans l'étude de la stabilité est la notion de point d'équilibre.

L'état  $x_e$  est appelé état d'équilibre ou point d'équilibre pour le système  $\dot{x} = f(x)$  si lorsque  $x_e$  vérifié l'équation  $f(x_e) = 0$ .

La stabilité d'un point d'équilibre d'un système consiste à toujours à observer que son évolution reste proche du point d'équilibre lorsqu'on s'en écarte d'un certain voisinage dans le domaine de stabilité [46], [48].

La stabilité asymptotique, en plus de garantir la condition précédente, Indique que le système reviendra exactement au point d'équilibre, au bout d'un temps éventuellement infini, si on s'en écarte « légèrement ».

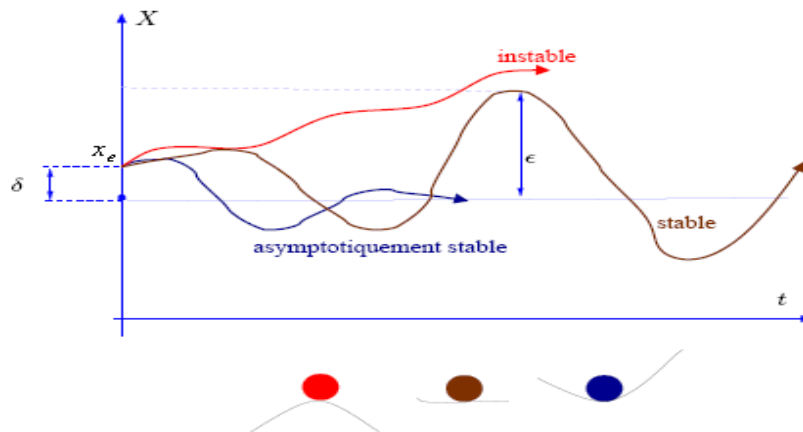
Le point d'équilibre  $x_e$  est :

- Stable si :

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : \|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| \leq \varepsilon. \quad (\text{V.17})$$

- Asymptotiquement stable si :

$$\forall \delta > 0 : \|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e. \quad (\text{V.18})$$



**Fig V.4** : Illustration de la définition intuitive de la stabilité [47].

## V.4.2 stabilité de Lyapunov

### V.4.2.1 Méthode directe de Lyapunov

Lorsque la bille est examinée selon un point de vue différent, on constate que le comportement stable ou instable de celle-ci peut être à la caractéristique et l'évolution de sa fonction d'énergie. La présence d'un maximum ou minimum d'énergie potentielle possède une influence critique. De plus, la présence de frottement est responsable de la décroissance de l'énergie complète (cinétique et potentielle) et influence donc la stabilité [49].

### V.4.2.2 Stabilité au sens de LYAPUNOV

La bille possède donc une fonction d'énergie  $E$  qui comporte une part d'énergie potentielle  $V$  et une part d'énergie cinétique  $T$  [49] On a :

$$E = T + V \quad (\text{V.19})$$

Le comportement est stable lorsque :

- L'énergie  $E$  diminue et  $E$  est minimale au point d'équilibre.
- L'énergie  $E$  est conservée et  $E$  est minimale à l'équilibre.

Par contre, le comportement est instable lorsque :

- L'énergie  $E$  augmente.
- L'énergie  $E$  est conservée mais elle ne correspond pas à un minimum à l'équilibre.

### V.4.2.3 Candidat de Lyapunov

La fonction d'énergie possède deux propriétés essentielles. La première est la qualité d'extremum au point d'équilibre, à savoir s'il s'agit d'un maximum ou d'un minimum. Le point d'équilibre à tendance à être stable lorsque cet extremum est un minimum. Le candidat Lyapunov  $H(x)$  est une fonction qui présente ce type de particularité. Afin de forcer la présence d'un minimum au point d'équilibre, la fonction sera contrainte à être positive pour toute valeur différente de l'origine. Elle ne pourra s'annuler qu'à l'origine [49].

#### V.4.2.3.1 Candidat de Lyapunov

Une fonction définie positive continue, notée  $H(x)$  est un candidat de Lyapunov [49].

#### V.4.2.4 Fonction de Lyapunov

Une fonction de Lyapunov est un candidat de Lyapunov, à savoir une fonction continue  $H(x)$  telle que [49]:

$$H(x) > 0, \forall x \neq 0, H(x) = 0 \quad x = 0$$

Ayant en plus la propriété

$$\dot{H}(x) \leq 0 \quad \forall x \neq 0, \quad \dot{H}(x) = 0 \quad x = 0$$

**Théorème** (Seconde méthode de Lyapunov, dite aussi méthode directe)

- Si une fonction de Lyapunov existe pour un système donné alors ce système est stable.
- Si la fonction de Lyapunov est strictement décroissante, c'est-à-dire que  $\dot{H}(x) < 0, \forall x \neq 0$ , alors la stabilité est en plus asymptotique [49].

## V.5 la commande basée sur la passivité (PBC)

La commande basée sur la passivité est une technique bien établie qui s'est montrée très puissante pour concevoir des commandes robustes pour les systèmes physiques, ont une interprétation physique claire en termes d'interconnexion du système avec son environnement. Elle est robuste vis-à-vis des effets dissipatifs même non modélisés [53]. La PBC utilise soit :

- La technique de mise en forme de l'énergie (energy shaping) ou on modifié l'énergie totale de système de façon à ce que la nouvelle fonction d'énergie ait un minimum avec le comportement désiré.
- La technique d'ajout d'amortissement au système ou on modifie la fonction de dissipation d'énergie afin d'imposer la stabilité asymptotique du système commandé. Une caractéristique de cette technique est que les dynamiques du système en boucle fermée définissent un système passif.

Cette caractéristique amène quatre avantages majeurs, qui dans une large mesure, expliquent le succès pratique de la commande basée sur la passivité.

- L'action de la commande s'interprète physiquement comme une interconnexion entre le système et son environnement. En particulier, la stabilisation peut être comprise en termes d'équilibre d'énergie entre eux.
- Les systèmes passifs sont robustes vis-à-vis des incertitudes paramétriques et dynamiques non modélisées. Par exemple dans le cas de systèmes mécaniques, les sorties passives sont vitesses généralisées, par conséquent les effets non modélisés tels que les frottements (qui sont des actions dissipatives) ne peuvent pas détruire la stabilité.
- Dans certains cas, il est possible de donner une interprétation physique claire au réglage des paramètres de la commande, par exemple comme des amortisseurs ou des ressorts. Cette propriété peut être d'une grande importance dans les systèmes industriels où le réglage des commandes lors de leur mise en œuvre pour obtenir des systèmes robustes revêt une importance particulière (hélas largement négligée en théorie de contrôle).
- Puisque la PBC a été développée à partir des propriétés physiques comme la conservation de l'énergie et la passivité qui doivent être mise en contraste avec la commande par retour linéarisant qui résulte de considérations mathématiques, la conception est cohérente avec les contraintes physiques, sans annuler des dynamiques ni introduire des singularités dans la commande[50].

### V.5.1 Fonction de stockage

Supposons qu'il existe une fonction continue  $H(t) \geq 0$ , on appelle fonction de stockage du système d'entrée  $u(t)$  et de sortie  $y(t)$ , la fonction donnée par le théorème suivant [51]:

$$H(T) - H(0) \leq \int_0^T y^T(t) \cdot u(t) dt \quad (\text{V.20})$$

Pour toutes fonctions  $u$ , et tout  $T \geq 0$  et tout  $H(0)$ . Alors le système d'entrée  $u(t)$  et de sortie  $y(t)$  est passif.

Supposons en plus, qu'il existe deux constantes  $\delta \geq 0$  et  $\varepsilon \geq 0$  telles que :

$$H(T) - H(0) \leq \int_0^T y^T(t) \cdot u(t) dt - \delta \int_0^T u^T(t) \cdot u(t) dt - \varepsilon \int_0^T y^T(t) \cdot y(t) dt \quad (\text{V.21})$$

Pour toutes fonctions  $u$ , et tout  $T \geq 0$  et tout  $H(0)$ . Alors le système est strictement passif en entrée si  $\delta > 0$ , strictement passif en sortie si  $\varepsilon > 0$  strictement passif si  $\delta > 0$  et  $\varepsilon > 0$ .

Si on considère que  $H(T)$  correspond à l'énergie du système, que  $\int_0^T y^T(t) \cdot u(t) dt$  correspond à l'énergie injectée dans le système par la commande sur  $[0, T]$ , alors :

$$H(T) - H(0) \leq \int_0^T y^T(t) \cdot u(t) dt \quad (\text{V.22})$$

### V.5.2 Système passif

Un système est dit passif si l'énergie stockée dans le système ne peut pas dépasser l'énergie qui lui est apportée, la différence étant dissipée [50].

### V.5.3 La passivité

Un système avec une entrée  $u$  et une sortie  $y$  ou  $u(t) \in R^n$  est passif si il existe une constante  $\Gamma(x(0))$  telle que :

$$\int_0^T y^T(t) \cdot u(t) dt \geq \Gamma(x(0)) \quad (\text{V.23})$$

Pour toutes fonctions  $u$  et tout  $T \geq 0$ . si, en plus, il existe les constantes  $\delta \geq 0$  et  $\varepsilon \geq 0$



Telles que :

$$\int_0^T y^T(t) \cdot u(t) dt \geq \Gamma(x(0)) + \delta \int_0^T u(t) \cdot u(t) dt + \varepsilon \int_0^T y^T(t) \cdot y(t) dt \quad (\text{V.24})$$

Pour toutes fonctions  $u$  et tout  $T \geq 0$ , alors le système est strictement passif en entrée  $\delta \geq 0$  strictement passif en sortie si  $\varepsilon \geq 0$ , et strictement passif si  $\delta \geq 0$  et  $\varepsilon \geq 0$  [51].

### V.5.3.1 Définition différentielle de la passivité

Soit le système :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x) \end{aligned}$$

S'il existe  $\gamma > -\infty$ ,  $H > \gamma$

Et

$$\dot{H} = u^T y - g \quad (\text{V.25})$$

Avec  $g \geq 0$ , alors le système est passif [51].

#### V.5.3.1.1 Propriétés

L'immense avantage des systèmes passifs est leur plasticité lors de connexion en tout genre. En effet, ces systèmes se comportent très bien lors de connexion en série, car les systèmes agissent en quelque sorte indépendamment de leur connexion. Mais ils se comportent également très bien lors de connexion à la fois en parallèle et en rétroaction. Ce dernier cas est important lors d'association de sous-systèmes passifs en retour de sortie [51].

##### V.5.3.1.1.1 Connexion parallèle

Lors d'une connexion parallèle chacun des deux systèmes comporte une fonction de stockage interne  $H_1$  et  $H_2$  respectivement :

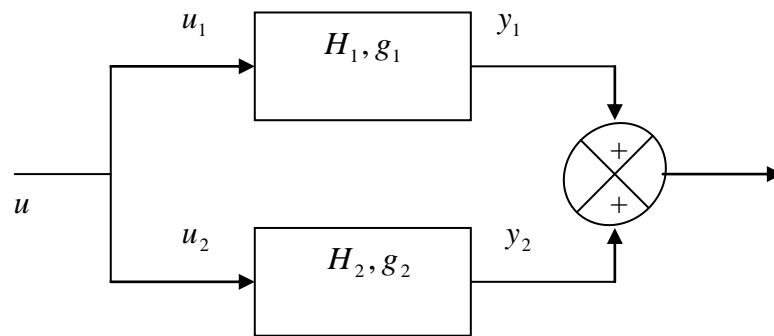
$$\dot{H}_1 = u_1^T y_1 - g_1$$

$$\dot{H}_2 = u_2^T y_2 - g_2$$

$$\begin{aligned} \dot{H} = \dot{H}_1 + \dot{H}_2 &= u_1^T y_1 + u_2^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= u^T y_1 + u^T y_2 - g_1 - g_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= u^T (y_1 + y_2) - g_1 - g_2 \\
 &= u^T y - g \\
 \dot{H} &= u^T y - g \tag{V-26}
 \end{aligned}$$

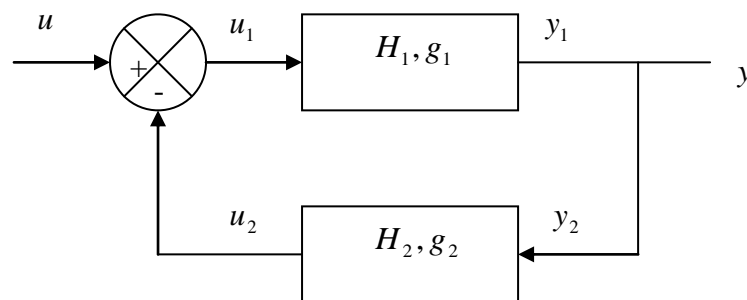
Où l'on a fait l'usage de la particularité de la connexion parallèle. Le calcul montre donc que, si l'on considère  $H = H_1 + H_2$  comme fonction de stockage associé à l'assemblage constitué par la connexion en parallèle des deux systèmes individuels, alors cet assemblage répond à la même (V.5.3.1) , en utilisant cette fois-ci  $H = H_1 + H_2$  et  $g = g_1 + g_2$ .



**FigV.5:** Connexion parallèle.

**V.5.3.1.1.2 Connexion par rétroaction**

La connexion par rétroaction est plus pernicieuse étant donné que les deux systèmes interagissent d'amont en aval et ceci à l'infini. Soit donc la connexion par rétroaction négative [51].



**Figure V.6:** Connexion par rétroaction.

Pour la quelle chacun des sous-systèmes constitutifs obéit à la (V.5.3.1). En tenant compte de la particularité de la connexion,

$$\dot{H}_1 = u_1^T y_1 - g_1$$

$$\dot{H}_2 = u_2^T y_2 - g_2$$

$$\begin{aligned} \dot{H} = \dot{H}_1 + \dot{H}_2 &= u_1^T y_1 + u_2^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= (u^T - y_2^T) y_1 + u_2^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= (u^T - y_2^T) y_1 + y_1^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= u^T y_1 - y_2^T y_1 + y_1^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= u^T y_1 - g_1 - g_2 \\ &= u^T y - g \end{aligned}$$

$$\dot{H} = u^T y - g \tag{V.27}$$

et la même constatation que dans le cas de la connexion parallèle est déduite : Le système est passif avec comme fonction de stockage  $H = H_1 + H_2$  et terme de dissipation  $g = g_1 + g_2$ .

### V.5.3.2 Définition intégrale de la passivité

Il est également possible de donner une définition équivalente de la passivité mais qui ne fait pas intervenir de notion différentielle [51].

#### Définition

S'il existe  $\gamma \in \mathfrak{R}, \gamma > -\infty$ , les fonctions :  $H > \gamma$  et  $g \geq 0$  tel que si :

$$\dot{H} = u^T y - g \text{ et } \exists \alpha \in \mathfrak{R}, \alpha > -\infty$$

Alors le système est passif [22].

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^\infty u^T(t) y(t) dt > \alpha \\ H = \int_0^\infty u^T(t) y(t) dt - \int_0^\infty g dt > \gamma \end{array} \right. \tag{V.28}$$

Pour voir la correspondance entre les deux définitions (V.5.3.1) et (V.5.3.2.1), (il suffit de prendre  $g \equiv 0$ ).

En fait, la définition intégrale signifie qu'il est impossible en jouant sur l'entrée de rendre arbitrairement petit le stock interne d'énergie. Ce stock est borné inférieurement.

Cette définition peut être Lors d'une connexion parallèle chacun des deux systèmes comporte une fonction de stockage interne  $H_1$  et  $H_2$  respectivement :

$$\dot{H}_1 = u_1^T y_1 - g_1$$

$$\dot{H}_2 = u_2^T y_2 - g_2$$

$$\begin{aligned} \dot{H} = \dot{H}_1 + \dot{H}_2 &= u_1^T y_1 + u_2^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= u^T y_1 + u^T y_2 - g_1 - g_2 \\ &= u^T (y_1 + y_2) - g_1 - g_2 \\ &= u^T y - g \end{aligned}$$

$$\dot{H} = u^T y - g \quad (\text{V.29})$$

Où l'on a fait l'usage de la particularité de la connexion parallèle. Le calcul montre donc que, si l'on considère  $H = H_1 + H_2$  comme fonction de stockage associé à l'assemblage constitué par la connexion en parallèle des deux systèmes individuels, alors cet assemblage répond à la même (V.5.3.1), en utilisant cette fois-ci  $H = H_1 + H_2$  et  $g = g_1 + g_2$ . utilisée pour démontrer un lien important entre la propriété de passivité et la caractéristique fréquentielle associée aux systèmes linéaires par l'entremise de l'identité de Parseval [51].

### V.5.3.3 Définitions mathématiques de la passivité

Nous introduisons des définitions précises de la passivité qui reflètent sa propriété de la transformation de l'énergie [52].

**Définition 1 :** Soit  $l_2^n$  norme d'un signal  $f : \mathcal{R}_{\geq 0}^n \rightarrow \mathcal{R}^n$ , est notée

$$\|f(t)\|_{2T} = \left( \int_0^T \|f(t)\|^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

La norme  $l_2^n$  notée  $\|f(t)\|_2$  définie par  $\lim_{T \rightarrow \infty} \|f(t)\|_{2T}$ , avec cette métrique nous pouvons définir la norme de l'espace étendu  $l_{2e}$ .

**Définition 2** (l'espace  $l_{2e}$ )

On dit que  $f : \mathfrak{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathfrak{R}$ , appartient à  $l_2^n$  si seulement si  $\|f(t)\|_{2T} < \infty$ . Cette définition prend un sens du point de vue pratique si on considère le cas où  $f(t)$  correspondent à une puissance et par conséquent  $l_2^n$  s'interprète par quantité d'énergie sur un intervalle de temps.

Maintenant on définit le concept de passivité pour des signaux de  $l_2^n$  par introduction de produit suivant qui généralise le concept de l'énergie fournie [52].

**Définition 3** (produit interne)

Soit  $u, y \in l_{2e}^n$  et  $T > 0$ , le produit interne est défini[52]:

$$\langle u | y \rangle_T := \int_0^T u(t) \cdot y(t) dt \quad \forall T \tag{V.30}$$

**Définition 4** (Passivité)

L'opérateur  $H : u \rightarrow y$  est passif s'il existe une constante :

$\Gamma \in \mathfrak{R}$  Telle que :

$$\langle u | y \rangle_T \geq \Gamma \tag{V.31}$$

Le nombre  $\beta$  dépend des conditions initiales du signal [52].

**Définition 5.** (Passivité stricte en sortie, **OSP**).

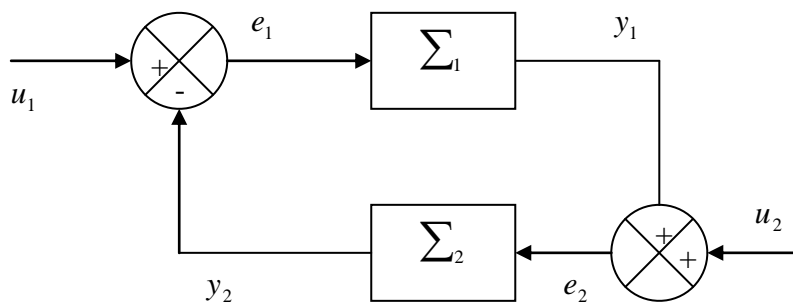
L'opérateur  $H : u \rightarrow y$  est **OSP** s'il existe une constante  $\Gamma \in \mathfrak{R}$  et  $\delta_0 > 0$  tel que[52]:

$$\langle u | y \rangle_T \geq \Gamma + \delta_0 \|y\|_{2T}^2 \tag{V.32}$$

**Définition 6** (passivité stricte en entrée, **ISP**).

L'opérateur  $H : u \rightarrow y$  est **ISP** s'il existe une constante  $\Gamma \in \mathfrak{R}$  et  $\delta_i > 0$  tel que [52] :

$$\langle u | y \rangle_T \geq \Gamma + \delta_i \|u\|_{2T}^2 \tag{V.33}$$



**FigV.7:** Systèmes passifs interconnectés par retour d'état.

**Théorème**

Soient deux systèmes  $\sum_1(u_1, y_1)$  et  $\sum_2(u_2, y_2)$  interconnectés en un système  $\sum(u, y)$  :

Soient  $e := (e_1, e_2)$  ;  $u := (u_1, u_2)$  et  $y := (y_1, y_2)$  appartiennent à  $l_{2e}^{2n}$

- Si  $\sum_1(u_1, y_1)$  et  $\sum_2(u_2, y_2)$  sont passifs donc  $\sum: u \rightarrow y$  est aussi passif
- Si  $\sum_1(u_1, y_1)$  et  $\sum_2(u_2, y_2)$  sont **OPS** donc  $\sum: u \rightarrow y$  est **OPS**.
- Si  $\sum: u \rightarrow y$  est **OPS** donc il a un gain fini  $l_2$ .

**Définition 7 (Stabilité de  $l_2$ )**

Un système d'espace d'état est dit stable de  $l_2$  avec un gain de  $l_2$  fini s'il existe une constante  $\gamma$  passive telle que pour toute conditions initiales  $x_0 = x(0)$  existe une constante finie  $\Gamma(x_0)$  tel que [52]:

$$\|y(t)\|_{2T} \leq \gamma \|u(t)\| + \Gamma(x_0) \quad (\text{V.34})$$

**V.5.4 PBC des systèmes d'EL**

On considère un système dynamique de n degrés de liberté avec les coordonnées généralisés  $q, \dot{q} \in \mathfrak{R}^n$ . Le système est un système d'EL s'il satisfait l'équations (V.35) [47], [54] :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = Q \quad (\text{V.35})$$

Où :

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q)$$

On peut considérer trois types de forces externes : de contrôle ; de dissipation et d'interaction du système avec son environnement, on accepte que les contrôles à appliquer sont linéaires de la forme  $M_m u \in \mathfrak{R}^n$ ,  $M_m \in \mathfrak{R}^n$ , est une matrice constante. Et  $u \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur de contrôle. Les forces de dissipation sont de la forme  $-\frac{\partial F(\dot{q})}{\partial \dot{q}}$

Où :

$F(\dot{q})$  est la fonction de Rayleigh de dissipation définit par :

$$\dot{q}^T \frac{\partial F(\dot{q})}{\partial \dot{q}} \geq 0 \quad (\text{V.36})$$

Les forces externes peuvent avoir l'expression suivante :

$$Q = -\frac{\partial F(\dot{q})}{\partial \dot{q}} + Q_\xi + M_m u \quad (V.37)$$

Où :

$Q_\xi$  Modélise les effets de la perturbation.

Dans ce cas ou nous considérons seulement les forces dissipatives.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = Q_\zeta + M_m u \quad (V.38)$$

Avant de parler de la méthode PBC ; nous devons montrer que les systèmes EL sont passifs.

$$q \rightarrow \dot{q}$$

On définit l'opérateur passif :  $\Sigma : u \rightarrow M_m^T \dot{q}$  avec la fonction de stockage du système avec l'énergie totale  $H(q, \dot{q})$

$$\langle u | M_m^T \dot{q} \rangle_T \geq H[q(T), \dot{q}(T)] - H[q(0), \dot{q}(0)] \quad (V.39)$$

Pour tout  $T \geq 0$  tout  $u \in l_{2e}^m$ , **OPS** le système est complètement amortie. Dans ce cas

$$\langle u | M_m^T \dot{q} \rangle_T \geq \alpha \|M_m^T \dot{q}\|_{2T}^2 + H[q(T), \dot{q}(T)] - H[q(0), \dot{q}(0)] \quad (V.40)$$

Pour  $\alpha \geq 0$  et pour tout  $u \in l_{2e}^m$

D'où :

$$\begin{array}{ccc}
 H[q(T), \dot{q}(T)] - H[q(0), \dot{q}(0)] + \int_0^T \dot{q}^T \frac{\partial F(\dot{q})}{\partial \dot{q}} ds & = & \int_0^T \dot{q}^T M_m u ds \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \text{Energie stockée} & & \text{énergie dissipée} \quad \text{énergie fournie}
 \end{array} \quad (V.41)$$

On tire les constatations suivantes :

- pour  $u \equiv 0$  l'énergie stockée est non croissante, l'équilibre trivial de système libre est stable au sens de Lyapunov.
- la stabilité est également préservée si on s'est fixé la sortie  $M_m \dot{q} \equiv 0$ .
- L'amortissement peut être facilement ajouté si  $\dot{q}$  est mesurable.

L'opérateur  $u \rightarrow M_m^T \dot{q}$  peut être **OSP** même si l'énergie n'est pas dissipée dans toutes les directions, c'est-à-dire il est suffisant d'assurer que :  $\dot{q}^T \frac{\partial F(\dot{q})}{\partial \dot{q}} \geq \alpha \|M_m^T \dot{q}\|_{2T}^2$ .

### V.5.5 Equilibre énergétique, passivité et stabilité

Evaluation du taux de la puissance totale est obtenue par [46,57] :

$$\frac{dH}{dt} = - \left[ \frac{\partial H}{\partial x}(x) \right]^T \cdot R(x) \cdot \frac{\partial H}{\partial x}(x) + u^T \cdot y \tag{V.42}$$

$- \left[ \frac{\partial H}{\partial x}(x) \right]^T$  Terme non positif représente la dissipation causée par les éléments résistifs

(de frottement) dans le système.

L'intégration de ce système montre que la fonction  $H$  est décroissante bornée par-dessous pour tous  $t \geq 0$ .

$$\int_0^t u^T(s) \cdot y(s) ds = H[x(t)] - H[x(0)] + \int_0^t \left[ \frac{\partial H}{\partial x}[x(s)] \right]^T R[x(s)] \frac{\partial H}{\partial x}[x(s)] ds \tag{V.43}$$

$\updownarrow$   
 Energie fournie

$\updownarrow$   
 énergie stockée

$\updownarrow$   
 énergie dissipée

Le système est donc passif il stocke moins d'énergie qu'il lui est fourni même s'il n'est pas commandé  $u \equiv 0$ . Il est possible d'accélérer sa décroissance donc renforcer sa stabilité

Par l'introduction de commande  $y$  arrachant une partie de son énergie, qui est de la forme  $u = -k_v y$  avec  $k_v = k_v^T$  qui représente le gain d'injection d'amortissement.

Si on arrive à trouver une commande de la forme  $u = \alpha(x) + v$  telle que l'énergie des dynamiques en boucle fermée satisfait la relation suivante :

$$H_d[x(t)] - H_d[x(0)] = \int_0^t (u^T y'(s) ds) - d_d(t) \tag{V.44}$$



$H_d(x) \gg H_d(x^*)$  et  $y^*$  peut être égale à  $y$  la nouvelle sortie passive, nous avons remplacé la dissipation naturelle par la fonction  $H_d(x)$ , la stabilité est asymptotique si certaines conditions de détectabilité sont vérifiées.

### V.5.6 la commande basée sur la passivité à Assignment d'interconnexion et d'amortissement (IDA-PBC)

La passivité (PBC) c'est le nom générique pour définir la méthodologie du contrôleur pour obtenir la stabilisation en rendant le système passif tout en respectant la fonction de stockage, et l'injection d'amortissement. La PBC peut être classée en deux catégories :

- La catégorie classique, on sélectionne la fonction de stockage, qui désigne le contrôleur pour rendre la fonction de stockage non croissante, cette approche est dérivée de la méthode de Lyapunov, elle a donné un succès pour contrôler des systèmes physiques décrits par les équations d'Euler-Lagrange incluant ainsi les applications numériques, électriques et électromécaniques.
- La deuxième classe de la PBC, ne fixe pas la fonction de stockage en boucle fermée mais sélectionne la structure désire du système en boucle fermée (lagrangien, ou PCH), et caractérise une compatibilité entre la fonction d'énergie et cette structure. Cette caractérisation est donnée par le lagrangien en terme de solutions des équations aux dérivées partielles (PDE).

Cette approche trouve son application notamment dans les systèmes lagrangiens contrôlés et dans les systèmes utilisant l'interconnexion et l'amortissement (IDA).

Pour IDA-PBC, les équations aux dérivées partielles particulières PDE qu'on doit résoudre sont paramétrées par trois Matrices (choix du concepteur) d'interconnexion entre les sous-systèmes, d'amortissement, et la matrice d'entrée.

Pour résoudre le problème de la passivité dans ce cas on propose d'étudier la méthodologie IDA-PBC. On propose l'étude de la PBC pour le système PCH dans le cas général [56] , [57].

#### V.5.6.1 la méthodologie de IDA-PBC

La méthode IDA-PBC a été introduite comme étant un procédé de contrôle des systèmes PCH de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = [J(x) - R(x)]\nabla H + g(x).u \\ y = g^T(x)\nabla H \end{cases} \quad (\text{V.45})$$

Où  $x \in \mathfrak{R}^n$  le vecteur d'état,  $u \in \mathfrak{R}^m$ ,  $m < n$  l'action de contrôle,  $H : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  l'énergie totale stockée.

$$J(x) = -J^T(x), R(x) = R^T(x) \geq 0$$

Sont respectivement les matrices d'interconnexion et d'injections naturelles. et  $u, y \in \mathfrak{R}^m$  des variables conjuguées dont le produit a l'unité de puissance [56].

### V.5.6.2 les techniques de IDA-PBC

On a proposé plusieurs techniques dans la littérature [55]:

#### V.5.6.2.1 IDA non paramétrisé

Les matrices de structure et d'amortissement ( $J_d(x)$  et  $R_d(x)$ ) sont fixées, le système d'équation ainsi obtenu et multiplié par une matrice annulatrice à gauche de  $g(x)$  et les équations aux dérivées partielles sont alors résolues.

#### III.5.6.2.2 IDA algébrique

On détermine tout d'abord la fonction Hamiltonien désirées  $H_d$  (par exemple une fonction quadratique en termes d'erreur) et alors on résoudre les équation algébriques obtenues pour  $J_d(x)$  et  $R_d(x)$ .

#### III.5.6.2.3 IDA paramétrisé

S'applique principalement pour les systèmes mécanique sous actionnés. le connaissance de la structure de la fonction Hamiltonien désirées  $H_d$  est utilisée pour avoir la solution plus facile de les équations aux dérivées partielles qui donnant des contraintes sur  $J_d(x)$  et  $R_d(x)$ .

#### V.5.6.2.4 IDA en entrelacé algebraic-paramétrés

Les équations aux dérivées partielles est évaluée dans certain sous système (ou la solution peut être facilement calculée) et les matrices  $J_d(x)$  et  $R_d(x)$ .

### V.5.6.3 Conception d'IDA-PBC

Se déroule comme suite :

En rappelant que PCH dans le cas des systèmes internes des échanges d'énergies sont captées par l'interconnexion et l'amortissement des matrices.

Dans le premiers lieu on finit la structure des matrices désirées d'où le nom IDA après nous dérivons PDE paramètres par le choix des matrices d'énergies.

Enfinement nous choisissons parmi tous cette famille celle qui satisfait le minimum d'énergie et trouvé le contrôle qui convient.

L'objectif final d'IDA-PBC c'est de trouver le contrôleur d'état statique avec boucle de retour  $u = \Gamma(x)$

En boucle fermé en dynamique du système PCH avec la dissipation de la forme :

$$\dot{x} = [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d}{\partial x}(x) \quad (\text{V.46})$$

Où la nouvelle fonction d'énergie  $H_d(x)$  a un minimum devisée à l'équilibre  $x^*$  avec

$J_d(x) = -J_d^T(x)$  et  $R_d(x) = R_d^T(x) \geq 0$ , sont respectivement les matrices d'interconnexions et d'amortissements [56]. [29].

#### V.5.6.4 Propriétés d'IDA-PBC

Les propriétés d'IDA-PBC sont :

##### V.5.6.4.1 L'énergie d'équilibre

Le mécanisme de stabilisation d'IDA-PBC est particulièrement clair lorsqu'elle est appliquée à un système PCH, avec certaines propriétés d'injections d'amortissement convenables. En effet l'amortissement naturel du système PCH satisfait [56] :

$$R(x)(\nabla H_a - \nabla H) = 0 \quad (\text{V.47})$$

$R_d(x) = R(x)$  (Le long de boucle fermée du système) la fonction d'énergie désirée a pour expression :

$$H_d(x) = H(x(t)) - \int_0^t u(s) \cdot y(s) ds \quad (\text{V.48})$$

IDA-PBC montre que la fonction d'énergie est la différence entre l'énergie stockée dans le système et l'énergie fournie par l'environnement. Cela montre que le contrôleur est à conservation d'énergie.

Donnons  $J(x, u)$  ;  $R(x)$  ;  $H(x)$  ;  $g(x, u)$  et l'équilibre désiré pour obtenir la stabilité  $x^* \in \mathfrak{R}^n$  ; et trouvons les fonctions  $\Gamma(x)$ ,  $J_a(x)$ ,  $R_a(x)$  et le vecteur  $k(x)$

$$[J(x, \Gamma(x)) + J_a(x) - (R(x) + R_a(x))] \cdot k(x) = [-J_a(x) - R_a(x)] \frac{\partial y}{\partial x}(x) + g(x, \Gamma(x)) \quad (\text{V.49})$$

### III.5.6.4.2 Préservation de la structure:

$$\begin{cases} J_d(x) = J(x, \beta(x)) + J_a(x) = -J[(x, \Gamma(x)) + J_a(x)]^T \\ R_d(x) = R(x) + R_a(x) = [R(x) + R_a(x)]^T \end{cases} \quad (\text{V.50})$$

### V.5.6.4.3 Intégrabilité:

$k(x)$  est le gradient du scalaire de la fonction

$$\frac{\partial k}{\partial x}(x) = \left[ \frac{\partial k}{\partial x}(x) \right]^T \quad (\text{V.51})$$

Les consignes d'équilibre  $k(x)$  à vérifier

$$k(x^*) = -\frac{\partial H}{\partial x}(x^*) \quad (\text{V.52})$$

La stabilité de Lyapunov, le jacobien de  $k(x)$ , à  $x^*$  satisfait la relation :

$$\frac{\partial k}{\partial x}(x^*) \gg -\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}(x^*) \quad (\text{V.53})$$

D'après ces conditions le système en boucle fermée  $u = \Gamma(x)$  devient un système PCH avec une dissipation de la forme :

$$\dot{x} = [J_d(x) - R_d(x)] \frac{\partial H_d}{\partial x}(x) \quad (\text{V.54})$$

Où :

$$H_d(x) = H(x) + H_a(x) \quad (\text{V.55})$$

$$\frac{\partial H_a}{\partial x}(x) = k(x) \quad (\text{V.56})$$

$x^*$  devient un équilibre stable en boucle fermée, il sera asymptotique si nous ajoutons un grand ensemble en boucle fermée dynamique contenu dans

$$\left\{ x \in \mathfrak{R}^n; \left[ \frac{\partial H}{\partial x}(x) \right]^T R_d(x) \frac{\partial H}{\partial x}(x) = 0 \right\} \quad (\text{V.57})$$

Égale  $\{x^*\}$ , une estimation dans une large bande  $\{x \in \mathfrak{R}^n, H_d(x) \leq c\}$  [56].

### V.5.6.5 Systèmes non linéaires généraux

On considère le système de la forme

$$\dot{x} = f(x) + g(x).u \quad (\text{V.58})$$

On suppose qu'il existe des matrices  $g^\perp(x); J_a(x) = -J_a^T(x); R_d(x) = R_d^T(x) \geq 0$

Et une fonction  $H_d : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  qui vérifie PDE.

$$g^\perp(x).f(x) = g^\perp(x) | J_a(x) - R_d(x) | \nabla H_d \quad (\text{V.59})$$

Où :

$g^\perp(x)C$  est la matrice annulatrice à gauche de  $g(x)$ , de rang complet.

$$g^\perp(x).g(x) = 0$$

et  $x_*$  telle que :

$$x_* = \arg \min H_d(x) \quad (\text{V.60})$$

Avec  $x_* \in \mathfrak{R}^n$  le point d'équilibre stable, donc le système en boucle fermée avec  $u = \beta(x)$

quand :

$$\Gamma(x) = [g^T(x).g(x)]^{-1} g^T(x) \{ | J_a(x) - R_d(x) | \nabla H_d - f(x) \} \quad (\text{V.61})$$

Prend la forme PCH :

$$\dot{x} = | J_a(x) - R_d(x) | \nabla H_d \quad (\text{V.62})$$

Avec  $x_*$  est un point d'équilibre stable (local), peut être asymptotiquement stable si de plus  $x_*$  est un minimum pour  $H_d(x)$  et représente le plus grand ensemble invariant sous les dynamiques en boucle fermée (V.62) [56].

$$\{x \in \mathfrak{R}^n \mid [\nabla H]^T R_d(x) \nabla H_d = 0\} \quad (\text{V.63})$$

Egale  $\{x^*\}$  est donnée par  $\{x \in \mathfrak{R}^n \mid H_d(x) \leq 0\}$

### V.5.7 la commande SIDA-PBC basée sur la considération de l'interconnexion et introduction de l'amortissement

La clé pour le succès de IDA-PBC est la solution de l'équation (V.64) :

$$f(x) + g(x)u = (J_d - R_d)\partial H_d \quad (\text{V.64})$$

Avec la motivation de l'élargissement de la classe des systèmes pour lesquels cette équation est résoluble nous proposons d'éviter la décomposition du contrôle en deux étapes (la mise en forme de l'énergie et l'injection d'amortissement).en revanche, nous suggérons d'effectuer simultanément les deux étapes et nous remplaçons (V.61) par l'équation de SIDA-PBC.

$$f(x) + g(x)u = F_d(x) \partial H_d \quad (\text{V.65})$$

et de remplacer les contraintes

$$J_d^T(x) = -J_d(x), R_d(x) = R_d(x)^T \geq 0 \quad (\text{V.66})$$

Par la condition strictement plus faible

$$F_d(x) + F_d^T(x) \leq 0 \quad (\text{V.67})$$

et de définir le contrôle comme suit :

$$u = [g^T(x)g(x)]^{-1} g^T(x)(F_d(x)\partial H_d - f(x)) \quad (\text{V.68})$$

Puisque l'ensemble des matrices anti-symétrique est strictement contenue dans l'ensemble des matrices symétrique définie semi – négative, il est clair que l'ensemble des fonctions  $\{f(x), g(x)\}$  pour les quelles (V.64) est résoluble et strictement inférieure à l'ensemble pour le quel (V.65), sous réserve que (V.67), soit résoluble [58].

#### Remarque

De même à IDA-PBC, l'application du SIDA-PBC s'ouvre également sur un système en boucle fermé de la forme (III-64) avec :

$$J_d(x,t) = \frac{1}{2}[F_d(x,t) - F_d^T(x,t)], R_d(x,t) = \frac{1}{2}[F_d(x,t) + F_d^T(x,t)].$$

SIDA-PBC peut être résumée dans la proposition suivante[58]:

#### Proposition

Soit un système dynamique sous la forme :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

Avec la loi de commande (V.69)

$$u = [g^T(x)g(x)]^{-1} g^T(x)(F_d(x)\partial H_d - f(x)) \quad (\text{V.69})$$

Est asymptotiquement stable pour  $x^*$  si :

$$x^* = \arg \min H_d$$

et

$$F_d(x) + F_d(x)^T \leq 0$$

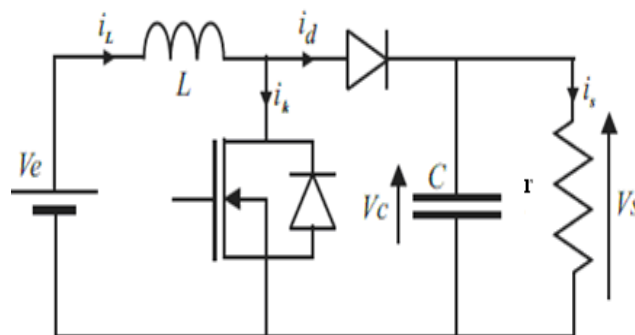
## V.6 Commande de convertisseur DC-DC par passivité

Dans cette section, nous allons mettre en application la méthode de synthèse de loi de commande fondée sur la passivité de convertisseur DC-DC (Boost).

### V.6.1 Correction par Assignment d'interconnexion et d'amortissement (IDA-PBC)

Considérer le modèle dynamique d'un convertisseur de puissance de poussée qui a été dépeint dans fig. 1. Les équations d'état du convertisseur sont :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = E - (1-u)v_C \\ C \frac{dv_C}{dt} = (1-u)i_L - \frac{v_C}{r_0} \end{cases} \quad (\text{V.70})$$



**Fig.V.8** : Schéma du convertisseur Boost

Nous pouvons alors écrire, en fonction des variables d'état, l'énergie emmagasinée dans un condensateur, qui joue le rôle de l'énergie potentielle  $V$  du système:

$$v_c = \frac{1}{2C} q_c^2 \quad (\text{V.71})$$

Et l'énergie magnétique d'une inductance, qui joue le rôle d'énergie cinétique T du système :

$$T = \frac{1}{2L} \Phi_L^2 \quad (\text{V.72})$$

L'Hamiltonien, qui représente l'énergie totale du sous circuit LC sans pertes, est alors simplement :

$$H = T + V = \frac{1}{2L} \Phi_L^2 + \frac{1}{2C} q_c^2 \quad (\text{V.73})$$

Soit le vecteur d'état : là où  $x_1$  est le flux magnétique par l'inducteur,  $x_2$  est la charge électrique dans le condensateur.

$$x = \begin{bmatrix} \Phi_L \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Li_L \\ Cv_c \end{bmatrix} \quad (\text{V.74})$$

L'Hamiltonien du système est alors :

$$H = T + V = \frac{1}{2L} \Phi_L^2 + \frac{1}{2C} q_c^2 = \frac{1}{2} x^T Q x \quad (\text{V.75})$$

Avec :

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \quad (\text{V.76})$$

Donc en dérivant l'Hamiltonien par rapport au vecteur d'état, nous obtenons :

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x} = Qx = \begin{bmatrix} \frac{\Phi_L}{L} \\ \frac{q_c}{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{V.77})$$

Ce qui conduit au modèle d'état :



$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1-u \\ u-1 & -\frac{1}{r_0} \end{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial x} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (\text{V.78})$$

Ce modèle peut être écrit sous la forme simplifiée :

$$\dot{x} = (J - R) \frac{\partial H}{\partial x} + g(x)E \quad (\text{V.79})$$

Où nous avons les matrices :

$$-J = \begin{bmatrix} 0 & u-1 \\ 1-u & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Antisymétrique.}$$

$$-R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_0} \end{bmatrix} \quad \text{Diagonale.}$$

$$-g(x) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$-R_a = \begin{bmatrix} r_a & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_0} \end{bmatrix} \quad R_d = \begin{bmatrix} r_a & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Diagonale.}$$

$$-R_d = R + R_a \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} R_d(x) = R(x) + R_a(x) \\ J_d(x) = J(x, u) + J_a(x) \end{cases}$$

Les points d'équilibre pour la tension désirée  $V_d$  de condensateur sont indiqués par

$$x_d = [x_{1d} \quad x_{2d}]^T \quad \text{avec} \quad x_{1d} = LV_d^2 / r_0 E, \quad x_{2d} = CV_d$$

$$\text{et } u_d = 1 - \frac{E}{V_d}$$

En pose que  $u$  est en fonction de  $x_2$  et indépendante au  $x_1$  :

$$u = \beta(x_2) \quad \text{et} \quad J_a(x) = 0$$

En prenant :

$$K(x) = [K_1 \quad K_2]^T = \frac{\partial H_a}{\partial x} \quad (\text{V.80})$$

Donc l'énergie totale désirée :  $H_d = H_a + H$

$$(J(\beta(x)) - R_d) \frac{\partial H_a}{\partial x} = R_a \frac{\partial H}{\partial x} + g(x)E \quad (\text{V.81})$$

Ce qui conduit a nous obtenons le système d'équations :

$$\begin{bmatrix} -r_a & u-1 \\ 1-u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L}x_1 \\ \frac{1}{C}x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (\text{V.82})$$

En résoudre le système d'équations (V.82) avec  $K_1$  et  $K_2$  sont des inconnues ce qui donne :

$$K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x_2}{r_0 C (1 - \beta(x_2))} \\ \frac{R_a x_2}{r_0 C (1 - \beta(x_2))^2} - \frac{r_a x_1 / L + E}{1 - \beta(x_2)} \end{bmatrix} \quad (\text{V.83})$$

$$\text{En à :} \quad \frac{\partial K_1(x)}{\partial x_2} = \frac{\partial K_2(x)}{\partial x_1} \quad (\text{V.84})$$

$$\text{En trouve:} \quad -\frac{r_a}{L(1 - \beta(x_2))} = -\frac{x_2 \dot{\beta}(x_2)}{r_0 C (1 - \beta(x_2))^2} - \frac{1}{r_0 C (1 - \beta(x_2))}$$

$$\text{En à donc :} \quad \frac{x_2 \dot{\beta}(x_2)}{1 - \beta(x_2)} = -\left(1 - \frac{Cr_a r_0}{L}\right)$$

$$\text{En sépare le deux variables :} \quad \frac{\dot{\beta}(x_2)}{1 - \beta(x_2)} = -\left(1 - \frac{Cr_a r_0}{L}\right) \frac{1}{x_2}$$

$$\text{En intègre les deux termes de l'égalité :} \quad \int \frac{\dot{\beta}(x_2)}{1 - \beta(x_2)} = -\left(1 - \frac{Cr_a r_0}{L}\right) \int \frac{1}{x_2} dx_2$$

$$\text{avec :} \quad \alpha = 1 - \frac{Cr_a r_0}{L}$$

$$\text{Donc :} \quad u = \beta(x_2) = 1 - c_1 x^\alpha \quad (\text{V.85})$$

$$\text{en calcule } c_1 \text{ par l'équation :} \quad \left. \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \right|_{x=x_2} = \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H_a}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_2} = 0 \quad (\text{V.86})$$

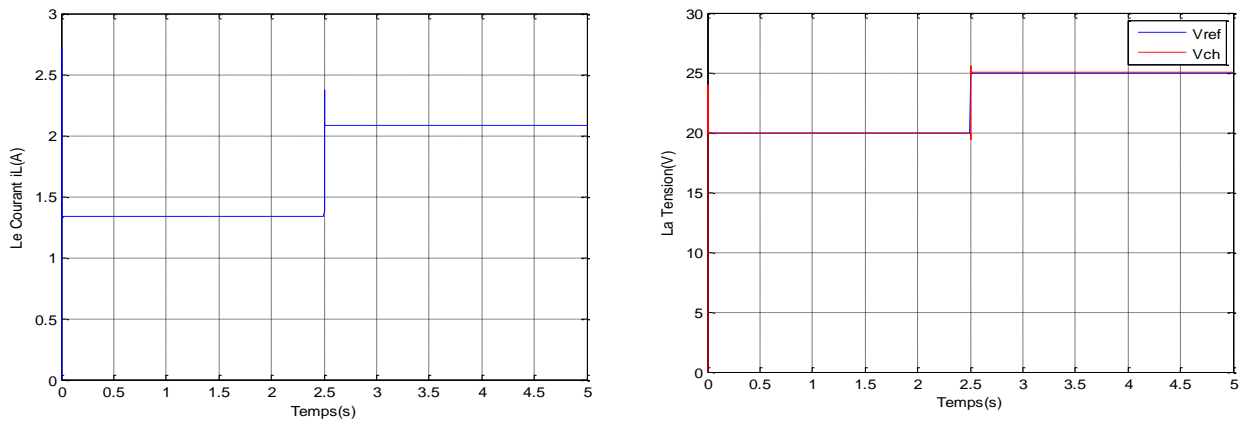
$$\text{en trouve :} \quad c_1 = (1 - u_d) / (CV_d)^\alpha$$

Ce qui donne une loi de commande non linéaire de la forme :

$$u = 1 - (1 - u_d)(x_2 / x_{2d})^\alpha \quad (\text{V.87})$$

### V.6.2 Résultats de Simulation et interprétation

Nous montrons, sur la Figure(V.9), les évolutions temporelles de la tension de charge le courant de self et de obtenu en simulation avec cette loi de commande sur un convertisseur Boost.



**Fig.V.9:** Simulations de loi de commande obtenues par IDA-PBC

Pour le convertisseur Boost

Au regard de ces résultats nous pouvons conclure que la commande par passivité est en mesure de fournir une loi de commande relativement rapide et stable dans tout le domaine de fonctionnement considéré. Elle permet de réguler directement la tension de sortie.

On constate un bon suivi de consigne pour la tension de sortie à  $t=0s$ , un échelon nul est appliqué, et à  $t=2.5 s$ , on fait un changement de signe pour la même consigne, la tension de hacheur suit toujours sa référence et obéit au changement de signe.

### V.7 Conception d'un contrôleur MPPT à base de passivité

Le schéma de la figure (V.10) représente un système qui constitue un générateur solaire GTE et GPV et un convertisseur DC-DC. L'optimisation de la puissance du panneau solaire est faite à l'aide d'un circuit de commande basé sur les données du générateur photovoltaïque et la technique de l'approche énergétique (passivité). L'algorithme fournit la tension de référence  $V_{ref}$  qui représente une poursuite du MPPINC.

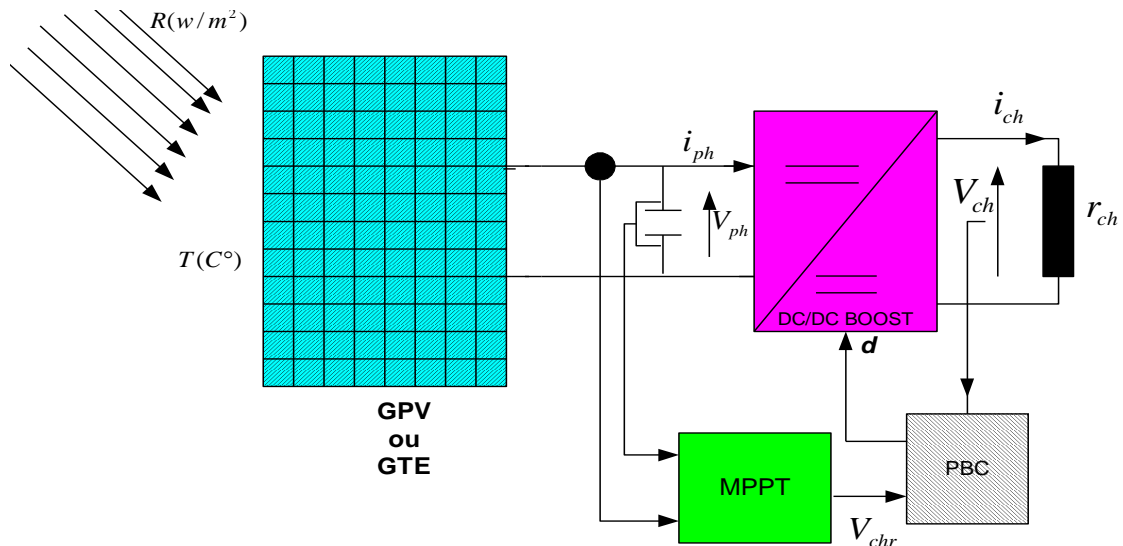
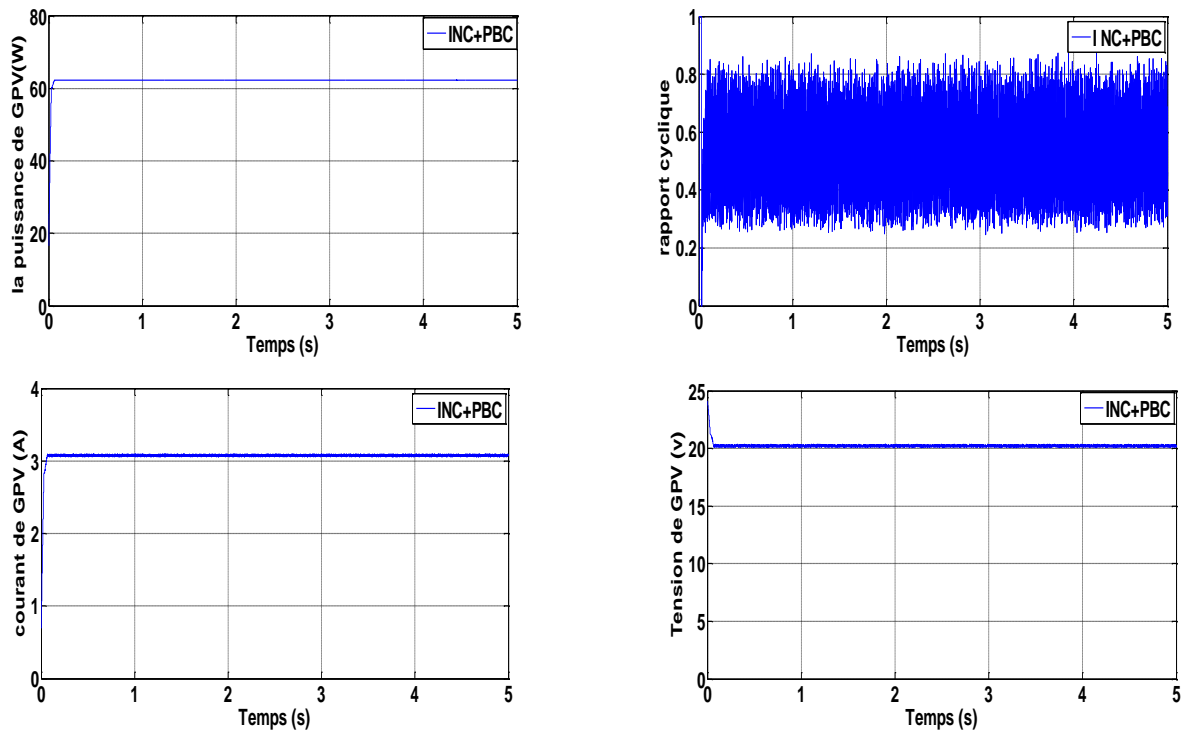
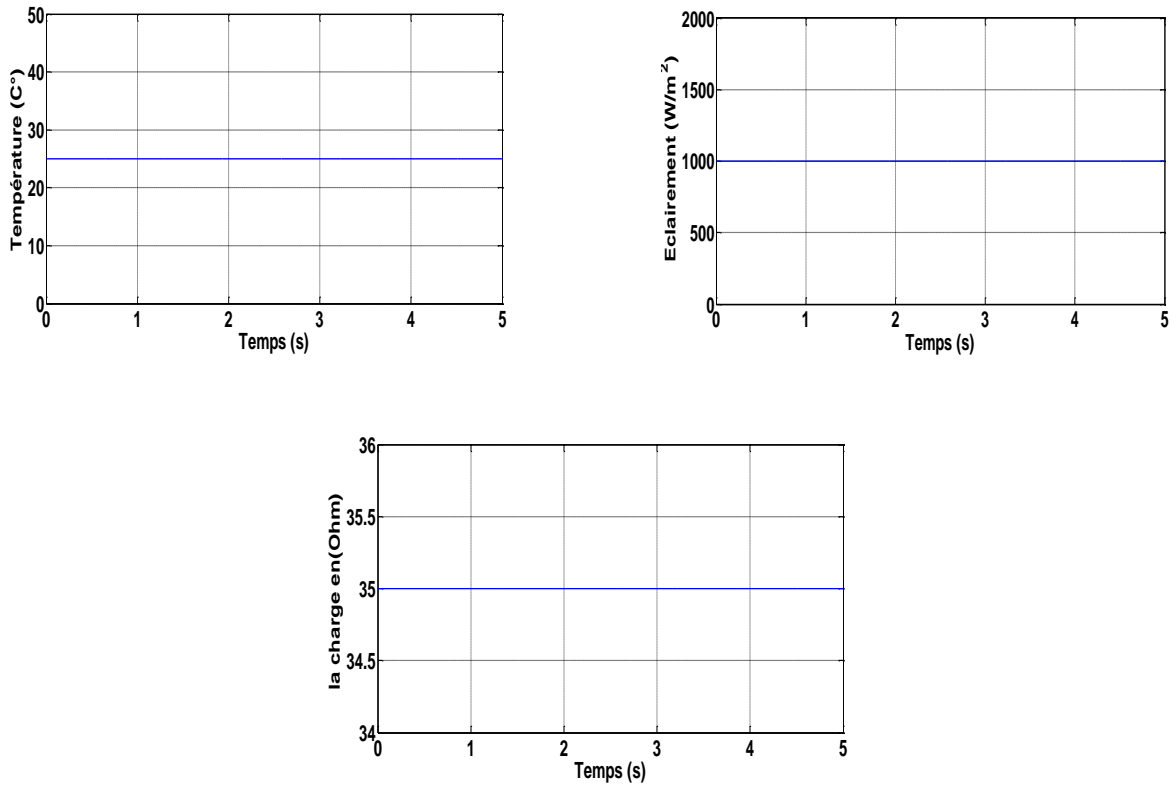


Fig.V.10 : Boucle de commande globale

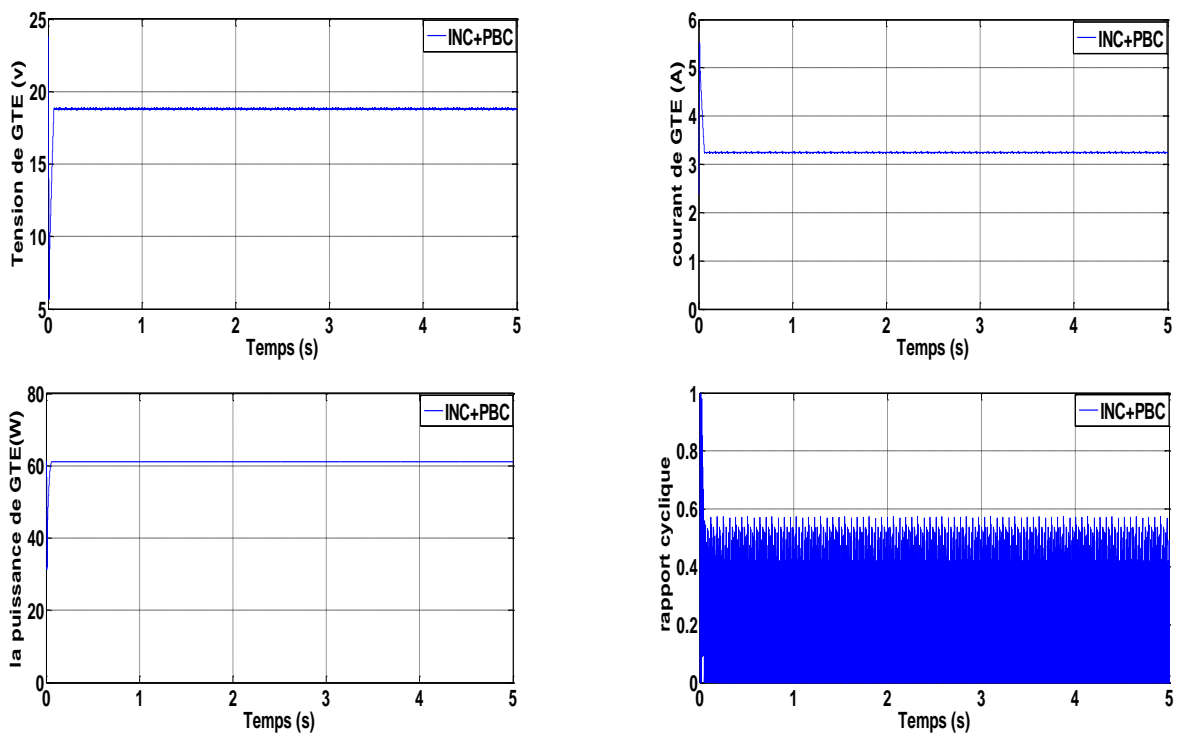
V.8 Résultats de Simulation et interprétation

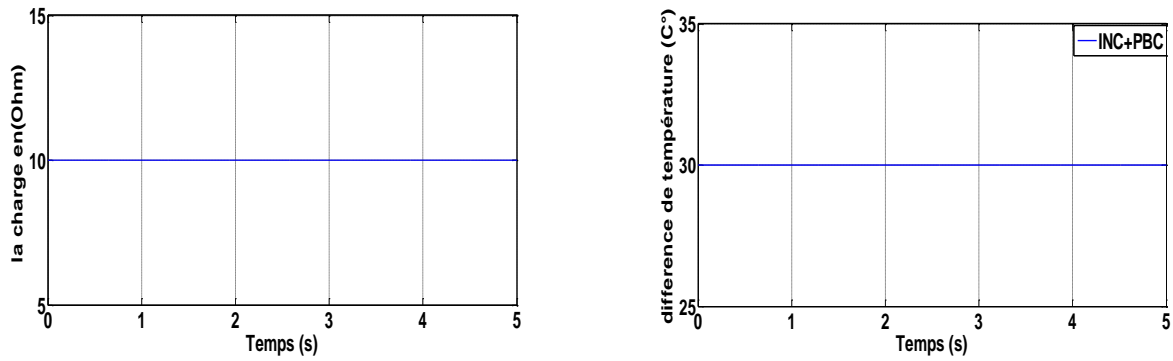
Les figures (V.11 et V.12) suivantes illustrent la variation de la puissance, courant tension , et rapport cyclique délivrée par le générateur en fonction de temps pour les conditions climatique (l'éclairement et température) standard par le régulateur IDA-PBC.





**Fig.V.11:** Réponses de commande INC PBC dans des conditions environnementales standard avec pas de tension égal  $dV = 0.001V$ .





**Fig.V.12:** Réponses de commande INC PBC dans des conditions environnementales standards avec pas de tension égal  $dV= 0.001V$ .

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (INCPBC) et montrent un meilleur fonctionnement du contrôleur par PBC. Ce dernier a prouvé qu’il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et qu’il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

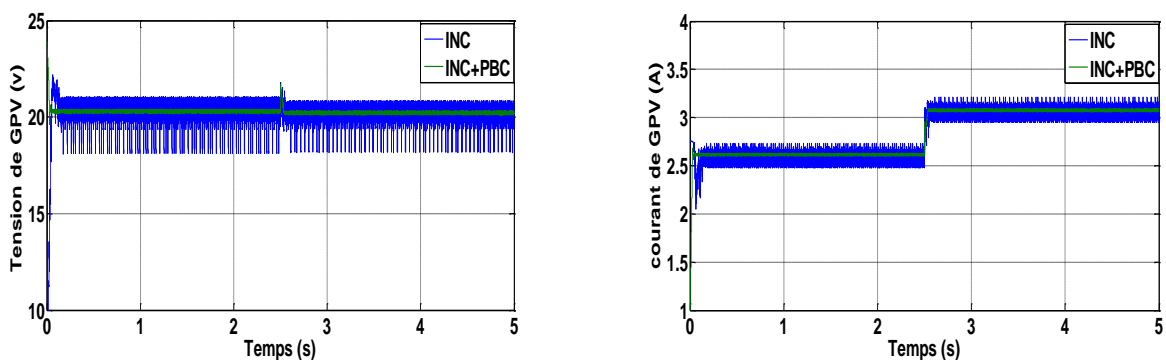
## V.9 Comparaison entre le régulateur INC et le INCPBC

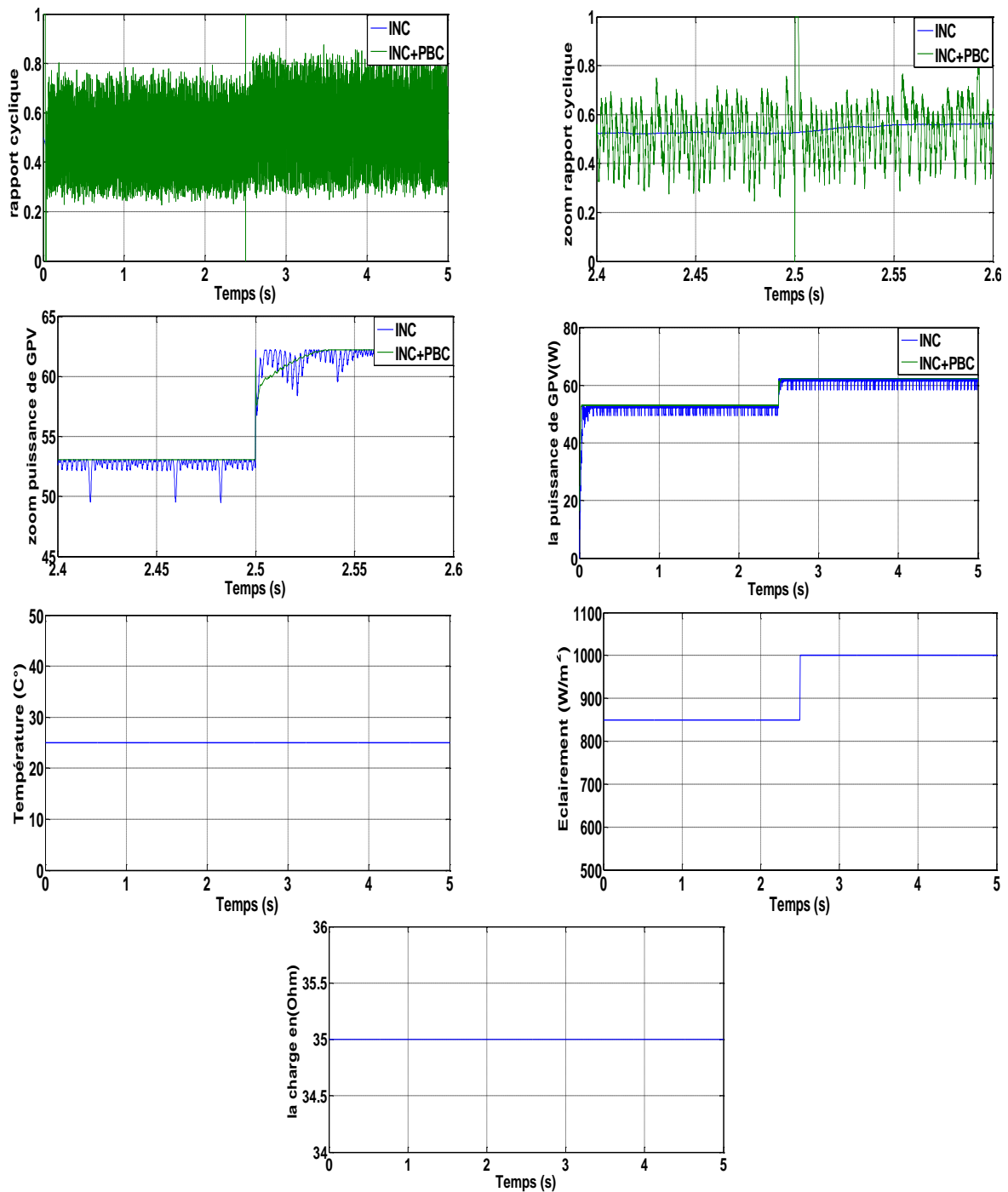
### V.9.1 Etude de la robustesse des MPPT INC et INCPBC appliquée sur GPV

Afin de valider le fonctionnement d’algorithme MPPT INCPBC et MPPT INC sur le GPV, on procède par l’introduction des variations sur les différentes grandeurs intervenantes sur le fonctionnement de MPPT. Pour cela, nous avons introduit des échelons pour quelques grandeurs à instant  $t=2.5s$ .

#### V.9.1.1 Variation d’ensoleillement

On suppose une augmentation de l’éclairement de  $850$  à  $1000 \text{ w/m}^2$  à instant  $t=2.5$  s. Les résultats de la simulation sont représentés sur la figure (V.13)

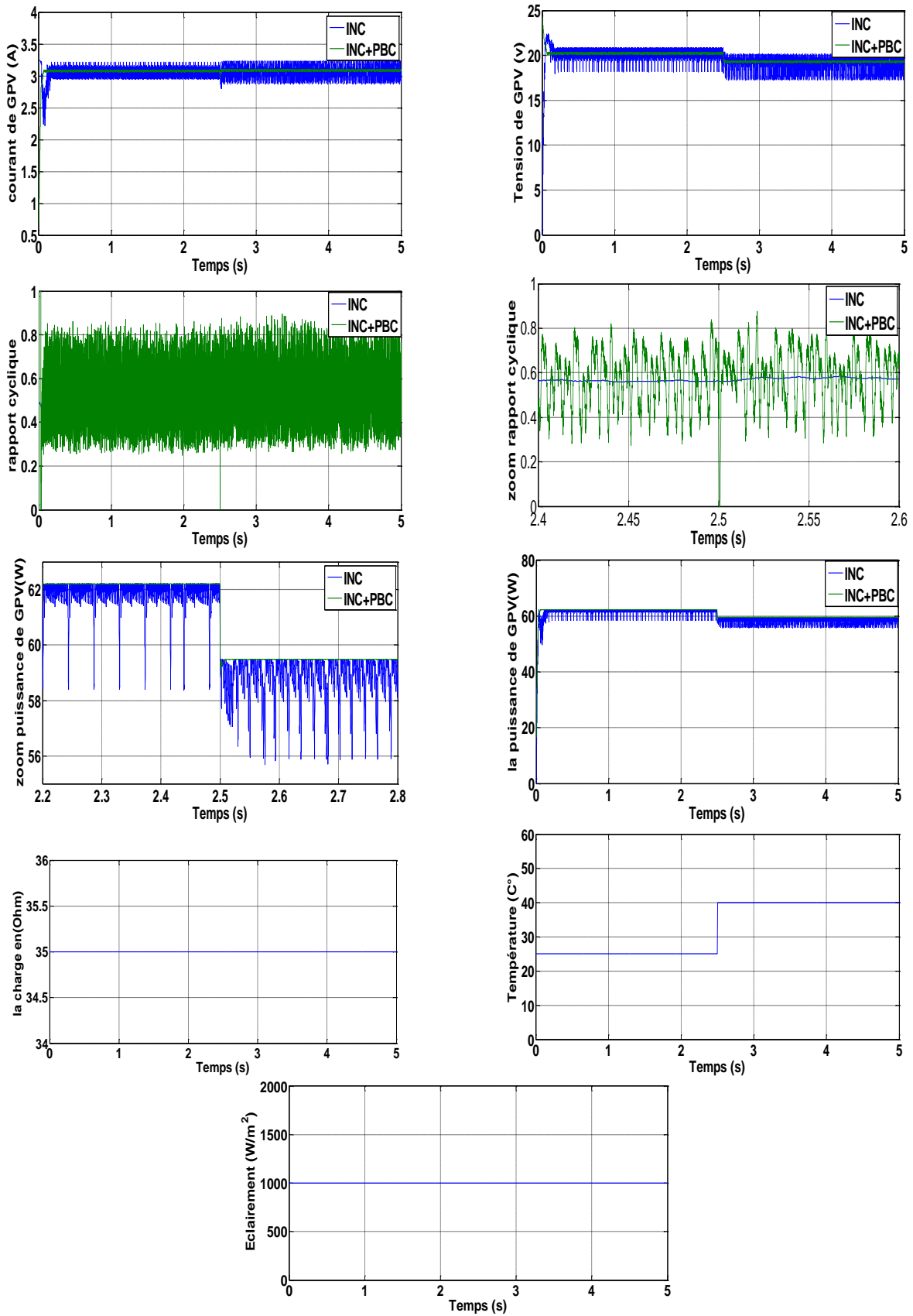




**Fig.V.13 :** Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une variation d’ensoleillement avec une température constante et charge constante.

### V.9.1.2 Variation de la température

On suppose une augmentation de la température de 25°C à 40°C à instant t = 2.5 s, les résultats de simulation sont représentés sur la figure (V.14)

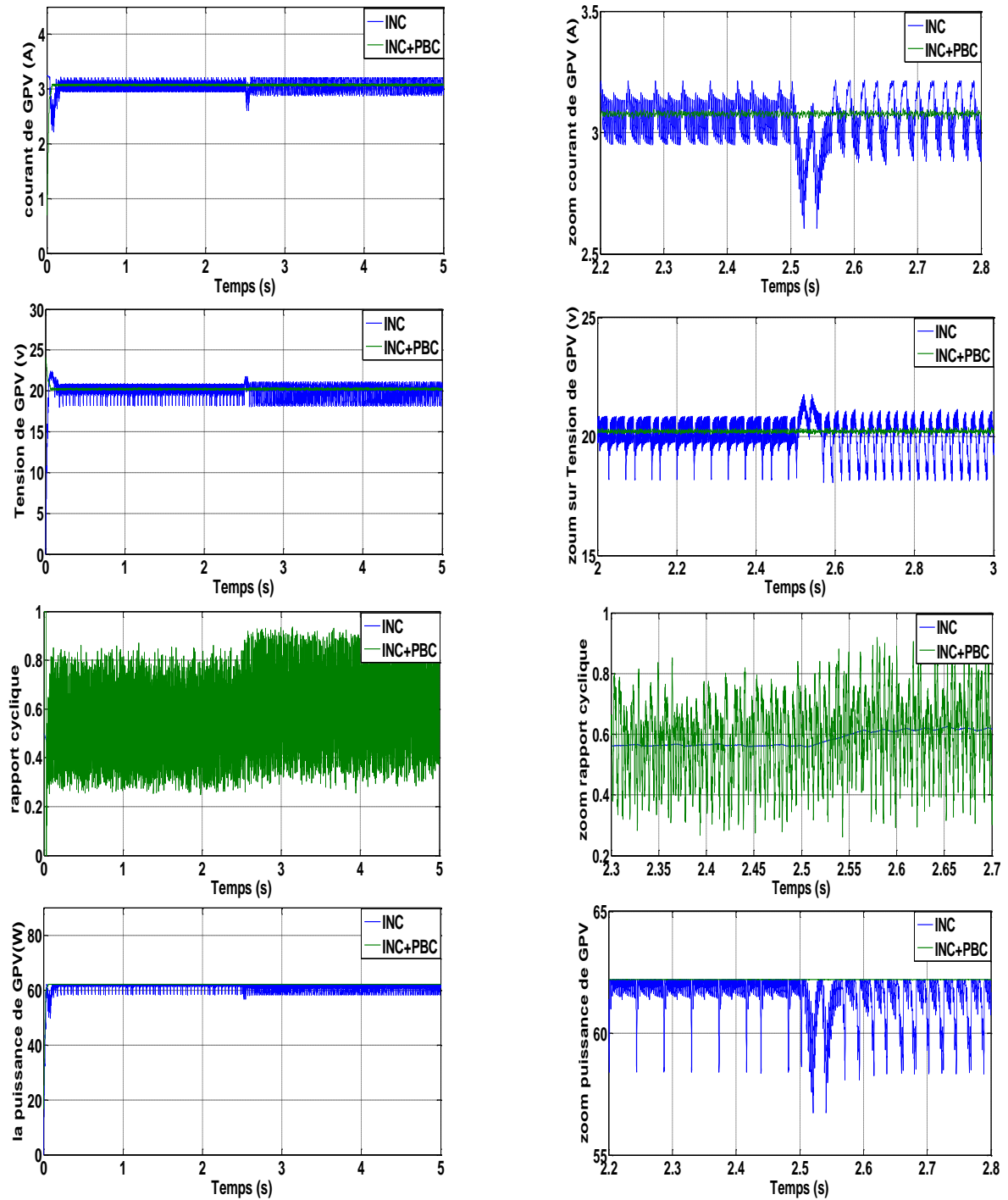


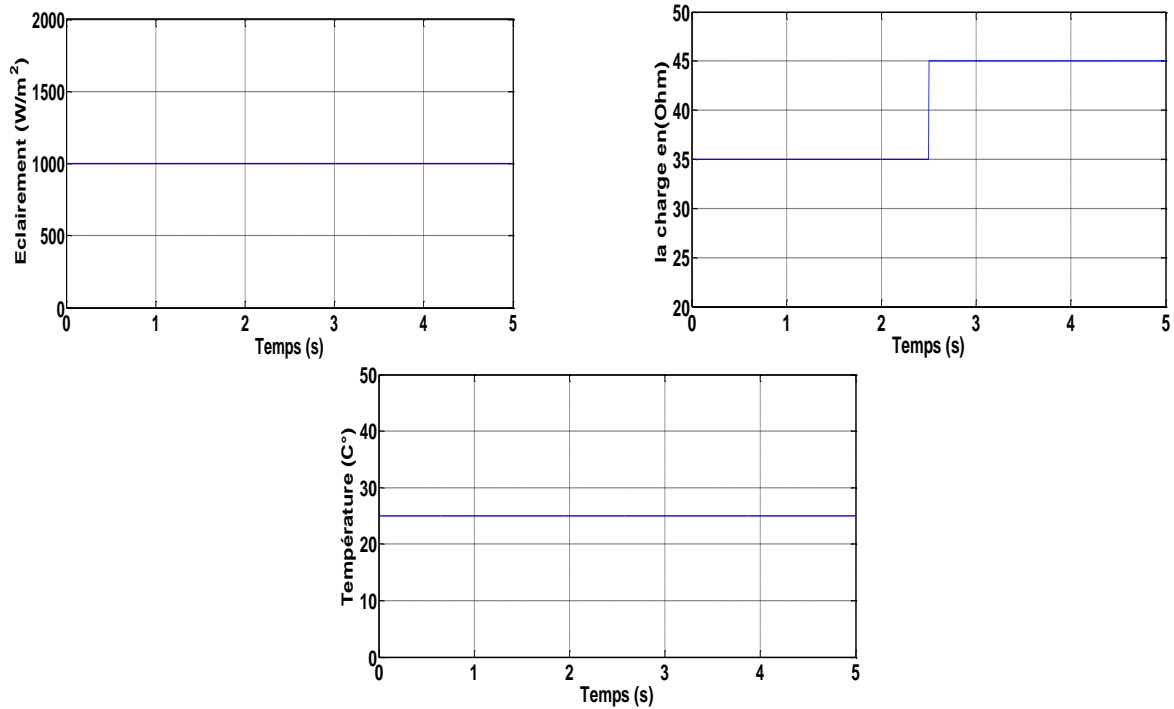
**Fig.V.14 :** Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une augmentation de la température de 25°C à 40°C avec un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup>.



V.9.1.3 Variation de la charge

On suppose une augmentation de la charge de 35 à 45 Ohm à instant  $t = 2.5s$ , les résultats de simulation sont représentés sur la figure (V.15)

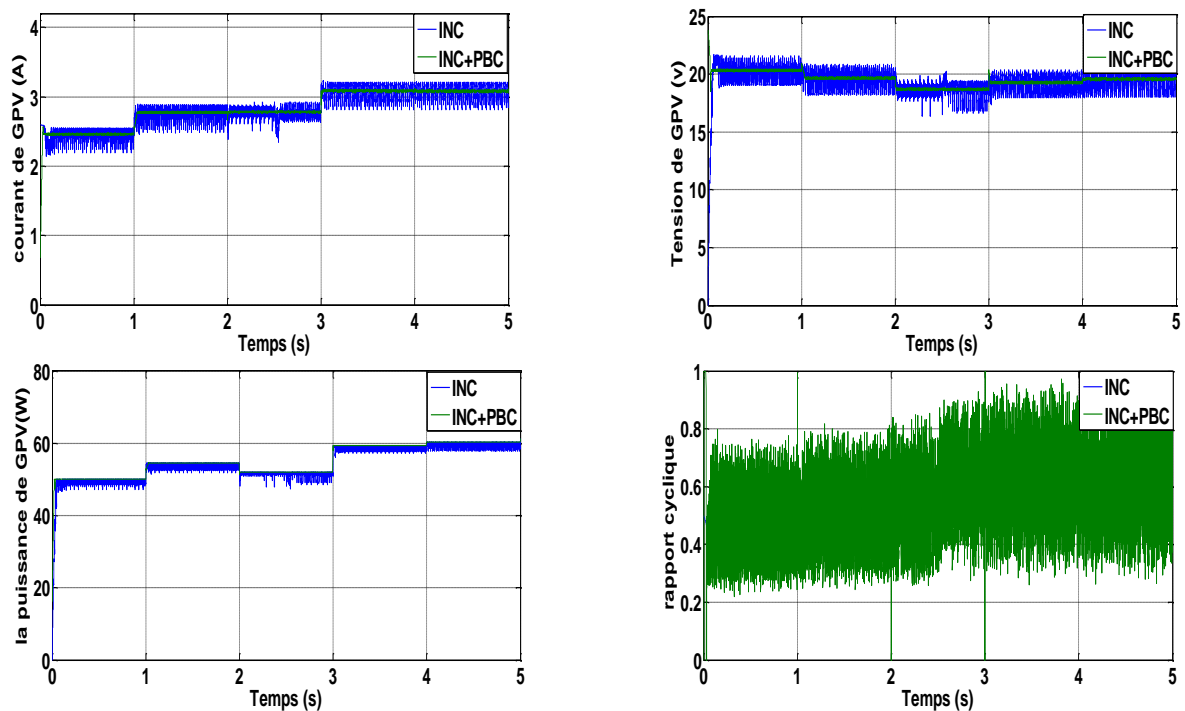


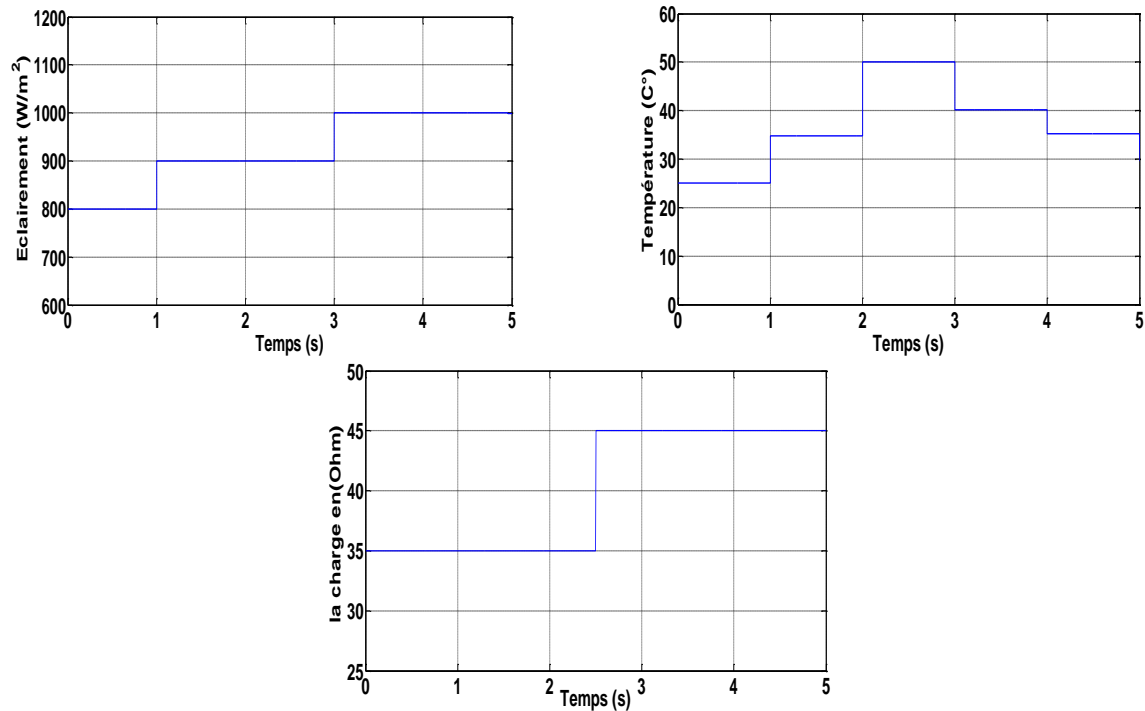


**Fig.V.15 :** Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une augmentation de la charge 35 à 45Ohm avec un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup> et température de 25°C

#### V.9.1.4 Variation de la charge, d’ensoleillement et de la température

Et enfin, on soumit les deux algorithmes MPPT à un changement à différentes paramètres la température, l’éclairement solaire et la charge au même temps, Les résultats de simulation sont représentés sur la figure (V.16).





**Fig.V.16 :** Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCPBC pour une variation de : l’ensoleillement, la température et la charge.

**V.9.2. Interprétation des résultats de GPV**

La figure (V.13), montre l’effet d’augmentation de la puissance, causée par une augmentation de l’ensoleillement, ce qui engendre une déviation du point de puissance maximale MPP pour les deux algorithmes avec d’augmentation de courant et de tension ainsi que le rapport cyclique. Une fois l’ensoleillement se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité avec moins de perturbation pour MPPT INCPBC. Cette dernière a permis d’obtenir un temps de réponse très réduit et de meilleures performances dynamiques avec des perturbations négligeables par rapport à MPPT INC.

La figure (V.14), montre que l’augmentation de la température implique une diminution de la puissance maximale pour les deux algorithmes avec diminution de tension ainsi que le rapport cyclique, ce qui provoque un déplacement du point de puissance maximale. Une fois la température se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité.

On constate aussi que, dans La figure (V.15), malgré le changement de la charge, les deux algorithmes MPPT ont conservé les valeurs optimales de la puissance du GPV avec

d'augmentation de rapport cyclique, et des perturbations négligeables pour MPPT INCPBC, donc un bon rendement.

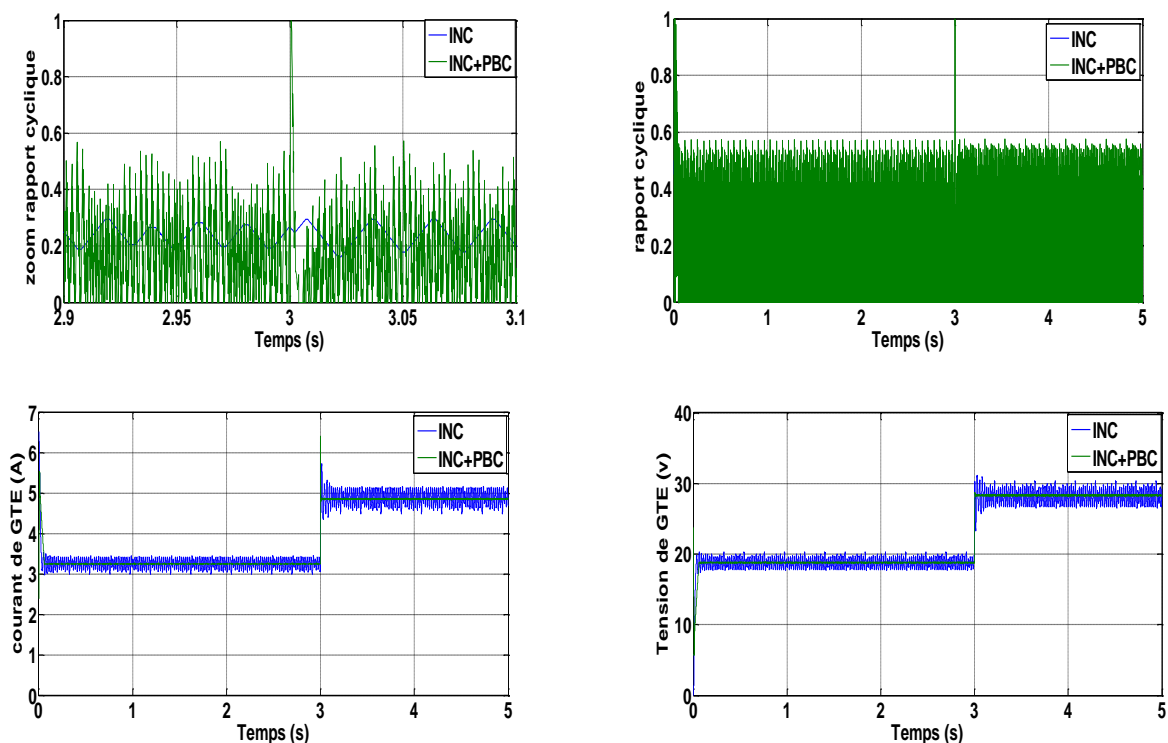
La figure (V.16) montre les performances de deux algorithmes dans le cas de variation de toutes les conditions climatiques et de la charge les résultats obtenus par cet essai montrent la bonne poursuite des deux algorithmes mais avec une rapidité et une stabilité plus élevée et moins perturbation En qualité des réponses du contrôleur MPPT INCPBC par rapport au contrôleur MPPT INC.

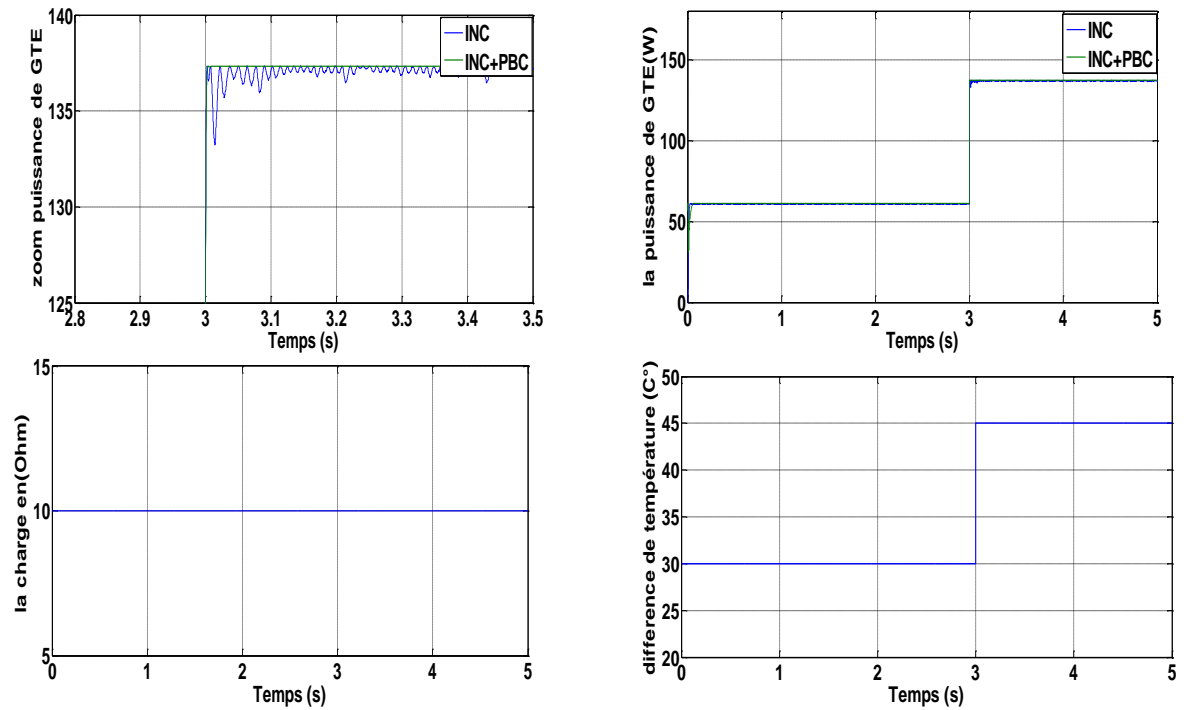
### V.9.3 Etude de la robustesse des MPPT INC et INCPBC appliquée sur GTE

Afin de valider le fonctionnement des algorithmes MPPT (INC et INCPBC) sur le GTE, on procède par l'introduction des variations sur les différentes grandeurs intervenantes sur le fonctionnement de MPPT. Pour cela, nous avons introduit des échelons pour quelques grandeurs.

#### V.9.3.1 Variation de Gradient de la Température

On suppose une augmentation de gradient de la température de  $30^{\circ}\text{C}$  à  $45^{\circ}\text{C}$  à instant  $t = 3$  s, les résultats de simulation sont représentés sur la figure (V.17)

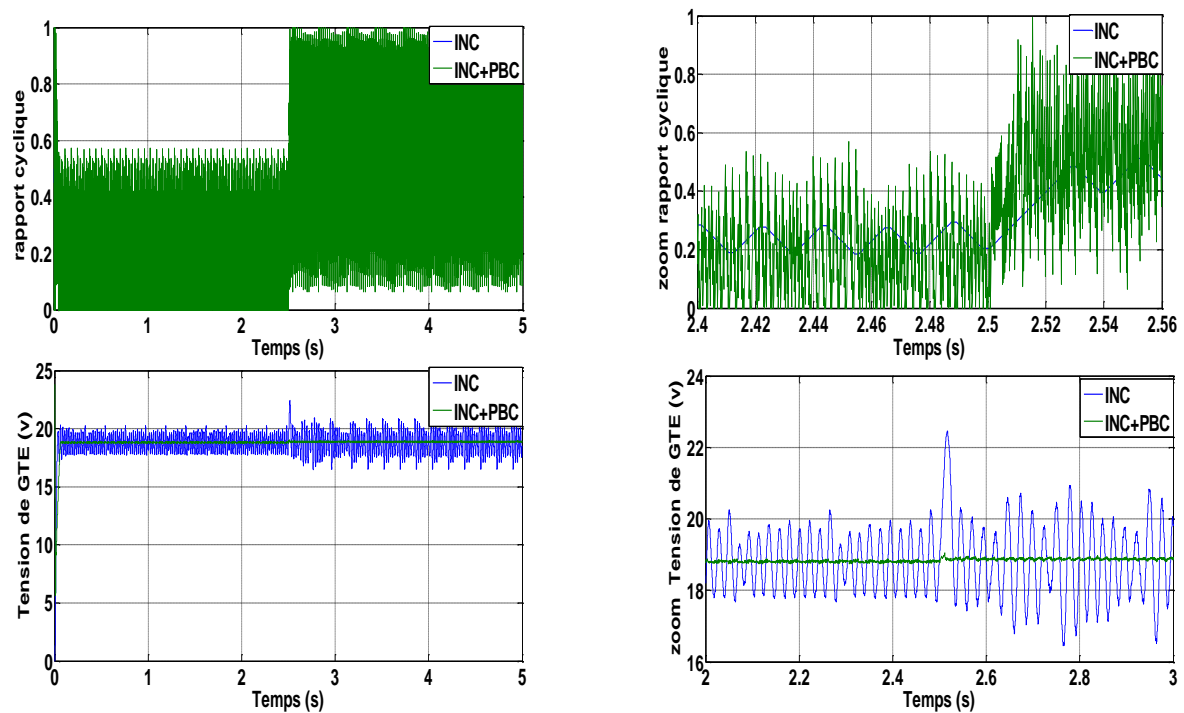


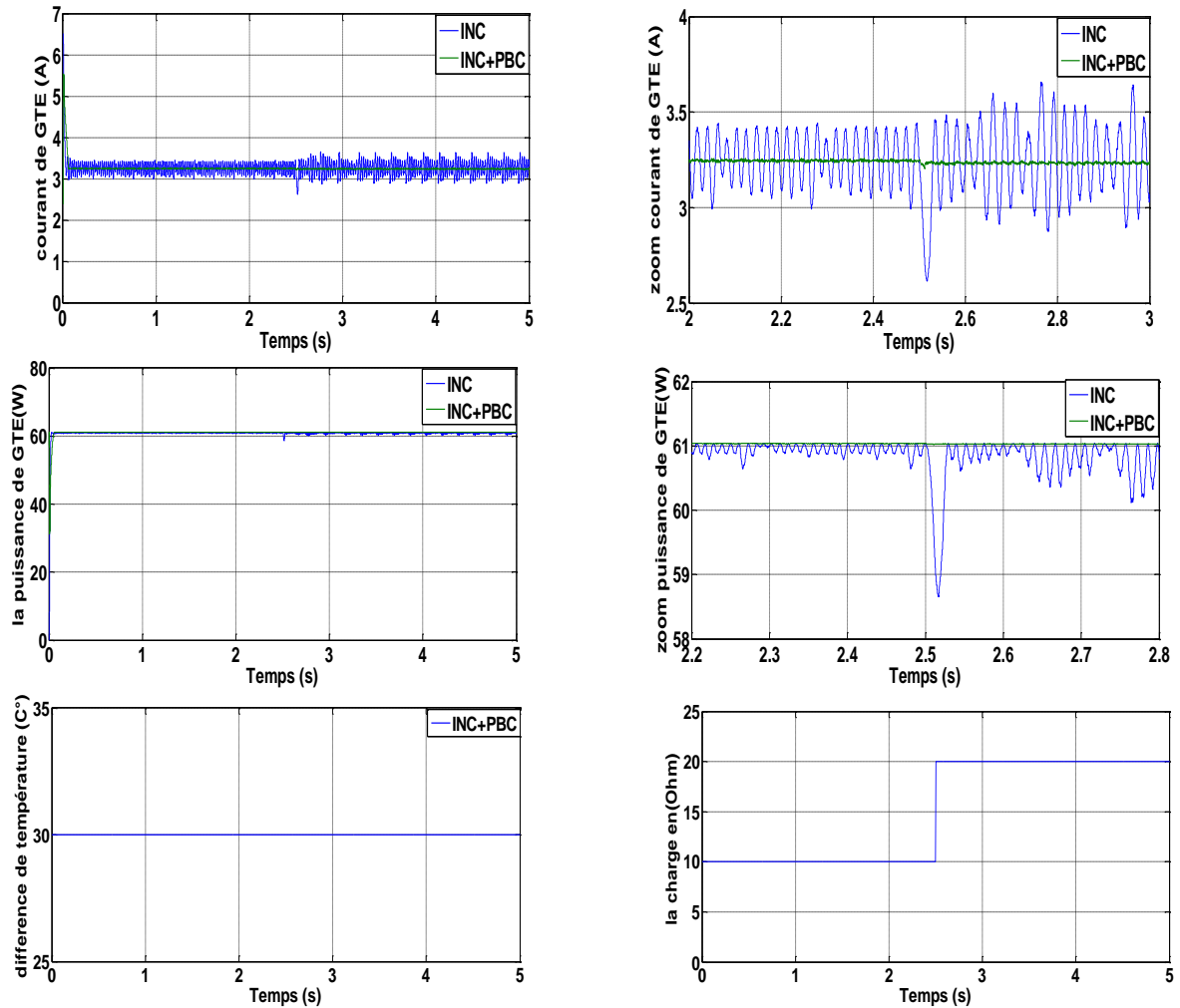


**Fig.V.17 :** Réponses des algorithmes MPPT P&O et MPPT INC pour une augmentation de gradient de la température de 30°C à 40°C avec une charge constante.

**V.9.3.2 Variation de la charge.**

On suppose une augmentation de la charge de 10 à 20 Ohm à instant  $t = 2.5s$ , les résultats de simulation sont représentés sur la figure (V.18)

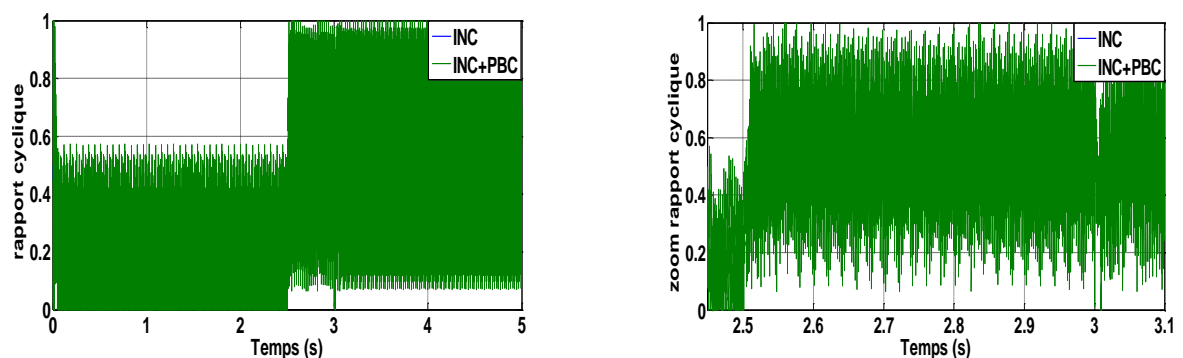


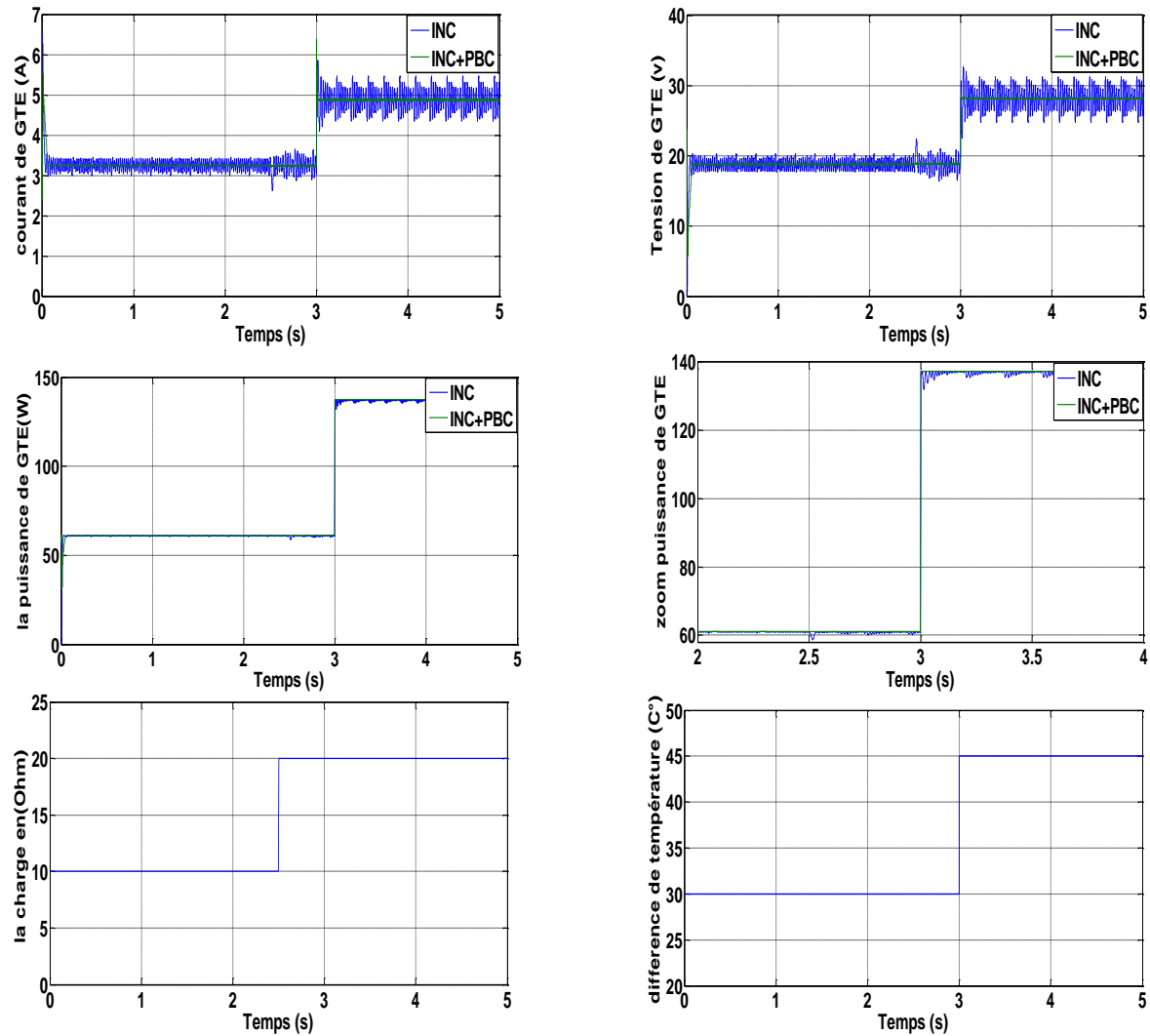


**Fig.V.18 :** Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT INCBPC pour une augmentation de la charge de 10 Ohm à 20 Ohm avec gradient de la température consent.

**V.9.3.3 Variation de la charge et de la température**

Et enfin, on soumit les deux algorithmes MPPT (INC et INCBPC) à un changement de différentes paramètres : la température et la charge au même temps, Les résultats de simulation sont représentés sur la figure (V.19).





**Fig.V.19 :** Réponses des algorithmes MPPT INC et MPPT PBC pour une variation de gradient de la température et de la charge.

### V.9.4 Interprétation des résultats de GTE

La figure (V.17), montre l'effet d'augmentation de la puissance de GTE, causé par une augmentation de gradient de la température, ce qui engendre une déviation du point de puissance maximale MPP pour les deux algorithmes avec d'augmentation de courant et de tension. Une fois le gradient de la température se stabilise, la puissance revient à son état de stabilité avec moins de perturbation pour MPPT INCPBC.

On constate aussi que, dans La figure (V.18), malgré le changement de la charge, les deux algorithmes MPPT ont conservé les valeurs optimales de la puissance du GTE et d'augmentation de rapport cyclique, avec des perturbations négligeables pour MPPT INCPBC, donc un bon rendement de cet algorithme.

La figure (V.19) montre les performances de deux algorithmes dans le cas de variation de toutes les conditions climatiques et de la charge .Les résultats obtenus par cet essai montrent la bonne poursuite des deux algorithmes mais avec une rapidité et une stabilité plus élevées et moins perturbation en qualité des réponses du contrôleur MPPT INCPBC par rapport au contrôleur MPPT INC.

### **V.10 Conclusion**

Finalement, L'application de la commande par passivité (IDA-PBC) pour la poursuite du MPP montre son efficacité et sa robustesse par rapport à l'autre commande proposée (MPPT P&O et MPPT INC) en qualité de la rapidité et de la diminution des perturbations vis-à-vis les variations climatiques ainsi que des paramètres du système.



# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est d'améliorer les performances et le rendement d'un système solaire (photovoltaïque et thermoélectrique) en faisant appel à un algorithme spécifique.

Dans cette investigation, les algorithmes Perturbation et Observation et Incrémenté Condense poursuivent le point de puissance maximale et permettent d'améliorer le problème des maxima locaux dans la courbe de puissance du GPV et GTE. Les algorithmes utilisés permettent d'éviter une mauvaise interprétation sur la localisation du MPP lors d'un changement rapide des conditions climatiques et la variation de la charge. Les résultats de la simulation montrent que les algorithmes MPPT proposés permettent d'améliorer le rendement du système de conversion d'énergie de GPV et de GTE de manière significative, mais restés toujours balancés autour le point de puissance maximale. Ces résultats sont dus de la nature des algorithmes eux-mêmes (Perturbation et Observation) en plus, les systèmes de conversion d'énergie solaire (photovoltaïque et thermoélectrique), le GPV, le GTE et le convertisseur à commutation présentent des caractéristiques non linéaires et à temps variant qui rendent le problème de la commande difficile. La linéarisation des modèles mathématiques permet de se ramener à un problème de commande simple mais elle ne conserve pas la dynamique exacte du système. C'est pourquoi cette approche de commande différentielle est utilisée pour la régulation de la tension de convertisseur d'énergie solaire (photovoltaïque et thermoélectrique). Elle est la commande par passivité ou par approche énergétique qui est parmi les commandes le plus solide et robuste dans le cas des systèmes non linéaires. Finalement, l'application de la commande par passivité (IDA-PBC) pour la poursuite du MPP montre sa efficacité et sa robustesse par rapport à l'autre commande proposée (MPPT P&O et MPPT INC) en qualité de la rapidité et de la diminution les perturbations vis-à-vis les variations climatiques ainsi que des paramètres du système.

Pour une éventuelle continuité du présent travail, il est possible d'énumérer quelques perspectives comme suite de cette étude dont on peut citer:

- Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT;
- Introduction d'autres types de convertisseurs DC-DC;
- Application dans les domaines de pompage et de production de l'énergie électrique.

# **Bibliographie**

### **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Antonio Luque and Steven Hegedus, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [2] F. Kininger, « Photovoltaic Systems Technology » , University of Kassel, 2003.
- [3] Anne Labouret, Michel Villoz, «Energie Solaire Photovoltaïque (2 Emme édition)» , Dunod, 2003.
- [4] R.A. Messenger, J. Ventre, « Photovoltaic Systems Engineering (Second Edition) » , CRC Press, 2004.
- [5] Tom Markvart & Luis Castaner, « Handbook of Photovoltaics : Fundamentals and Applications », ELSEVIER, 2003.
- [6] F.A. Farret, M. Godoy Simoes, « Integration of Alternative Sources of Energy » , John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [7] <http://www.sonelgaz.dz>.
- [8] Ministère de l'Énergie et des Mines, «Guide des Énergies Renouvelables», Édition 2007.
- [9] Brahimi (MEM), «Situation des énergies renouvelables en Algérie». Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marche, 2001, Alger, Algérie.
- [10] Rouzzi Abdelghani, «Analyse et Simulation d'une cascade onduleur Multi niveaux NPC à MLI en utilisant les sources photovoltaïques» Mémoire D'ingénieur d'état 2009 Université Mentouri Constantine, 2009.
- [11] L Zarour, «Optimisation de la performance d'un système de Pompage Photovoltaïque à l'aide d'un Moteur Asynchrone», thèse magister, Université de science et Technologie d'Oran 2005.
- [12] A. Mirecki, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse Docteur, Constantine, 2005.
- [13] M. Angel, «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques». Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, septembre 2006.
- [14] Belhadj Mohammed, «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », thèse magister, Centre Universitaire De Bechar 2007.
- [15] Bensaci Wafa, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

adapté par une commande MPPT », thèse de Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla 2011.

[16] Makhlouf Messaoud, « modélisation et optimisation de systèmes de Production d'énergies renouvelables couples au réseau », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2012.

[17] Djeriou Salim, «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone», thèse magister, université Ferhat Abbas de Setif , 2011.

[18] Daoudi Ali, «Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque », thèse magister, Université Mentouri Constantine, 2009.

[19] B.Chaouki, «Optimisation floue neuronale et génétique d'un système Photovoltaïque connecté au réseau», Mémoire ingénieurs.Biskra, 2007.

[20] J. Royer, « Le pompage photovoltaïque», Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa /EIER/CREPA .Canada, 2006.

[21] D. BOUDEMAGH «Synthèse et Etude de Matériaux Thermoélectriques du Système Mg<sub>2</sub>Si<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>»Thèse de doctorat, Université DE Grenoble Mars 2010

[22] A.JACQUOT «Ingénierie des Matériaux et des Microgénérateurs Thermoélectriques Planaires »Thèse de doctorat, l'Institut national Polytechnique de Lorraine Mars 2003

[23] M. Gerl, J.-P. Issi, «Physique des Matériaux», Chapitre 8, Presses Polytechniques et Universitaire Romandes ,Lausanne, 1997.

[24] A. Linder, «La thermoélectricité», Chapitre 3, Presses Universitaires de France, Paris, 1970.

[25] D. Kenfai «Etude des propriétés mécaniques et thermoélectriques des matériaux Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> texturés pour la conversion d'énergie », doctorat de l'université de Caen ,2010

[26] L. Protin, «Convertisseurs photovoltaïques», Technique de l'ingénieur, traité génie électrique 2001.

[27] P. Vas, «Modélisation numérique des moteurs BLDCM et hybride destinés à des systèmes solaires de pompage d'eau», thèse magister, université Batna, 2005.

[28] Soltane Belakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédié aux énergies Renouvelables», thèse doctorat, université de Constantine, 2010.

[29] M. Hadjab, « Développement des performances d'un système photovoltaïque», mémoire de Magister, université de Sidi BèlAbbès, Jan 2011.

- [30] Cabal Cédric, « optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électrique dédié à la conversion photovoltaïque », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2008.
- [31] Akihiro Oi, « Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System » Faculty of California Polytechnic State University, 2005
- [32] H. Knopf, « Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle » Portland State University, 1999
- [33] N. Pongratananukul, « Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems » University of Central Florida, 2005
- [34] M. Angel Cid Pastor, « Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques » Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006
- [35] T. Edward Persen, « FPGA-Based Design of a Maximum-Power-Point-Tracking System for Space Applications » University of Florida, 2004
- [36] T. Eswam, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior Member, IEEE, « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques » IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006
- [37] « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque » M.Hatti, IEEE Member, , JCGE.08 LYON, 16 et 17 décembre 2008
- [38] M. A. S. Masoum and M. Sarvi, « Design, Simulation and Implementation of a Fuzzy-Based MPP Tracker Under Variable Insolation and Temperature Conditions », Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 29, No. B1, 2005
- [39] H. Boumaaraf1, A. Talha, « Modeling of a Photovoltaic Panel and the Search for its Maximum Power Point Tracking », EFEEA ». 10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, 2010
- [40] W. Xiao, « Improved Control of Photovoltaic Interfaces » The University of British Columbia, 2007.
- [41] H. K. Khalil, « Nonlinear systems. Prentice Hall, New Jersey, third édition, » 2002.
- [42] Romeo Ortega, Antonio Loria, Per J Nicklasson, and Hebertt Sira-Ramírez, « Passivity-based control of Euler-Lagrange systems. Mechanical, electrical and electromechanical applications. Springer-Verlag, » 1998.
- [43] M. Miguel Magos Rivera, « la modélisation des systèmes dynamiques à topologie variable : une formulation Hamiltonienne à ports paramétrée », thèse doctorat, l'université claud bernard - lyon I, 2005

- [44] Romeo Ortegat, Antonio Loria, Rafael Kelly and Laurent Praly, «on passivity-based output feedback global stabilization of Euler-lagrange systems », Articl, Université de Compiègne France.
- [45] Humberto Gonzalez , Manuel A. Duarte-Mermoud, Ian Pelissier , « A novel induction motor control scheme using IDA-PBC», Articl, University of Chile, Casilla 412-3, Santiago, Chile,2008.
- [46] Nima Yeganefar, « définitions et analyse de stabilités pour les systèmes à retard non linéaires», thèse doctorat, l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2006.
- [47] Antonio Loria, « contrôle de systèmes Euler-lagrange par retour d'état», thèse doctorat, université de technologie de compiégne, 1996.
- [48] Jérôme Jouffroy, « Stabilité et systèmes non linéaires : Réflexions sur l'analyse de contraction», thèse doctorat, L'université de savoie, 2002.
- [49] Philippe Mullhaupt, «Introduction à l'Analyse et à la Commande des Systèmes Non Linéaires», thèse doctorat, 2006.
- [50] C.C.DE WIT , « optimisation discrétisation et observateurs commande des moteurs asynchrone»,livre,Hernés science publication,2000.
- [51] Lin-Goei Shiau, Jong-Lick Lin, ying-juh , « passivity-based control for induction motor drives with voltage-fed and current-fed inverters»,Articl, Departement of Engineering Science, National Cheng Kung University, Tainan 710, Taiwan ,Roc. October 1999.
- [52] Xi, Z, cheng, D. and lam, J, « Adaptive stabilization of generalized Hamiltonian systems with dissipation and its application systems »,int J.of system science,vol.33,no.10,pp. 839-846,2002.
- [53] I. Cbyrnes, A.Isidori,J .C.Willems, « passivity,feedback equivalence,and the global stabilization of minimum phase nonlinear systems »,IEEE Transaction on Automatic Control,1991,36 (11): 1228-1240.
- [54] Acosta, J.A, Ortega and Astol « interconnection and damping assignment passivity-based control of mechanical systems with underactuation degree one .American control conference,Boston,USA,june 30,july 2,2004.
- [55] Arnau Doria-cerezo « modelling, simulation and control of doubly-fed induction machine controlled by a back-to-back converter», thesis doctorat, universitat politécnica de catalunya, juliol Del 2006.
- [56] R.Ortega, A.van der schaft, B.Maschke, et al « interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems », Automatica, 2002, 38(4):585-596.

[57] Maschke, B. and van der Schaft, A.J. « port controlled Hamiltonian representation of distributed parameter systems. procs. IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian methods in nonlinear systems, Princeton, USA, March 2000.

[58] R Ortega G. Espinosa-Pérez, « Passivity-Based Control with simultaneous energy-shaping and damping injection: the induction motor case study », Articles, Laboratoire des Signaux et Systèmes, SUPELEC, Plateau du Moulon, Gif-sur-Yvette 91192, FRANCE.



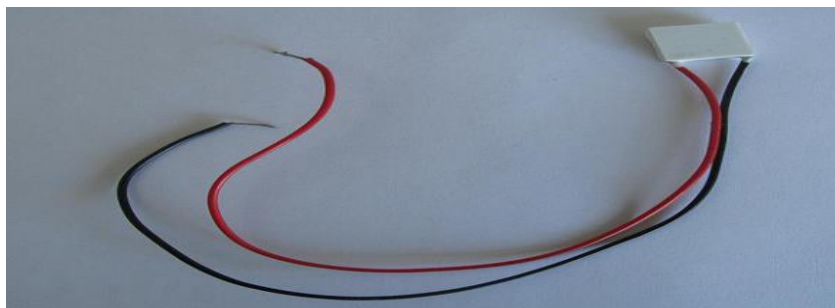
# **ANNEXE**

ANNEXE

**Les Paramètres du générateur photovoltaïque utilisé :**

- Le photo-courant :  $I_{ph} = 3.25A$
- L'ensolleiment standard :  $E=1000W / m^2$
- La bande-gap de semi-conducteur :  $E_g = 1.76ev$
- Constante de Boltzmann :  $K = 1.38e - 23J / K$
- Charge de l'électron :  $q = 1.6e - 19C$
- La température standard :  $T=298^{\circ} K$
- Le facteur d'idéalité de la jonction P-N de diode ( $1 < n < 3$ ).
- La résistance parallèle de GPV :  $30\Omega$
- La résistance série de GPV :  $15e - 3\Omega$
- Le nombre de cellules en série de GPV utilisée :  $N_s = 36$  Cellules

**Les Paramètres d'Elément du générateur Thermoélectrique utilisé :**



**Figure 1:** Elément de celles T E ECT-310

Caractéristique d'Elément TE ECT-310 développé par EnOcean	
type	TEC2L-15-15-5.6/73CS
Constante de Seebeck V/K	12.5 mV/K
Résistance interne	1.44Ω
la conductivité thermique	0.046W/K
La taille de module	14.0×14.0×5.0mm

**Les paramètres du convertisseur DC – DC (hacheur-boost) utilisée :**

- L'inductance :  $L = 0.03H$
- Les capacités :  $C_1 = 1000E - 6F$  ,  $C_2 = 54E - 6F$

## ANNEXE

- fréquence de la porteuse:  $f_p = 23\text{KHz}$  pour la technique MLI

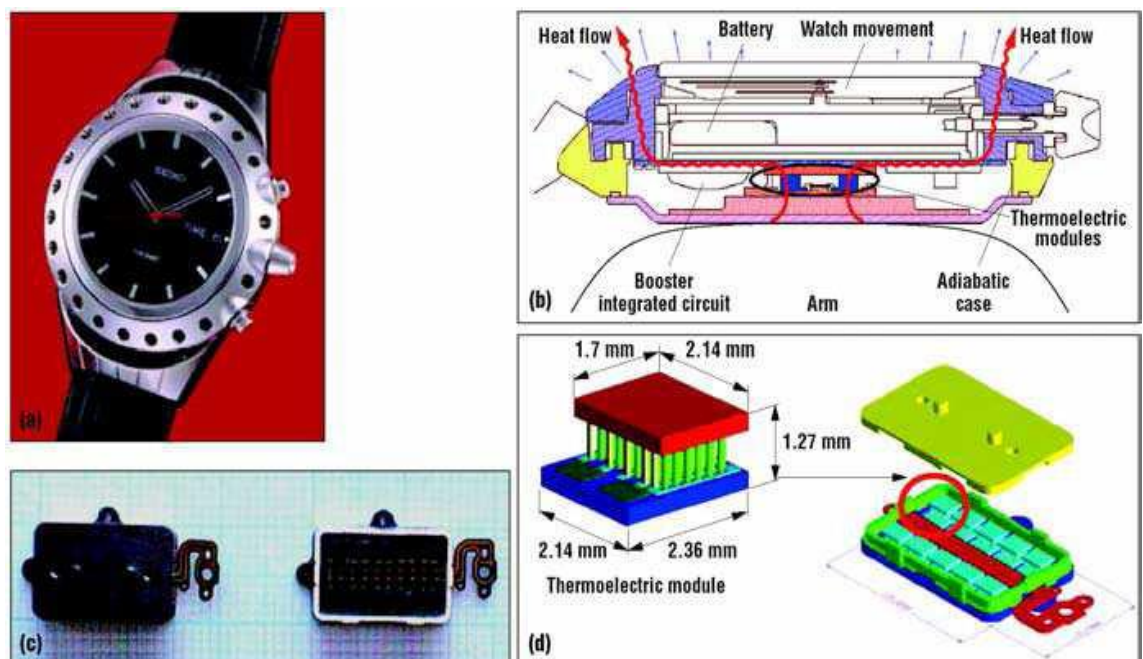
### Principe de la la technique MLI

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation). Le signal de contrôle de l'interrupteur  $S$  devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique  $D$  et une tension en dents de scie  $V_{DS}$  comme suit :



- Lorsque  $D > V_{DS}$  :  $S = 1$ , l'interrupteur  $S$  est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque  $D < V_{DS}$  :  $S = 0$ , l'interrupteur  $S$  est commandé à l'ouverture (état OFF).

### Applications thermoélectriques actuelles



**Figure 2:** Montre Thermique Seiko : (a) le produit ; (b) coupe transversale; (c) modules Thermoélectriques ; (d) schéma d'un module thermoélectrique. (source Seiko)