



Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Electrotechnique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

COMMANDE ADAPTATIVE ET IDENTIFICATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Présenté par : HAMMACHI Seif Eddine & BOUREMEL Mahdi

Encadrant : Pr. BAHY Tahar Professeur Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

ZARZOURI Nora	MCB	UBMA	Présidente
BAHY Tahar	PROF	UBMA	Encadrant
LAKHDARA Amira	MAB	UBMA	Examinatrice

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

*Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes au monde
qui sont mes parents, pour tous leurs amours,
encouragements, conseil, sacrifices, patiences et confiance.*

*À mes frères et mes sœurs. À toute ma famille sans oublier
mes chers amis.*

Seif eddine

Dédicace

Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie ,ma mère.

A celui qui m'a fait de moi un homme, mon père.

A mes chers Frères et Sœurs.

A tous mes amis de promotion 2^{ème} année master CE en électrotechnique et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

A tous les membres de ma famille et tout personne qui porte le nom BOUREMEL.

Mahdi

Remerciements

Nous remercions,

***Tout d'abord « Allah » qui nous a donné la force
et la patience nécessaires pour réaliser ce modeste
travail de projet de fin d'études Master.***

***Notre encadreur Pr. BAHJ Tahar ; également
tous les enseignants du département
d'électrotechnique.***

Tous nos collègues et étudiants de Promotion.

***Et, enfin, tous ceux qui nous ont aidé de près ou de
loin à réaliser ce travail.***

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEME SOLAIRES	
1. Généralités sur les systèmes Photovoltaïques	02
1.1 Introduction.....	02
1.2 Conception des systèmes solaires	03
1.2.1 Système solaire autonome	03
1.2.2 Système solaire non autonome	03
1.3 Principe de la conversion photovoltaïque	05
1.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	05
1.5 Constitution d'un système photovoltaïque	08
1.5.1 Connexion en série	08
1.5.2 Connexion en parallèle	09
1.6 Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque.....	10
1.7 Simulation et discussion	12
1.8 Conclusion	15
CHAPITRE II CONVERTISSEUR BOOST ET COMMANDE DE SUIVI DE LA PUISSANCE MAXIMALE	
2.1 Introduction.....	16
2.2 Définition et principe d'un hacheur	16
2.3 Différents types des hacheurs	17
2.3.1 Hacheur série.....	17
2.3.2 Hacheur parallèle	18
2.3.3 Hacheur abaisseur- élévateur (Buck-Boost Converter)	19
2.4 Les expressions des gains en tension des trois (3) types des convertisseurs.....	19
2.5 Structure et fonctionnement du hacheur boost	20
2.5.1 Présentation de la structure	20
2.5.2 Conduction continue	21
2.5.3 Conduction discontinue.....	27
2.6 Dimensionnement du hacheur.....	28
2.6.1 Détermination de la valeur d'inductance L	29
2.6.2 Détermination de la valeur de capacité C :	30
2.7 Commandes de suivi du point de puissance maximale.....	30
2.8 Principe de la commande MPPT.....	31
2.9 Classification des commandes MPPT	33
2.9.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée.....	33
2.9.1.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée	33
2.9.1.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie.....	34

2.9.2	Classification des commandes MPPT selon le type de recherche.....	34
2.9.2.1	MPPT indirect	34
2.9.2.2	MPPT Direct	34
2.10	Les algorithmes MPPT	35
2.10.1	Perturbation Et Observation (P&O, Perturbe And Observe)	35
2.11	Résultats de simulation de la commande P&O avec convertisseur boost	37
2.11.1	Simulation de l'algorithme P&O avec une variation (irradiations)	39
2.11.2	Simulation de l'algorithme P&O avec une variation (température)	40
2.12	Conclusion	41
CHAPITRE III LA COMMANDE ADAPTATIVE ET IDENTIFICATION DUN SYSTEME PV		
3.1	Introduction.....	42
3.2	Commande Adaptative	42
3.2.1	Commande adaptative directe	43
3.2.2	Commande adaptative indirecte	44
3.3	Structure des régulateurs indirecte (auto-ajustables).....	44
3.4	Identification du procédé	45
3.4.1	Modèle du procédé	46
3.4.2	Algorithme des moindres carrés récursifs	46
3.5	Identification d'un système photovoltaïque.....	47
3.6	Méthodes d'identification	48
3.6.1	Méthode applique au modèle à une diode	48
3.7	Conclusion	53
CHAPITRE IVSIMULATION ET EVALUATION DES RESULTAT		
4.1	Introduction.....	54
4.2	Simulation d'un convertisseur boost avec un commande MPPT(P&O) et la commande adaptative (MRAC)	55
4.2.1	Validation de fonction de transféré de MRAC	55
4.2.2	Résultats de Simulation	56
4.3	Simulation de la commande adaptative et P&O avec une variation de la capacité et l'inductance	57
4.3.1	Variation de la capacité	57
4.3.2	Variation de l'inductance.....	59
4.3.2.1	θ contrôleur paramétré de MRAC.....	61
4.3.2.2	L'erreur entre le système et le modèle de référence.....	63
4.4	Conclusion	64
CONCLUSION GENERALE		65
Référence.....		66

LISTES DES FIGURES

N°	Titre	Pages
Chapitre I ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEME SOLAIRES		
Figure 1.1	Conversion photovoltaïques	02
Figure 1.2	Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage	03
Figure 1.3	Structure d'un système PV connecté au réseau	04
Figure 1.4	Coupe transversale d'une cellule PV	06
Figure 1.5	Module et cellule photovoltaïque	07
Figure 1.6	Caractéristiques courant tension de ns cellule en série	08
Figure 1.7	Caractéristiques courant tension de (np) cellules en parallèle	09
Figure 1.8	Système photovoltaïque	09
Figure 1.9	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	10
Figure 1.10	Caractéristiques Courant-Tension sous différents éclairément et une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$	13
Figure 1.11	Caractéristiques Courant-Tension et $P=f(V)$ par différentes températures et un éclairément constant $E=1000\text{W/m}^2$	14
Chapitre II CONVERTISSEUR BOOST ET COMMANDE DE SUIVI DE LA PUISSANCE MAXIMALE		
Figure 2.1	Principe de base d'un hacheur	16
Figure 2.2	Schéma électrique de l'hacheur série	18
Figure 2.3	Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)	18
Figure 2.4	Élévateur Hacheur abaisseur	19
Figure 2.5	Schéma de principe d'un hacheur boost	20
Figure 2.6	Signal de commande de l'interrupteur Sw	20
Figure 2.7	Schéma équivalent du hacheur boost durant la phase active	22
Figure 2.8	Schéma équivalent de hacheur boost durant la phase de roue libre	23
Figure 2.9	Allures des tensions et courants en mode conduction continue	26
Figure 2.10	Allure du courant traversant l'inductance en conduction discontinue	27
Figure 2.11	Allure simplifiée du courant inductif pour chacun des montages élévateurs	29
Figure 2.12	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec un commande MPPT	31
Figure 2.13	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	32
Figure 2.14	Principe de la commande MPPT	33
Figure 2.15	Recherche du PPM par la méthode (P&O)	36
Figure 2.16	Algorithme de P&O classique	37
Figure 2.17	Résultat de la simulation de la méthode P&O avec des conditions standards	37
Figure 2.18	Puissance en fonction du temps avec variation d'irradiation	39
Figure 2.19	Puissance en fonction du temps avec variation de température	40

Chapitre III LA COMMANDE ADAPTATIVE ET IDENTIFICATION DUN SYSTEME PV

Figure 3.1	Principe d'un système de commande adaptative	42
Figure 3.2	Structure de la commande adaptative directe	43
Figure 3.3	Structure de la commande adaptative indirecte	44
Figure 3.4	Schéma bloc du régulateur Auto-Ajustable	45
Figure 3.5	principe de l'identification des modèles	46
Figure 3.6	Les deux points sur la coube I-V	49
Figure 3.7	Les cinq points sur la courbe I-V	50
Figure 3.8	Principe d'identification	51

Chapitre IV SIMULATION ET EVALUATION DES RESULTAT

Figure 4.1	Tension de MRAC par rapport V_{pv}	55
Figure 4.2	Résultat de la simulation de MRAC avec P&O des conditions standards	56
Figure 4.3	Puissance en fonction du temps avec variation de la capacité	58
Figure 4.4	Puissance en fonction du temps avec variation de l'inductance	60
Figure 4.5	thêta contrôleur paramétrer d'un MPPT MRAC	61
Figure 4.6	Erreur en fonction de temps	63

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Il est essentiel de bien comprendre la production électrique de ces systèmes photovoltaïques sur différents sites pour évaluer leur rentabilité économique, en raison de la croissance du secteur photovoltaïque. On sait que la capacité d'un module photovoltaïque à produire de l'électricité peut être importante. Toutefois, ce rendement est fréquemment diminué par rapport à son niveau maximal (point de puissance maximale) en raison de conditions météorologiques particulières, comme l'ombrage, ainsi que par le manque de performance du MPPT (Maximum Power Point Tracking).

La fonction MPPT est essentielle pour assurer le bon déroulement du système photovoltaïque. L'objectif de cette commande est d'automatiser la variation du rapport cyclique pour améliorer l'efficacité de l'énergie produite par le panneau solaire. On sait que la valeur d'une capacité électrique peut être influencée par des éléments externes, tels que l'inductance du convertisseur.

Afin de mener à bien ce projet, nous avons organisé notre étude en quatre chapitres distincts :

Au cours du chapitre initial, nous examinons en détail les principes fondamentaux des systèmes photovoltaïques, incluant les générateurs photovoltaïques, les cellules photovoltaïques et la simulation d'un modèle PV. Les principes fondamentaux de la conversion photovoltaïque et les caractéristiques essentielles des matériaux utilisés seront également abordés.

Dans le chapitre suivant, nous examinons les diverses catégories de convertisseurs DC/DC, leurs applications et la conception d'un hacheur. La commande MPPT des convertisseurs sera également abordée et nous utiliserons le type de MPPT (Perturbe and Observe, P&O) lors de la simulation. Il sera également procédé à une analyse comparative des performances des divers types de convertisseurs afin de déterminer les plus efficaces en fonction des conditions particulières.

La commande adaptative est expliquée dans le troisième chapitre, notamment la commande adaptative par modèle de référence (MRAC). Nous aborderons les différentes techniques utilisées pour identifier un système photovoltaïque. Dans ce chapitre, nous examinerons les bénéfices de l'adaptabilité pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques en réponse aux changements environnementaux.

La modélisation du panneau photovoltaïque et la commande P&O en utilisant le MRAC seront exposées dans le quatrième chapitre. Finalement, nous réaliserons une simulation, exposerons les conclusions et terminerons notre étude. Afin d'évaluer l'efficacité de l'approche proposée et proposer des améliorations potentielles, nous examinerons les résultats de la simulation.

Grâce à cette structure, nous pourrions examiner en détail les éléments essentiels des systèmes photovoltaïques et améliorer leur efficacité grâce à une approche méthodique et rigoureuse. Nous visons à proposer des solutions pratiques et novatrices afin d'améliorer la rentabilité et l'efficacité des installations photovoltaïques, en prenant en considération les défis et les opportunités propres à ce secteur en constante évolution.

CHAPITRE I

ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEMES SOLAIRES

CHAPITRE I

ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEMES SOLAIRES

1. Généralités sur les systèmes Photovoltaïques

1.1 Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) permettent de convertir l'énergie solaire en électricité [1]. Alors grâce à cela et puisque l'énergie solaire est une source inépuisable, la production de l'électricité à base du photovoltaïque, est de nos jours nettement encouragée comme alternative aux énergies fossiles afin de répondre aux besoins en énergie électrique sous cette croissance à travers le monde. Toutefois, ce n'est qu'au début des années 70 que les premiers générateurs photovoltaïques furent utilisés pour fournir de l'électricité [2]. Par ailleurs, vu les intérêts scientifique, vital et économique qu'offre la technologie photovoltaïque, l'évolution de la recherche dans le domaine des énergies renouvelables a permis d'améliorer la fiabilité et de mettre en place des systèmes de production d'énergie électrique propres (non polluants) en concordance avec les normes sur le respect de l'environnement, ce qui leur a valu par conséquent une place importante dans les systèmes de production d'énergie électrique [3].

Ce chapitre est réservé à la présentation des structures des systèmes photovoltaïques et l'étude des principales caractéristiques sous l'effet du changement de l'irradiation (E) et de la température.

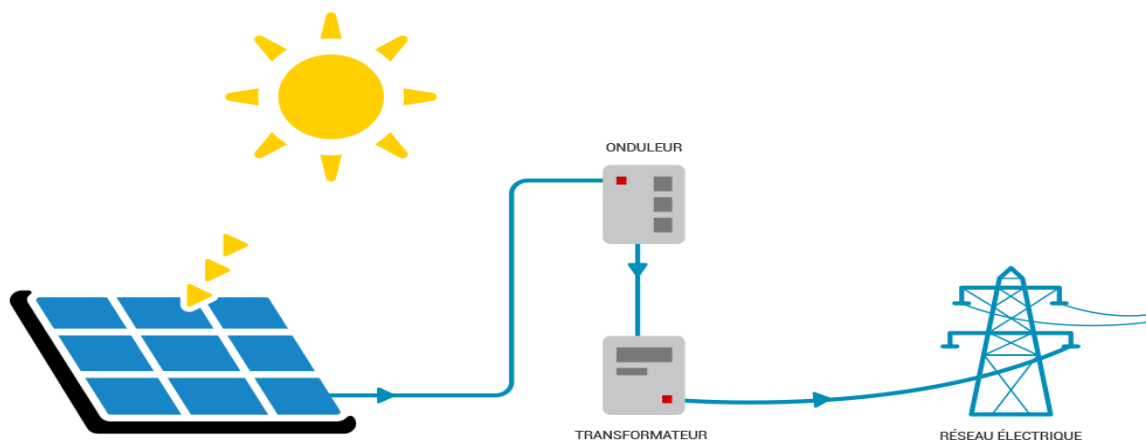


Figure 1.1 Conversion photovoltaïques

1.2 Conception des systèmes solaires

La production de l'énergie électrique à base d'énergies renouvelables se distingue, principalement par deux structures : autonomes et raccordées aux réseaux électriques (non autonomes) [4].

1.2.1 Système solaire autonome

Les récepteurs courant continu en fonctionnement sont alimentés par le générateur photovoltaïque, qui charge également la batterie de stockage. En cas de surproduction solaire, un contrôleur de charge empêche la surcharge de la batterie. Pendant la nuit et en cas de mauvais temps, la batterie alimente les récepteurs. La batterie est protégée par un limiteur de décharge en cas de décharge intense. Un onduleur autonome transforme la tension continue en tension alternative en cas de récepteurs fonctionnant en alternatif, ce qui permet leur alimentation [5].

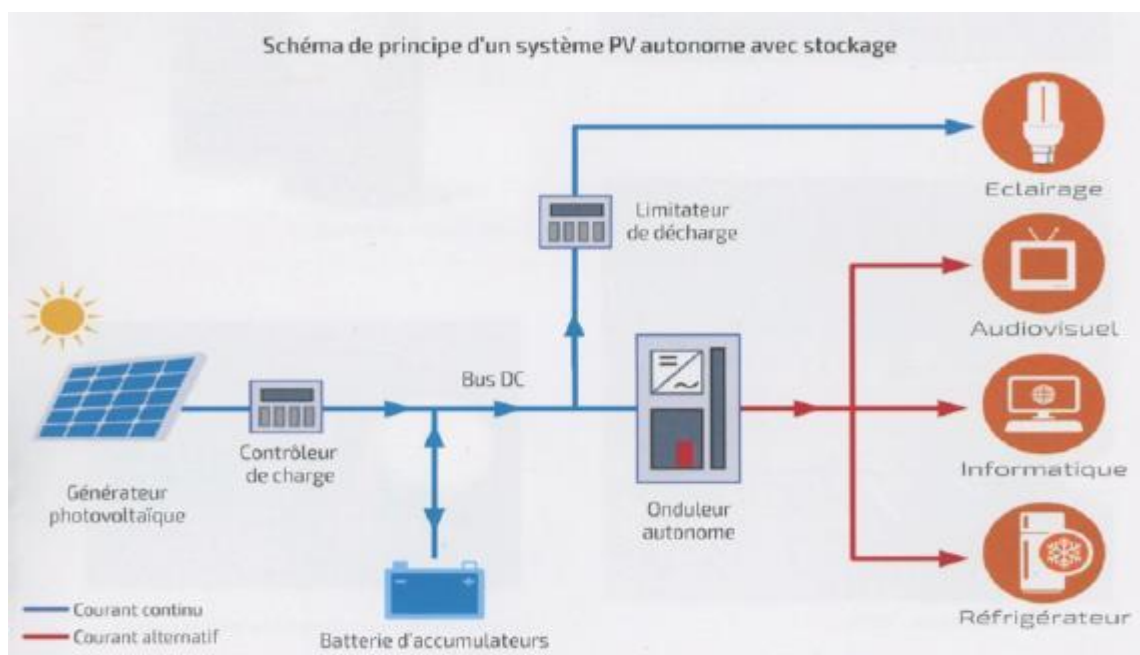


Figure 1.2 Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage

1.2.2 Système solaire non autonome

Un aspect crucial des systèmes photovoltaïques connectés au réseau (ou systèmes PV connectés au réseau) a été évoqué. Voici quelques informations supplémentaires sur leur mécanisme d'action [6].

1)-Générateur PV : les panneaux solaires (générateur PV) sont directement connectés au réseau électrique. Ils convertissent la lumière du soleil en électricité.

2)-Convertisseurs de puissance : Ces composants sont essentiels pour adapter l'énergie produite par les panneaux PV au réseau. Voici leurs rôles :

- Hacheur avec MPPT : le hacheur régule la tension et le courant en fonction de la puissance maximale disponible des panneaux solaires. Le MPPT optimise cette conversion pour maximiser l'efficacité ;
- Filtre : le filtre élimine les harmoniques et assure une onde sinusoïdale propre pour l'injection dans le réseau ;
- Onduleur : l'onduleur convertit l'énergie continue (DC) des panneaux solaires en énergie alternative (AC) conforme aux spécifications du réseau électrique.
- Électronique de contrôle : elle gère l'ensemble du système, surveille les paramètres et assure la synchronisation avec le réseau ;

3)-Adaptation en amplitude et en fréquence

La tension et la fréquence de sortie de l'onduleur sont ajustées par l'électronique de contrôle afin de les adapter à celles du réseau électrique. Cela facilite l'intégration harmonieuse de l'énergie solaire dans le réseau électrique.

Les panneaux solaires connectés au réseau sont fréquemment employés dans les espaces résidentiels, commerciaux et industriels. Ils contribuent à diminuer l'utilisation des combustibles fossiles et à favoriser la production d'énergie propre.

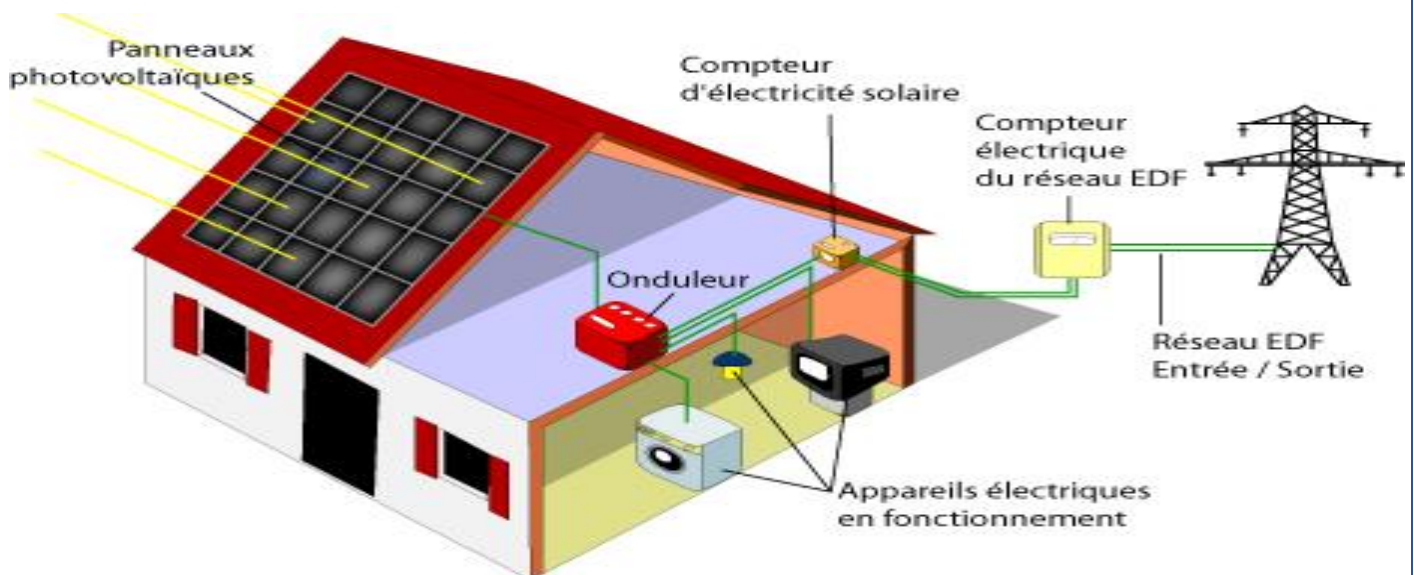


Figure 1.3 Structure d'un système PV connecté au réseau

1.3 Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est assurée grâce à la cellule photovoltaïque, dit aussi cellule solaire ou photopile. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien Alexandre Edmond Becquerel en 1839 et ce n'est qu'en 1954 que les chercheurs de laboratoire Bell ont réalisé la première cellule photovoltaïque [6].

Différentes technologies de réalisation des cellules photovoltaïque ont été développées utilisant toutes des matériaux semi-conducteurs dont le silicium est le principal matériau utilisé. Cependant, les trois (3) types de cellules les plus employées sont [6] : la cellule au silicium amorphe en couche mince ; la cellule au silicium monocristallin et la cellule au silicium polycristallin.

- **Les cellules au silicium amorphe en couche mince**

Elles sont habituellement d'un marron ou d'un gris foncé. Elles ont une finesse bien supérieure à celle des cellules en silicium cristallin (seulement quelques microns). Il s'agit d'une technologie très répandue dans les petites calculatrices, mais leur performance demeure très limitée. Elles ont également une longueur de vie inférieure à celle des autres cellules : seulement une dizaine d'années, contre une trentaine pour le silicium monocristallin et polycristallin respectif.

- **Les cellules au silicium monocristallin**

Les cellules monocristallines sont identifiées par leur couleur très sombre. Coûteux, et car sa fabrication est plus complexe. Elles sont identifiées par leur teinte bleutée. C'est le matériau photovoltaïque le plus couramment employé au niveau international, car il propose actuellement le meilleur rapport qualité /prix.

1.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés du semi-conducteur qui consistent à arracher des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner. C'est ainsi que pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour cela deux types de silicium sont associés. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face

devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. La figure (1.4) montre une coupe transversale de la cellule.

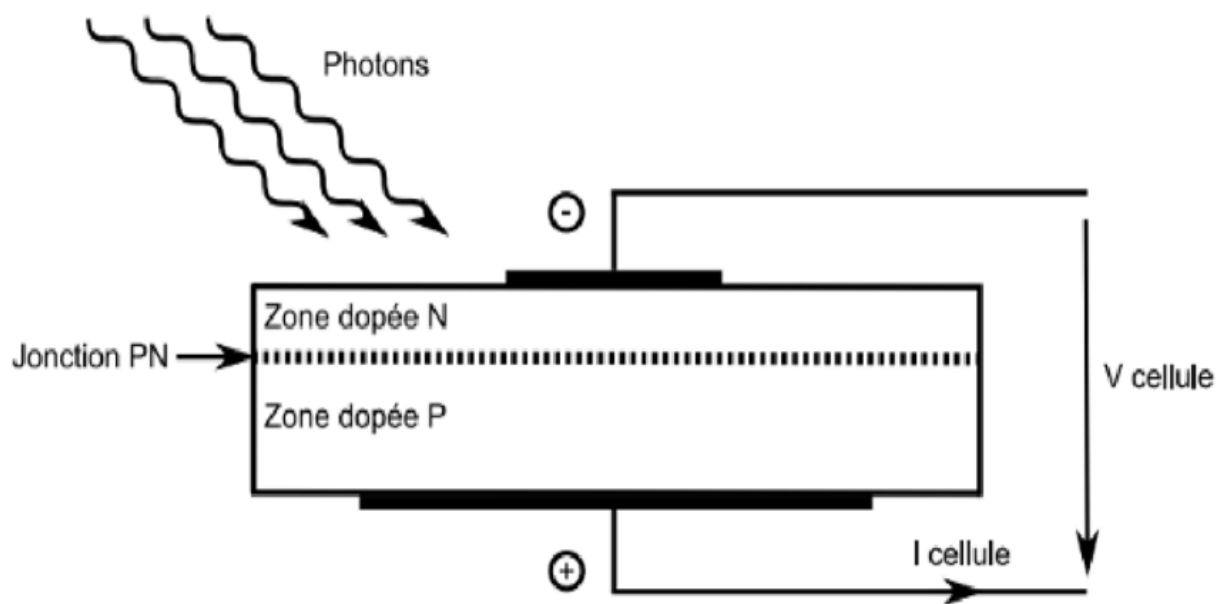


Figure 1.4 Coupe transversale d'une cellule PV

Ces cellules sont les éléments essentiels pour la construction d'un système photovoltaïque. Le rendement d'une cellule PV est le rapport entre l'énergie électrique produite par le photovoltaïque et l'énergie électromagnétique reçue sous forme de rayonnement solaire.

Un module solaire est constitué de cellules photovoltaïques connectées et encapsulées sous du verre, ce qui permet de générer une quantité d'électricité adéquate.

Plusieurs modules solaires peuvent être groupés pour former un panneau solaire. Plus le panneau est grand, plus la quantité d'électricité qu'il produit est grande. Ces panneaux eux-mêmes sont associés pour former le champ photovoltaïque. Le terme générateur photovoltaïque (GPV) est réservé à l'ensemble producteur d'énergie qui comprend donc le champ photovoltaïque, le stockage d'énergie, l'électronique de gestion (ou contrôle) et l'élément de conversion en alternatif.

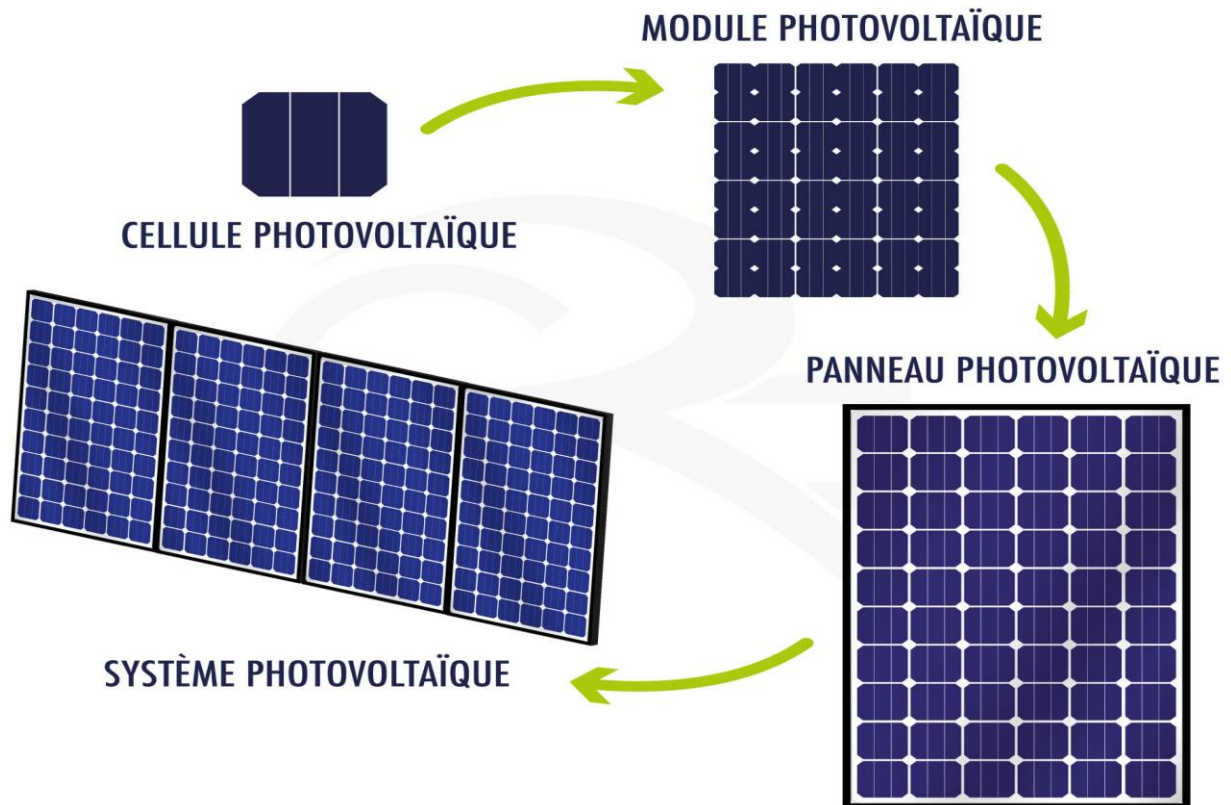


Figure 1.5 Module et cellule photovoltaïque

Il évalue l'efficacité de la conversion solaire en électricité et sa valeur varie en fonction du matériau utilisé et de la structure de la cellule :

- Le rendement des cellules au silicium amorphe varie entre 6 % et 9 % ces cellules sont moins coûteuses à produire, mais leur efficacité est relativement faible. Elles sont souvent utilisées dans des applications où l'espace est limité.
- Le rendement des cellules en silicium polycristallin varie entre 13 % et 18 % les cellules polycristallines sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium contenant plusieurs cristaux. Elles offrent un bon compromis entre coût et efficacité.
- Le rendement des cellules en silicium monocristallin varie entre 16 % et 24 % les cellules monocristallines sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium, ce qui leur confère une efficacité supérieure. Elles sont souvent utilisées dans les installations résidentielles et commerciales.

1.5 Constitution d'un système photovoltaïque

La mise en série ou en parallèle ou série/parallèle de plusieurs cellules photovoltaïques a un effet sur les performances électriques du système [7] :

1.5.1 Connexion en série

Par association en série (appelée en anglais "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

La figure représente les caractéristiques statiques des courant en fonction de tension pour une connexion en série de cellules photovoltaïques.

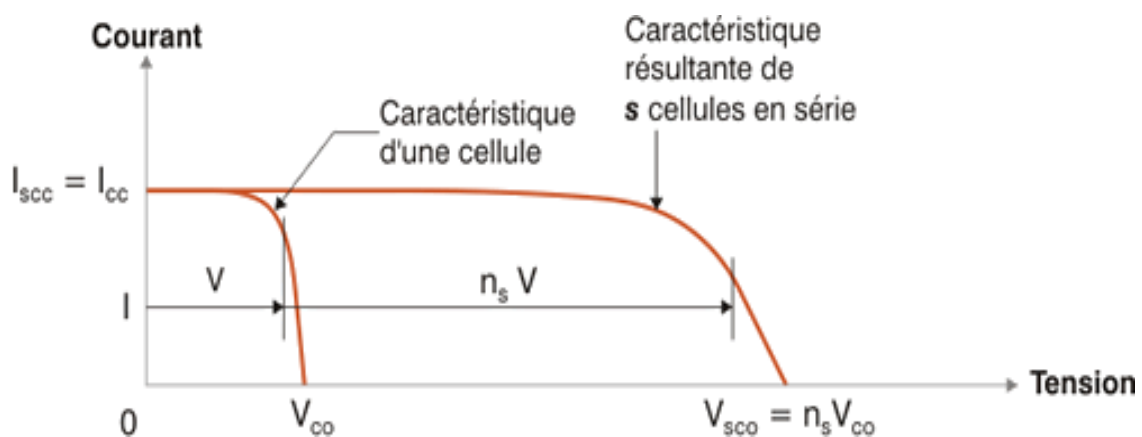


Figure 1.6 Caractéristiques courant tension de ns cellule en série

Où,

I_{sc}, I_{cc} : courant de court-circuit ;

V_{sco}, V_{co} :leur de marche a vide (sans charge) ;

n_s : nombre de cellule connectées en série ;

- Lorsque les cellules sont connectées en série, leurs tensions s'additionnent ;
- La tension totale du système PV est la somme des tensions de chaque cellule ;
- Cela permet d'obtenir une tension plus élevée, ce qui peut être avantageux pour alimenter des appareils nécessitant une tension spécifique.

1.5.2 Connexion en parallèle

La figure représente les caractéristiques statiques des courant en fonction de tension pour une connexion en parallèle de cellules photovoltaïques.

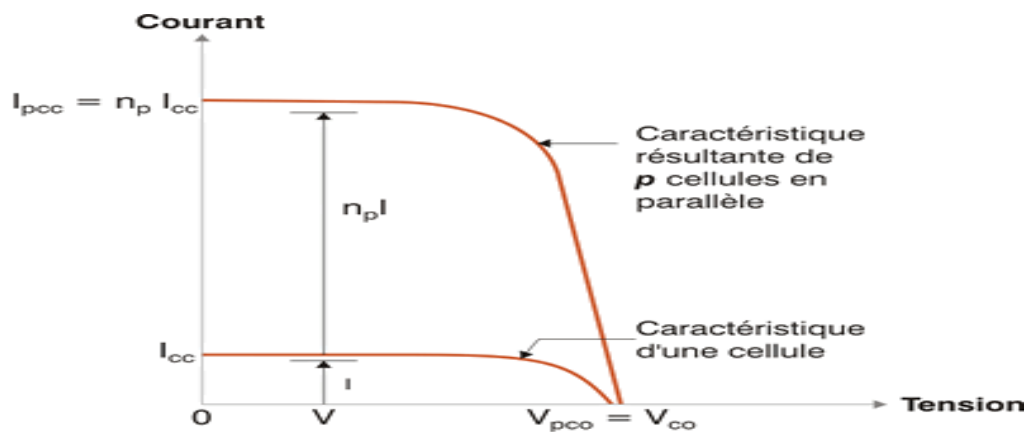


Figure 1.7 Caractéristiques courant tension de (n_p) cellules en parallèle

- Lorsque les cellules sont connectées en parallèle, leurs courants s'additionnent ;
- L'ampérage total du générateur est la somme des courants de chaque cellule ;
- Cela permet d'obtenir un courant plus élevé, ce qui peut être utile pour alimenter des charges qui nécessitent un courant élevé.

➤ Le générateur photovoltaïque (GPV)

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la figure (1.8) [8].

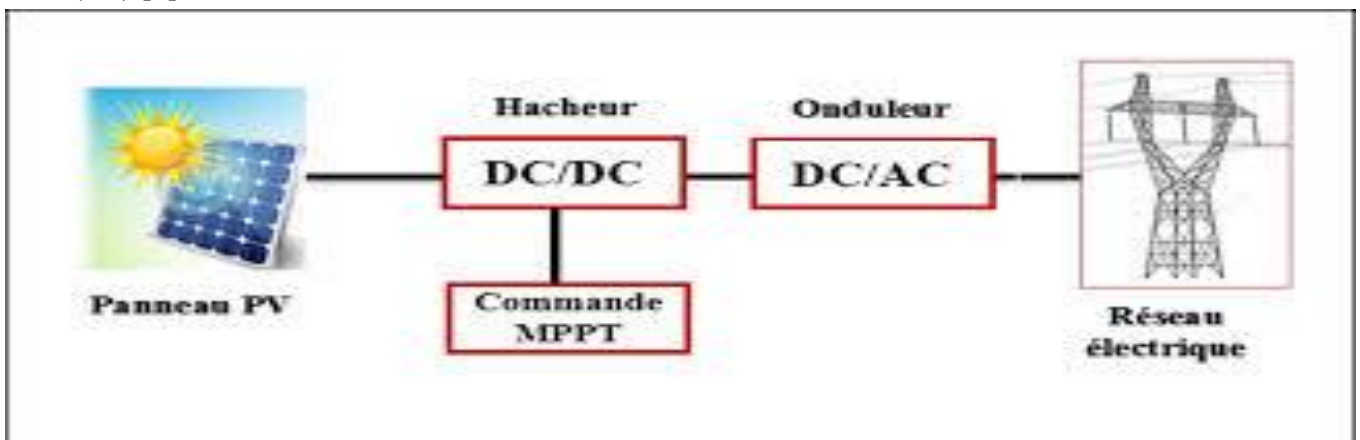


Figure 1.8 Système photovoltaïque

1.6 Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

La modélisation des systèmes photovoltaïque est une étape essentielle et importante pour l'étude et la conception de tels systèmes. En effet, selon la littérature le modèle standard avec une seule diode, développé par Shockley, pour une seule cellule solaire photovoltaïque est le plus utilisé [9]. Et il sera généralisé par la suite à un module solaire photovoltaïque en le considérant comme un ensemble de cellules identiques connectées en série-parallèle. Le schéma du circuit électrique équivalent pour le modèle avec une seule diode est illustré par la figure (1.9), suivante :

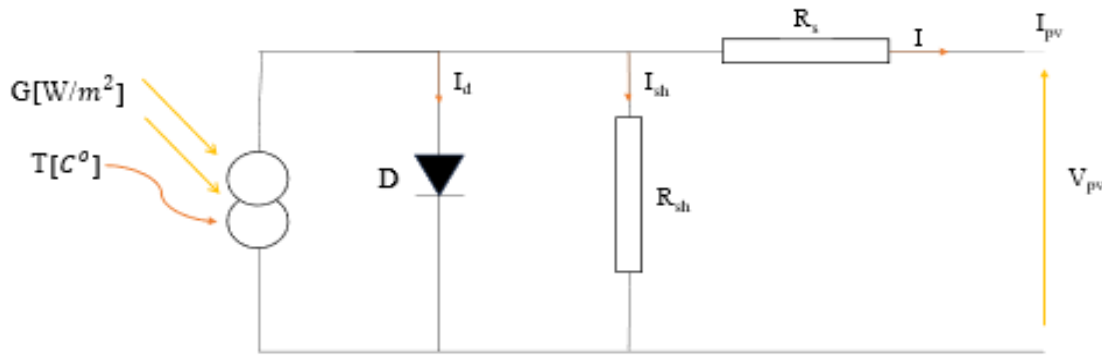


Figure 1.9 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Il est possible d'utiliser maintenant une formulation en fonction des paramètres du photovoltaïque en prenant en considération les paramètres des composants figurant dans le précédent schéma et aussi de la quantité de lumière solaire absorbée par les panneaux est appelée irradiance solaire [10] ainsi que de la température des cellules (T) pour tracer les graphiques des caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) pour évaluer le comportement de la cellule photovoltaïque et par conséquent du système.

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q \left(V_e + (I_p * R_s) \right)}{nkt} \right) - 1 \right] - V_e + ((I_e * R_s)/R_p) \quad (1.1)$$

Où, V_{pv} , I_{pv} sont la tension de sortie et le courant de sortie de panneau ; I_{ph} est le photo courant en ampère, I_{sat} courant dans la diode en ampère, R_s est la résistance série qui caractérise R_{sh} est

la résistance shunt qui caractérise, q est la charge de l'électron $q=1.602.10^{19}$ coulomb, k est la constante de Boltzmann $k=1.381.10^{-23}$ J/K, n est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunt) est infinie ($R = \infty$), l'équation (1.1) devienne :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{(V_{pv} + R_s * I_{pv})}{nvt} \right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

Où I_{pv} le courant fourni par la cellule PV et V_{pv} est la tension aux bornes de la cellule PV. On peut calculer la résistance série dans le point V_{co} :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} \left(\exp \left(V_{pv} + R_s * \frac{I_{pv}}{nkt} \right) (dV_{pv} + R_s * dI_{pv}) \right) \quad (1.3)$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) à l'elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = -dV_{pv}/dI_{pv} nvt/I_{sat} \left(\exp((V_{pv} + r_s * I_{pv})/nvt) \right) \quad (1.4)$$

L'équation de la caractéristique $I=f(V)$ (1.1) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (1.5)$$

Où $f'(X_n)$ est la dérivée de la fonction, (X_n) , X_n est la présente itération et X_{n+1} est l'itération suivante :

La réécriture de l'équation (1.5) donne la fonction suivante :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat} \left(\exp \left(V_{pv} + \frac{r_s * I_{pv}}{nvt} \right) - 1 \right) = 0 \quad (1.6)$$

En remplaçant dans l'équation (1.5), on calcule le courant (I) par les itérations : Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{cc}(T) = I_{CC}(T_{ref}). [1 + \alpha (T - T_{ref})] \quad (1.7)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{1000} \right) \tag{1.8}$$

$$I_{sat}(T) = I_{sat}(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^{\frac{3}{n}} \left[\exp \left(\frac{q \cdot E_g}{n} \right) \cdot \left(\frac{1}{T \cdot T_{ref}} \right) \right] \tag{1.9}$$

Où, I est le coefficient de variation du courant en fonction de la température, Tref est la température de référence, 298k (25°C) et G est l’irradiation solaire.

1.7 Simulation et discussion

Dans ce travail, nous avons utilisé un module photovoltaïque de type KC200GT dont les données sous consignées dans le tableau (1.1)[10].

Tableau 1.1 Caractéristique électriques du module PV sous conditions standards

Puissance maximale	P _{max}	200.143 W
Courant de court-circuit	I _{cc}	8.21 A
Tension de circuit ouvert	V _{co}	32.9 A
Courant au point de MPP	I _{op}	7.61 A
Tension au point MPP	V _{op}	26.3 A

Partant des données de tableau 1.1 nous avons constitué un module photovoltaïque en regroupant trois (3) panneaux en série et trois (3) autre en parallèles.

Puis, sous quarto (4) niveaux l’irradiation solaire cas standard (G=1000 w/m², 700 w/m², 500W/m² et 200 W/m²), tout en gardant la température a sa valeur standard (T=25°C), nous avons obtenir pour simulation les caractéristiques I=f(V) et P=f(V) montrés par figure (1.10) a- et la figure (1.11) -b- respectivement.

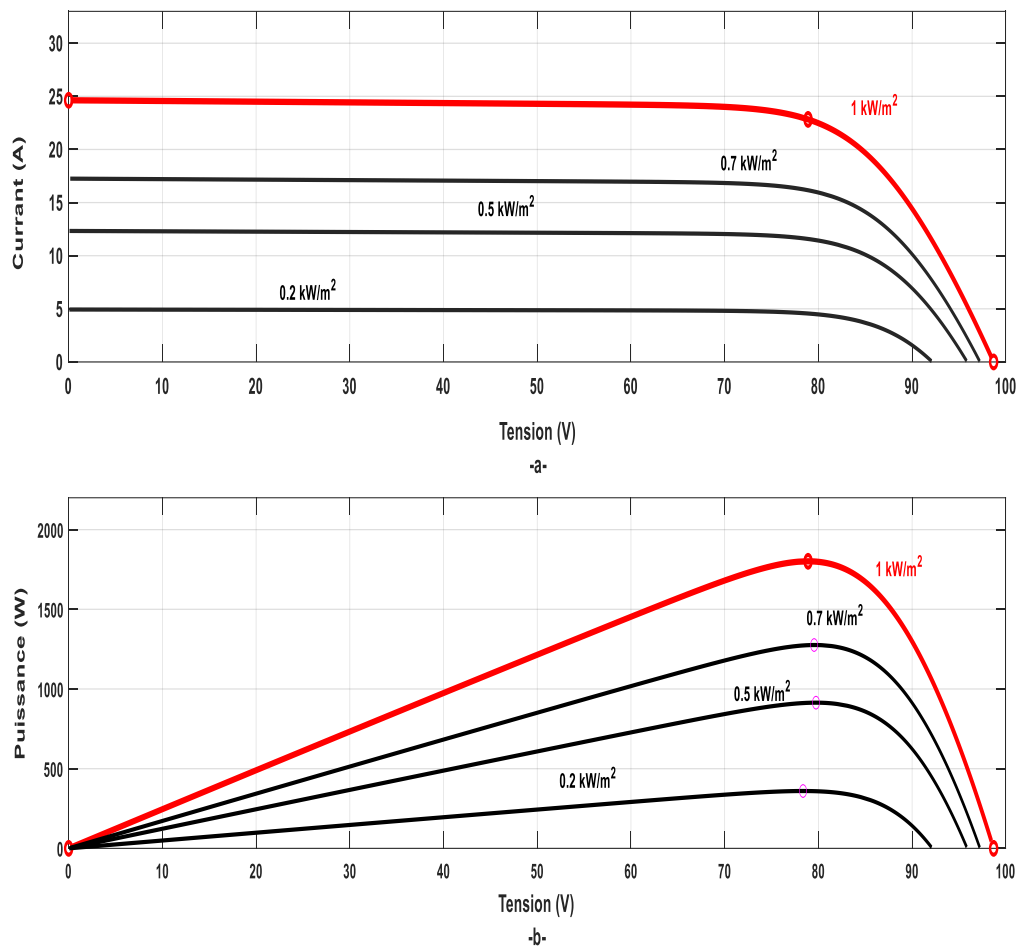


Figure 1.10 Caractéristiques Courant-Tension sous différents éclaircissement et une température $T=25^{\circ}\text{C}$

On remarque que la diminution de l'irradiation cause la diminution de la puissance maximale et de la tension du circuit ouvert correspondant ainsi que la diminution de la valeur du courant de court-circuit.

Par la suite, nous avons procédé à l'évaluation du changement du niveau de la température (T) sur le comportement du système et ce en faisant solliciter l'ensemble sous un niveau d'irradiation constant ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et sous cinq (5) niveau de la température, notamment, 5°C , 10°C , 25°C (niveau standard), 35°C et 45°C . Le résultat de simulation en montré par la figure (1.11).

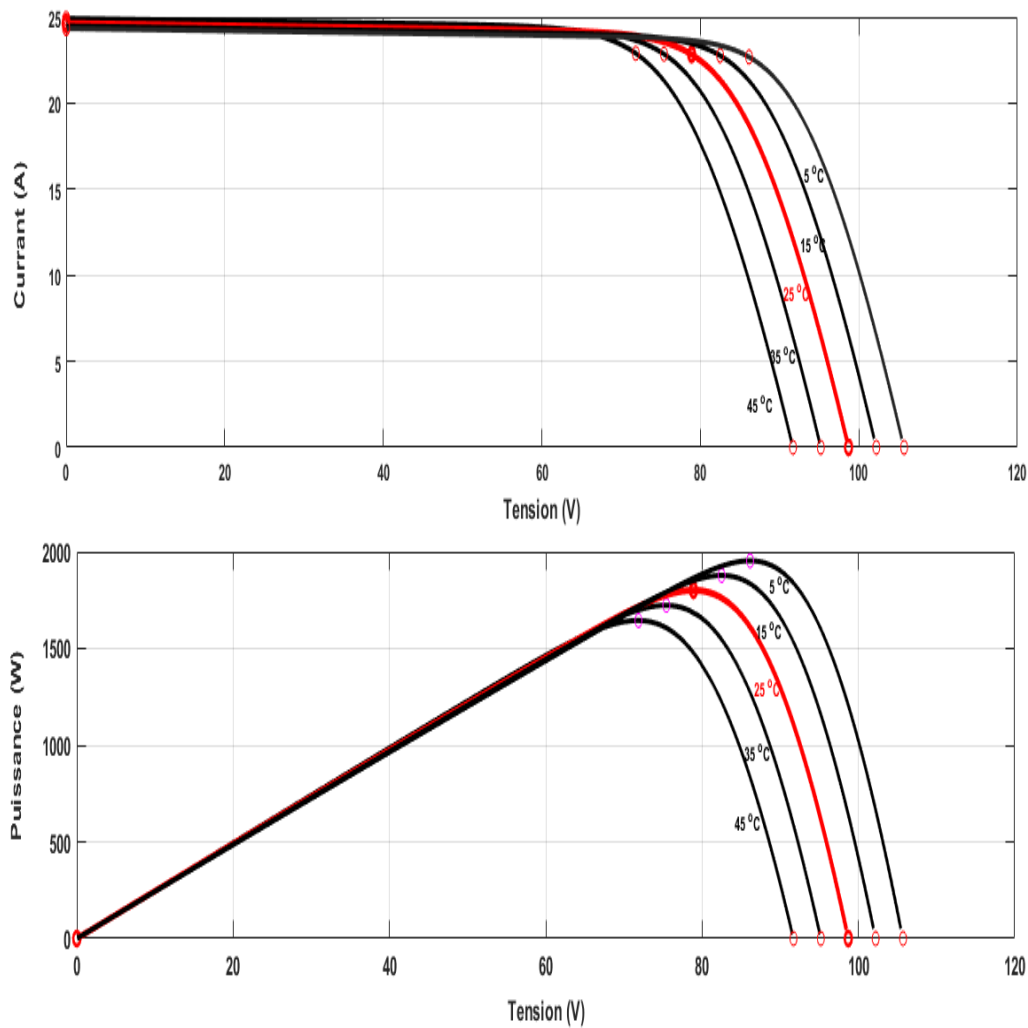


Figure 1.11 Caractéristiques Courant-Tension et $P=f(V)$ par différentes températures et un éclairement constant $E=1000\text{W/m}^2$

L'analyse de ces démission caractéristique, montre que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert et la puissance maximale que peut développement le système, a que le courant de court-circuit reste presque constant. Le modèle choisi a donné des résultats concordant avec eux obtenus la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé.

A l’issue de ces tests de simulation, on dresse le tableau.

Tableau 1.2 Teste de simulation avec des variations d’irradiation et température

Données	G variable, T=constant=25°C				G=constant=1000w/m², T variable				
	1000w/m²	700w/m²	500w/m²	200w/m²	5°C	15°C	25°C	35°C	45°C
I _{cc} (A)	24,63	17,25	12,33	4,94	24,93	24,78	24,63	24,48	24,33
V _{oc} (V)	98,7	97,22	95,82	92,08	105,7	102,2	98,7	95,2	91,7
P _{max} (W)	1801	1276	914	360	1954	1878	1801	1723	1645

1.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, on note que les brèves notations sur les types des cellules photovoltaïques et leurs connections possibles, le modèle du circuit équivalent à une seule diode à permit de déduire la formulation mathématique pour développer le modèle de simulation. En plus, l’analyse d’influence de l’irradiation a de la température. A montré que la puissance maximale que peu développer le système dépend des changements climatiques sous le quelles il est exposé. Cependant, pour assurer un fonctionner du système au point de la puissance maximale, c’en un point que nous être prévu, c’en un point que nous considère vous dons le prochain chapitre.

CHAPITRE II

CONVERTISSEUR BOOST ET COMMANDE MPPT DE SUIVI DE LA PUISSANCE MAXIMALE

CHAPITRE II

CONVERTISSEUR BOOST ET COMMANDE DE SUIVI DE LA PUISSANCE MAXIMALE

2.1 Introduction

Dans une chaîne de conversion solaire, le système photovoltaïque alimente, en générale, un hacheur qui permet d'adapter la tension à son entrée à celle requise par la charge et ce grâce à sa commande. Cette commande doit assurer un fonctionnement au point de la puissance maximale, que peut développer le système photovoltaïque sous les conditions atmosphériques imposées par la nature.

Dans ce chapitre, on traite en premier lieu le principe, la modélisation et la commande optimale principalement, d'un hacheur élévateur (Boost). En second lieu, on valide notre étude et on évalue les performances de la chaîne grâce à une simulation en utilisant le logiciel Matlab.

2.2 Définition et principe d'un hacheur

Un hacheur (convertisseur DC-DC) permet de passer d'un niveau de tension continue à son entrée à un autre niveau de tension grâce à sa commande par commutations [11]. La figure (2.1) présente le principe de la base d'un hacheur.

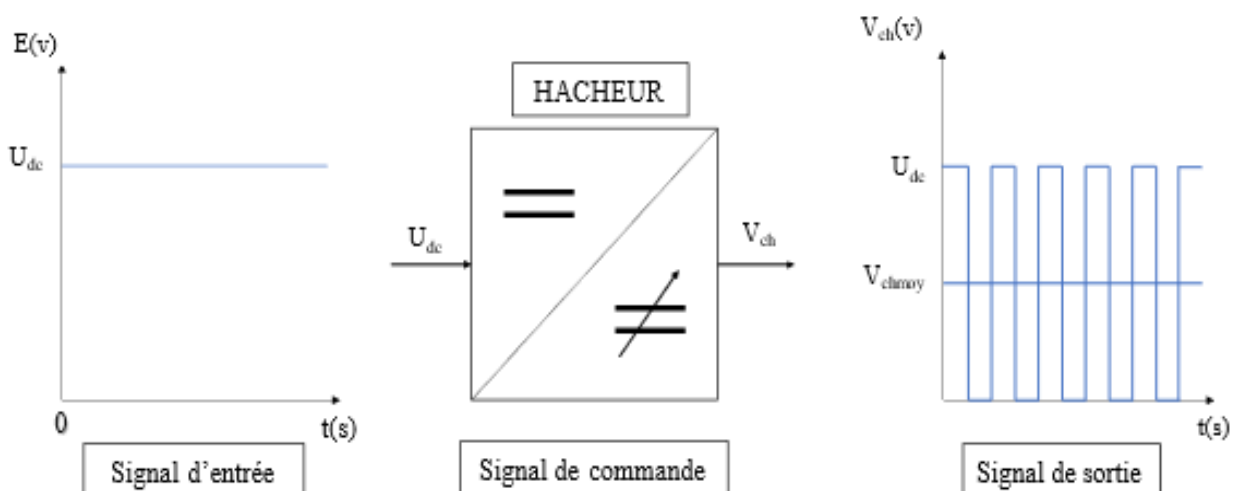


Figure 2.1 Principe de base d'un hacheur

Les convertisseurs DC-DC offrent une large gamme d'utilisations. En effet, les ordinateurs personnels, les périphériques informatiques et les adaptateurs d'appareils électroniques les utilisent fréquemment pour fournir des tensions constantes [12]. Les circuits de convertisseurs présentent une grande diversité de configurations, allant d'une configuration à un seul transistor : abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur élévateur (Buck-Boost) à des configurations complexes qui incluent deux ou plus d'interrupteurs et qui utilisent la commutation douce ou les techniques de résonance pour contrôler les pertes de commutation [13]. Les systèmes photovoltaïques font souvent appel à des convertisseurs DC-DC de type Buck et Boost afin de produire les tensions et les courants désirés. Les convertisseurs de ce genre ne sont composés que d'éléments réactifs (selfs, capacités) qui, dans le cas optimal, ne nécessitent aucune énergie. C'est pourquoi ils se distinguent par un rendement élevé [14].

2.3 Différents types des hacheurs

On distingue essentiellement :

- Le hacheur abaisseur dit hacheur série soit « Buck Converter » ;
- Le hacheur élévateur dit hacheur parallèle soit « Boost Converter » ;
- Le hacheur abaisseur- élévateur dit hacheur réversible soit « Buck-Boost Converter ».

2.3.1 Hacheur série

Le hacheur série, également connu sous le nom de hacheur dévolteur, est un dispositif qui transforme une tension continue en une autre tension continue de moindre valeur. La source d'entrée est sous forme de tension continue et la charge de sortie continue est sous forme de source de courant [17].

La figure (2.2) présente le schéma de principe d'un hacheur série ou le commutateur peut être composé d'un transistor MOSFET ou d'un IGBT qui ont la capacité de se commuter rapidement entre deux positions, soit marche ou arrêt les interrupteur, qui en réalité le semi-conducteur de puissance.

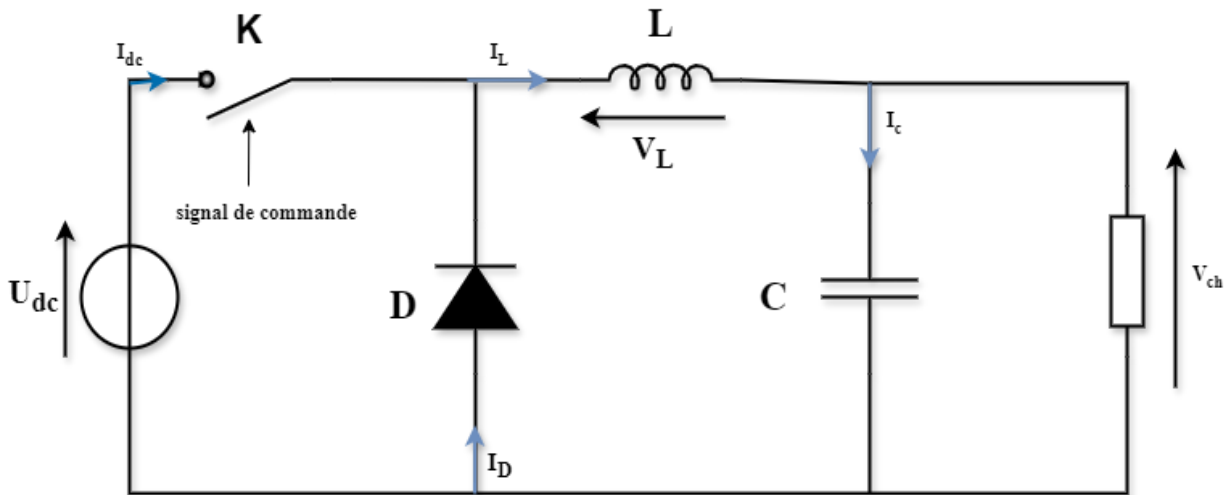


Figure 2.2 Schéma électrique du hacheur série

2.3.2 Hacheur parallèle

Le hacheur parallèle sous les noms de hacheur survolteur. La source d'entrée est un courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est un courant continu (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Il est possible de remplacer l'interrupteur « K » par un transistor car le courant reste toujours positif et que les commutations doivent être activées (lors du blocage et de l'amorçage) [18]. Le schéma de principe d'un hacheur est représenté par la figure (2.3).

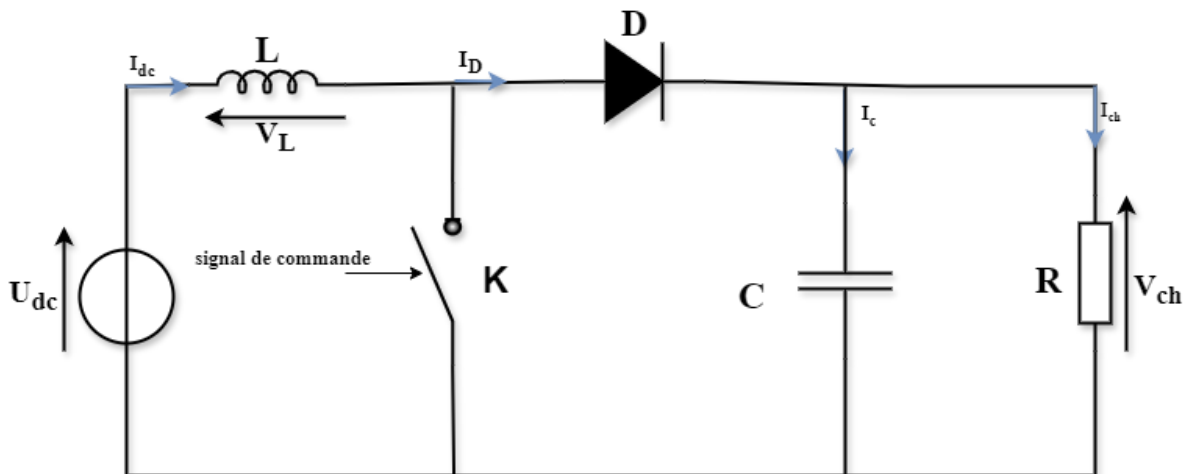


Figure 2.3 Schéma de principe d'un hacheur parallèle (boost)

2.3.3 Hacheur abaisseur- élévateur (Buck-Boost Converter)

On le nomme également dévolteur-survolteur. Le convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif est un hacheur abaisseur-élévateur. La source d'entrée utilise une tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) tandis que la charge de sortie utilise une source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur allie les caractéristiques des deux précédents convertisseurs [19].

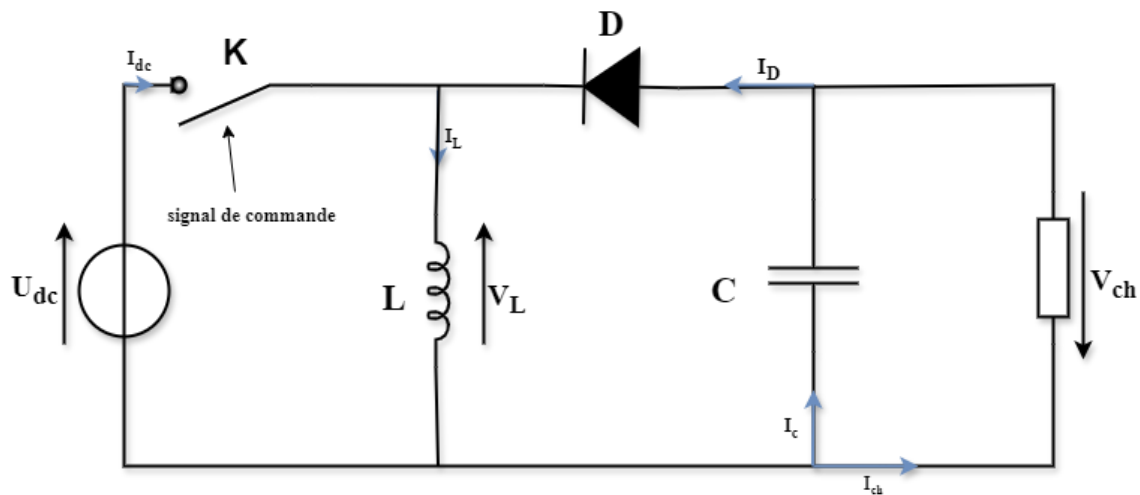


Figure 2.4 élévateur Hacheur abaisseur

2.4 Les expressions des gains en tension des trois (3) types des convertisseurs

Discutés précédemment sont données dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1 Gain en tension des convertisseurs

	BOOST	BUCK	BUCK-BOOST
Gain en tension	$\frac{1}{1 - \alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinu

La suite de ce mémoire considère principalement sur les spécifiés du hacheur boost, et ce en termes de sa structure, principe de fonctionner sa modélisation et sa commande.

2.5 Structure et fonctionnement du hacheur boost

2.5.1 Présentation de la structure

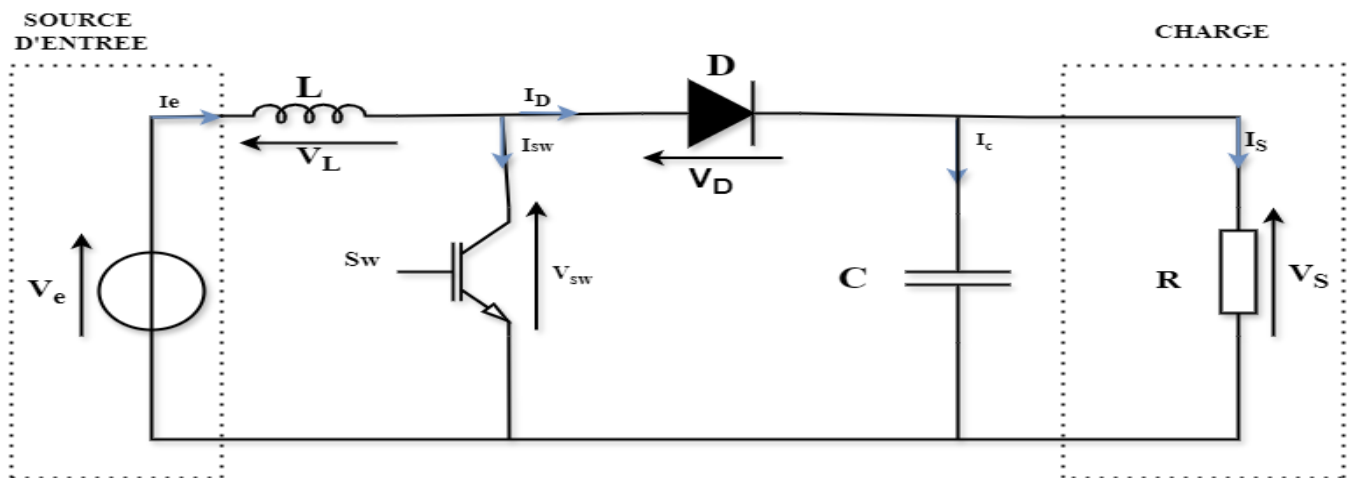


Figure 2.5 Schéma de principe d'un hacheur boost

La figure montre le schéma de principe d'un hacheur boost. Il est formé d'une inductance (L), et d'un diode (D), et d'un condensateur (C), et d'un transistor MOSFET commandé(S). En fonction de l'état de conduction des deux semi-conducteur (S_w et D) il est possible de distinguer deux étapes de fonctionnement et par conséquent deux (2) configure de fonctionnement la forme du signal de commande appliqué au Mosfet est présentée par la figure (2.6).

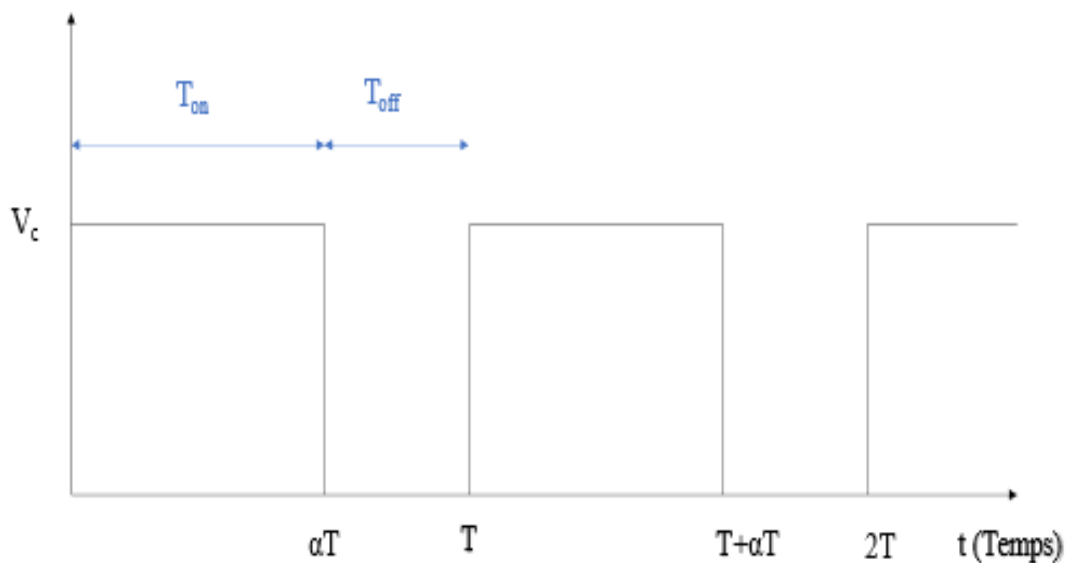


Figure 2.6 Signal de commande de l'interrupteur S_w

Il s'agit d'un signal périodique rectangulaire de période (T) dont la durée à l'état haut (durée de conduction de S) est (dessiné par Ton) est modifiée par le rapport cyclique (α) [20].

Le rapport cyclique est donné par l'expression suivante :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.1)$$

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (2.2)$$

Avec T_{of} présente la durée du temps où le Mosfet est bloqué (non passant),

$$T_{of} = T - T_{on} \quad (2.3)$$

On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur S en fonction de α et T. La durée de conduction T_{on} est comprise entre 0 et T donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur Tr en α fonction de α et T.

Durée de conduction (S : passant) :

$$T_{on} = \alpha \times T \quad (2.4)$$

Durée de blocage (S : non passant) :

$$T_{off} = (1 - \alpha) \times T \quad (2.5)$$

En considérant comme hypothèses que la tension d'entrée (V_e) et celle de sortie (V_s) sont continues et stables et, les composants sont parfaits, on retient deux (2) régimes de conduction : La conduction continue qui se produit lorsque le courant (i_L) traversant l'inductance ne s'annule jamais.

La conduction discontinue qui se produit lorsque le courant (i_L) qui traverse l'inductance s'annule avant la phase active suivante.

Par ailleurs, selon l'état de conduction du Mosfet (S_w), on distingue la phase active et celle de soue libre :

La phase active : S_w est passant et l'interrupteur D est bloqué, le courant augmente linéairement et une quantité d'énergie (WL) sera conservée dans L. cependant le condensateur (C), assure l'alimentation de la charge (e).

La phase de roue libre : après l'ouverture de l'interrupteur S_w , D est passant, ainsi l'énergie (W_s) stockée dans l'inductance L est restituée au condensateur et à la charge R, l'inductance L étant en série avec la source de tension d'entrée, on obtient un montage survolteur.

2.5.2 Conduction continue

Séquence 1 : Phase active, $0 < t < \alpha T$

À l'instant $t=0$, on ferme l'interrupteur S_w durant αT . La tension aux bornes de la diode D (V_D) est égale à : $V_D = V_{sw} - V_s$. Comme l'interrupteur Tr est fermé, on a $V_{Tr}=0$, Ce qui implique

$V_D = -V_s$. La diode est donc bloquée puisque $V_s > 0$. Dans ces conditions, le circuit électrique correspondant est représenté par les figure (2.7)[20].

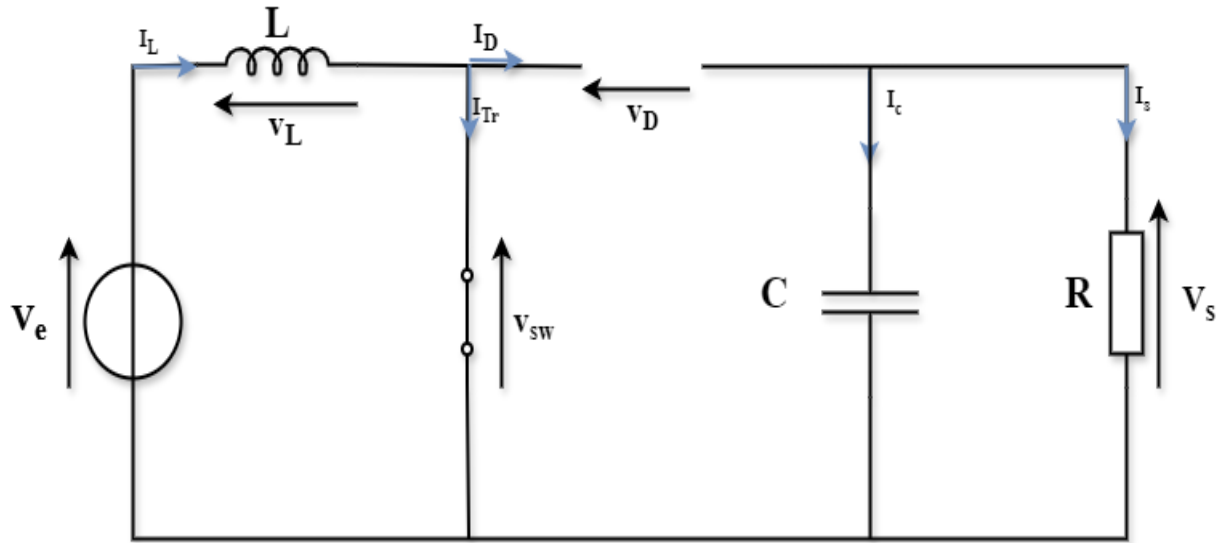


Figure 2.7 Schéma équivalent du hacheur boost durant la phase active

La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_{PV} = L \times \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.6)$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient l'expression suivante qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_{pv}}{L} \times t + I_{Lmin} \quad (2.7)$$

Séquence 2 : Phase de roue libre ; $\alpha T < t < T$

À l'instant $t = \alpha T$, on ouvre l'interrupteur T_{sw} pendant une durée $(1 - \alpha)T$. Pour assurer la continuité du courant, la diode D entre en conduction. On obtient alors le schéma équivalent de la figure (2.8)[20].

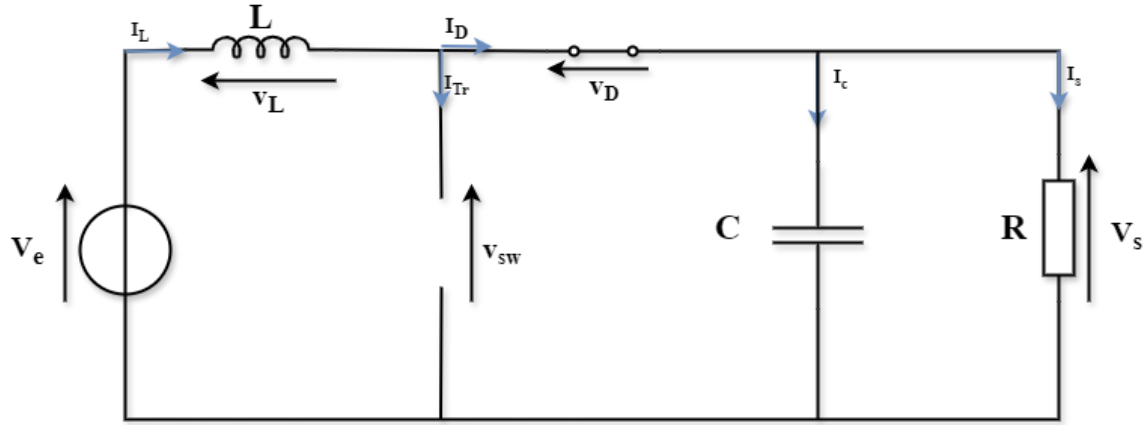


Figure 2.8 Schéma équivalent de hacheur boost durant la phase de roue libre

La tension aux bornes de l'inductance est alors :

$$V_L = V_e - V_s = L \times \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (2.8)$$

En résolvant cette équation différentielle, on obtient (2.8) qui exprime l'évolution du courant traversant l'inductance :

$$i_L = \frac{V_e - V_s}{L} \times (t - \alpha T) + I_{Lmax} \quad (2.9)$$

Expression de V_s et I_s :

Par définition :

$$\langle V_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_L dt = \frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{\alpha T} V_e dt + \int_{\alpha T}^T (V_e - V_s) dt \right) \quad (2.10)$$

Puisque la tension moyenne aux bornes d'une inductance en régime permanent est nulle, on peut écrire :

$$\langle V_e \rangle = \alpha \cdot V_e + (V_e - V_s)(1 - \alpha) = 0 \quad (2.11)$$

Et finalement, on obtient la relation suivante :

$$V_s = \langle V_s(t) \rangle = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (2.12)$$

Le rapport cyclique α est compris entre 0 et 1 donc la tension de sortie V_s est nécessairement supérieure à celle d'entrée (montage survolteur).

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.13)$$

Si on suppose que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire :

$$I_s = \langle i_s(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T I_e dt \quad (2.14)$$

Ce qui conduit à :

$$I_s = I_e(1 - \alpha) \quad (2.15)$$

Selon cette expression, il est clair que le hacheur Boost est un appareil de réduction de courant. En examinant ces diverses expressions, il est possible de constater que le rapport cyclique α permet de modifier la tension moyenne de sortie (respectivement le courant moyen de sortie) pour une tension moyenne d'entrée donnée (respectivement un courant moyen d'entrée). Ainsi, le transfert moyen de puissance entre l'entrée et la sortie de la structure peut être ajusté en utilisant le rapport cyclique α [20].

Le transfert moyen de puissance est :

$$P = \langle p \rangle = (1 - \alpha)V_s.I_e \quad (2.16)$$

Ondulation de courant

L'ondulation absolue du courant i_L est défini par la valeur suivante :

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (2.17)$$

A partir des relations précédentes, à $t=\alpha T$, on peut écrire :

$$I_{Lmax} = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{Lmin} \quad (2.18)$$

On en déduit l'expression de ΔI_L suivante :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_e}{L.f} \quad (2.19)$$

Cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue lorsque la fréquence de commutation ou la valeur de l'inductance L augmente [20].

Comme, $V_e = V_s(1 - \alpha)$ on peut écrire que:

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha).V_s}{L.f} \quad (2.20)$$

En résolvant $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$, on trouve que l'ondulation en courant ΔI_L est maximale pour

$\alpha = \frac{1}{2}$ $\times L$ dimensionnement de l'inductance L , à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à l'aide l'inéquation suivante ;

$$L \geq \frac{V_s}{4.f.\Delta I_{Lmax}} \quad (2.21)$$

Ondulation de tension (ΔV_s):

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension ΔV_s , on pose l'hypothèse que le courant I_s est parfaitement constant. On a la relation suivante $ic = C \cdot \frac{dV_s}{dt}$ ou, pour $0 < t < \alpha T$: On a $ic = -I_s$.

La résolution de cette équation différentielle nous donne [20].

$$V_s = -\frac{I_s}{C} \cdot t + V_{smax} \quad (2.22)$$

Par, $At = \alpha T$, on a:

$$V_s(\alpha T) = V_{smin} = -\frac{I_s}{C} \times \alpha T + V_{smax} \quad (2.23)$$

D'après :

$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin} = \frac{I_s}{C} \times \alpha T \quad (2.24)$$

Finalement :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha V_s}{R.C.f} \quad (2.26)$$

Cette expression, nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation (f) ou la valeur du condensateur (C) augmente [20].

Le dimensionnement du condensateur C , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide l'inéquation suivante :

$$C \geq \frac{\alpha max.V_s}{R.\Delta V_s.f} \quad (2.27)$$

Les formes d'ondes des principaux signaux sont données à la figure (2.9). A partir de ces formes d'ondes, on peut exprimer les valeurs moyennes et efficaces des courants qui traversent la diode D et S_w . Nous pouvons également en déduire les contraintes maximales en tension et courant sur les semi-conducteurs. Ces relations seront utilisées lors du dimensionnement des différents composants de la structure [20].

Courant moyen traversant la diode D:

$$I_D = i_D = I_s \quad (2.28)$$

Courant efficace traversant la diode D :

$$I_{D_{eff}} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I^2}{12}\right) \cdot (1-\alpha)} \quad (2.29)$$

Courant moyen traversant S_w :

$$S_{W_{eff}} = \langle i_{S_w}(i) \rangle = \frac{I_s}{1-\alpha} = I_e \quad (2.30)$$

Courant efficace traversant S_w :

$$I_{reff} = \sqrt{\left(\left(\frac{I_s}{1-\alpha}\right)^2 + \frac{\Delta I^2}{12}\right) \cdot \alpha} \quad (2.31)$$

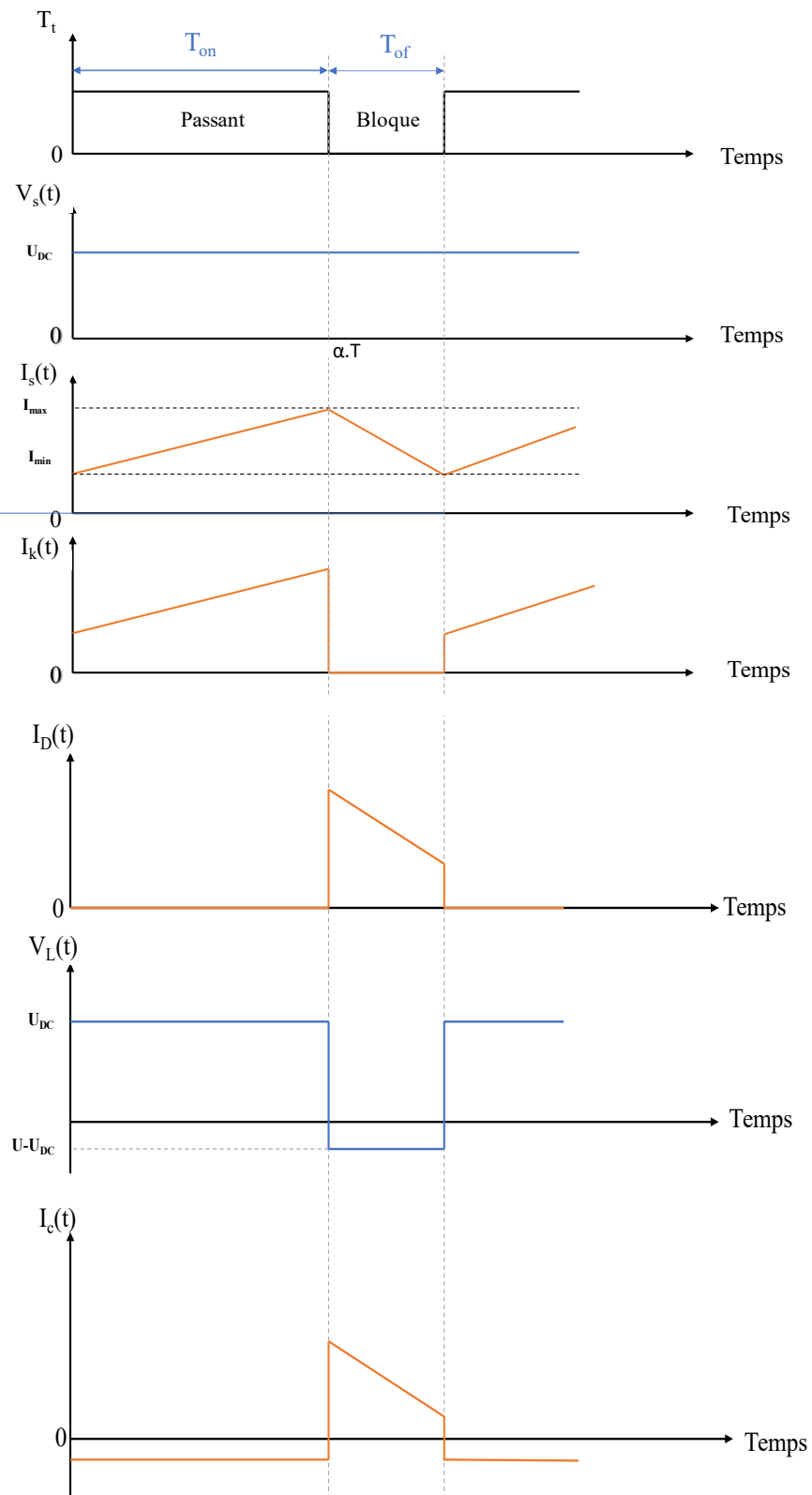


Figure 2.9 Allures des tensions et courants en mode conduction continue

Les contraintes en tension et courant sur S_w commandé et la diode D sont les mêmes.

Contraintes maximales en tension

$$V_{Trmax}=V_{smax}=\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.32)$$

Contraintes maximales en courant

$$i_{Trmax}=i_{Dmax}=i_{Lmax}=\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\nabla I_l}{2} \quad (2.33)$$

Le dimensionnement de la cellule de commutation s'effectue dans le cas le plus défavorable. Pour calculer les contraintes en tension et courant dans le pire des cas, il nous faut remplacer dans les expressions ci-dessus α par α_{max} .

2.5.3 Conduction discontinue

En conduction discontinue, on rajoute une phase pendant laquelle la diode D ne conduit pas $i_L=0$ [20].

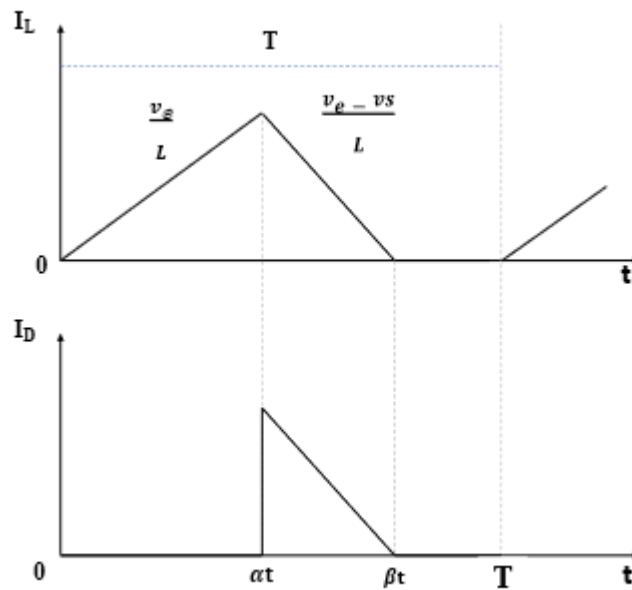


Figure 2.10 Allure du courant traversant l'inductance en conduction discontinue

A partir de l'allure de i_L (Figure ci-dessus), on peut déduire Δt la durée d'annulation du courant :

$$\Delta t = \beta T - \alpha T ; \forall \alpha T \leq t \leq \beta T \rightarrow i_L(t) = \frac{v_{pv}-V_s}{L}(t - \alpha T) + I_L \alpha T \rightarrow i_L(\beta T) = 0 \quad (2.34)$$

Et avec

$$i_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (2.35)$$

on a :

$$\Delta t = \frac{V_e}{V_s - V_e} \times \alpha T \quad (2.36)$$

Le courant moyen de sortie est :

$$I_s = \langle i_s \rangle = \langle i_D \rangle = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^{\beta T} i_L(t) \cdot dt \rightarrow I_s = \frac{1}{2} i_L(\alpha T) \left(\frac{\beta T - \alpha T}{T} \right) \quad (2.37)$$

Ce qui conduit à :

$$I_s = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 \cdot V_e^2 \cdot T}{2L(V_s - V_e)} \quad (2.38)$$

Ou :

$$V_s = V_e \left(1 - \alpha^2 \frac{V_e}{2Lf.I_s} \right) \quad (2.39)$$

Dans ce régime de fonctionnement, la tension de sortie est donc dépendante de la charge pour un rapport cyclique fixe.

Ceci implique qu'en conduction discontinue, il est nécessaire de mettre en œuvre une boucle de régulation [20].

Puissance disponible ou échangée :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_s \langle i_s(t) \rangle \cdot dt \rightarrow P = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2 \cdot T}{L} \frac{V_s \cdot V_e^2}{(V_s - V_e)} \quad (2.40)$$

Conduction critique :

Cette phase définit la limite entre les régimes continu et discontinu [20].

Pour α_{limite} on a : $\Delta t = \beta T - \alpha T = (1 - \alpha)T$ c'est-à-dire $\beta T \cong T$

$$\Delta t = \frac{V_e}{V_s - V_e} \times \alpha_{\text{lim}} \times T = (1 - \alpha_{\text{lim}})T \quad (2.41)$$

Ce qui nous donne finalement :

$$\alpha_{\text{lim}} = \frac{V_s - V_e}{V_s} \quad (2.42)$$

2.6 Dimensionnement du hacheur

Un dimensionnement d'un système consiste à déterminer les expressions qui indiquent les valeurs des paramètres liés aux composants physiques qui le composent, en fonction d'un cahier des charges spécifique. Les valeurs numériques de ces paramètres seront calculées pour un régime de fonctionnement spécifique et un point de fonctionnement spécifique, en se basant sur un cas d'application spécifique.

En ce qui concerne la sécurité de dimensionnement, un coefficient de sécurité (de 1,2 à 2) est appliqué aux valeurs calculées des paramètres. C'est en se basant sur ces valeurs que le choix du composant est effectué.[21]

2.6.1 Détermination de la valeur d'inductance L

Étant donné la fréquence de commutation élevée, la bobine présente un courant de recharge et de décharge presque linéaire. L'ondulation Δi_L est la valeur moyenne IL pendant une période et en régime permanent figure (2.11).

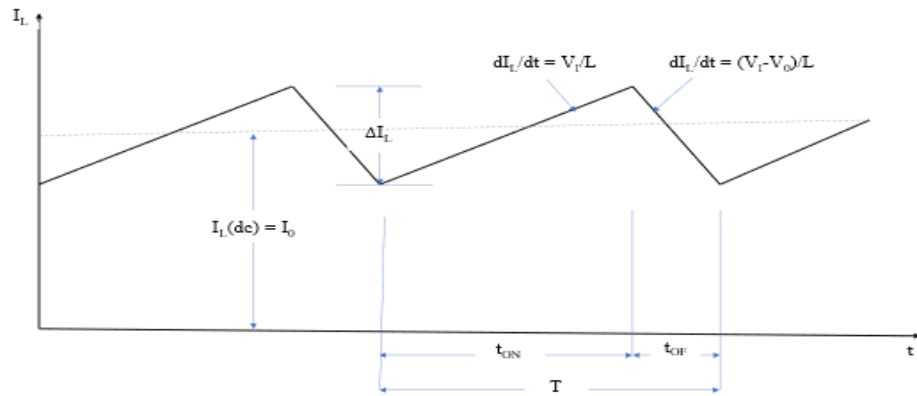


Figure 2.11 Allure simplifiée du courant inductif pour chacun des montages élévateurs

A l'état ON, l'équation différentielle d'entrée devient :

$$V_m = L \times \frac{di_L}{dt} + V_0 \rightarrow \frac{\Delta i_L}{t_{on}} = \frac{V_m - V_0}{L} \leftrightarrow \Delta i_{Lon} = \frac{V_0(1-d)}{f.L} \quad (2.43)$$

Si on veut imposer un taux d'ondulation fixe : $\rho IL = \Delta i_L / I_L$ pour un point de fonctionnement nominal (d, I_L, V_0), on peut déduire l'inductance correspondante comme suit :

$$\Delta i_L = \frac{V_0(1-d)}{f} \times T \rightarrow L = \frac{c(1-d)}{f \times \rho I_L \times I_L} = \frac{V_0(1-d)}{f \times \rho I_L \times I_L} \quad (2.44)$$

Cette inductance est calculée dans le cas d'un hacheur idéal et elle ne correspond qu'au point de fonctionnement nominal. Pour un point flottant, un intervalle de cette inductance doit être trouvé.

Pour assurer un mode de conduction continue CCM, il faut que :

$$I_L - \frac{\Delta I_L}{2} > 0 \leftrightarrow \Delta I_L < 2I_L \quad (2.45)$$

En remplaçant dans l'équation d'ondulation :

$$L > \frac{V_0 \left(1 - \frac{V_0}{V_m}\right)}{2.10.f} \quad (2.46)$$

L'intervalle des points de fonctionnement du hacheur est déterminé par les bornes limites des intervalles de la tension et du courant de charge V_o et I_o respectivement. L'intervalle de l'inductance minimale sera déduit comme suit :

$$L_{min} = \text{Max} \left\{ \frac{V_o \left(1 - \frac{V_o}{V_m}\right)}{2 \cdot I \cdot f} \right\} \rightarrow L_{min} = \frac{V_{min}}{8 \cdot I_{min} \cdot f_{min}} \quad (2.47)$$

La taille de l'inductance diminue avec l'augmentation de la fréquence de commutation [22].

2.6.2 Détermination de la valeur de capacité C :

L'équation différentielle décrivant le rechargement de condensateur C'est la même qui décrit sa décharge.

$$I_L = C \times \frac{dV_{out}}{dt} + i_{out} \quad (2.48)$$

Ainsi, une valeur de capacité simple est suffisante pour maintenir une tension de sortie V_o parfaitement lisse, voire constante. La capacité du condensateur devient de plus en plus complexe à déterminer. Pour cela, des techniques différentes de celles de l'inductance L sont employées.

La méthode la plus facile consiste à établir une capacité C de valeur suffisante et connue pour les montages de type "hacheur de base". Elle a une capacité allant de $100\mu F$ à $4700\mu F$. Cette valeur imposée sert de fondement à l'analyse et au dimensionnement des autres composants.

Une alternative supplémentaire est de prendre en compte la tension de sortie en tant que composante continue, avec sa valeur moyenne comme composante continue. Cet ensemble de signaux provient de l'oscillateur RLC[23].

La capacité sera exceptionnellement donnée en fonction de l'inductance L .

$$C = \frac{d \cdot (1-d)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \frac{\Delta V_{out}}{V_{out}}} \quad (2.49)$$

Pour un mode de conduction continue, la capacité doit dépasser un certain minimum C_{min} :

$$V_{out} > \frac{\Delta V_{out}}{2} \rightarrow C > \frac{d(1-d)}{16 \cdot L \cdot f^2} \quad (2.50)$$

2.7 Commandes de suivi du point de puissance maximale

Les commandes de suivi du point de puissance maximale au en anglais « Maximum power point trac King » ont pour objectif de faire fonctionner le système sur le point maximum de la caractéristique puissance en fonction de la tension, il existe des réglementations spécifiques pour conduire des dispositifs à fonctionner avec des points maximums de leurs caractéristiques, sans qu'ils soient préalablement connus, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont n'été modifiés ni quelles sont les raisons de cette modification[24]. En ce qui concerne les sources énergétiques,

cela se manifeste par des maxima de puissance. Dans la littérature, ce genre de commande est fréquemment appelé du Point de Puissance Maximum en anglais «Maximum Power Point Tracking». Les commandes ont pour objectif de trouver le point de puissance maximal (PPM) tout en garantissant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge afin de transférer le maximum de puissance [24].

La figure (2.12) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on réalise une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

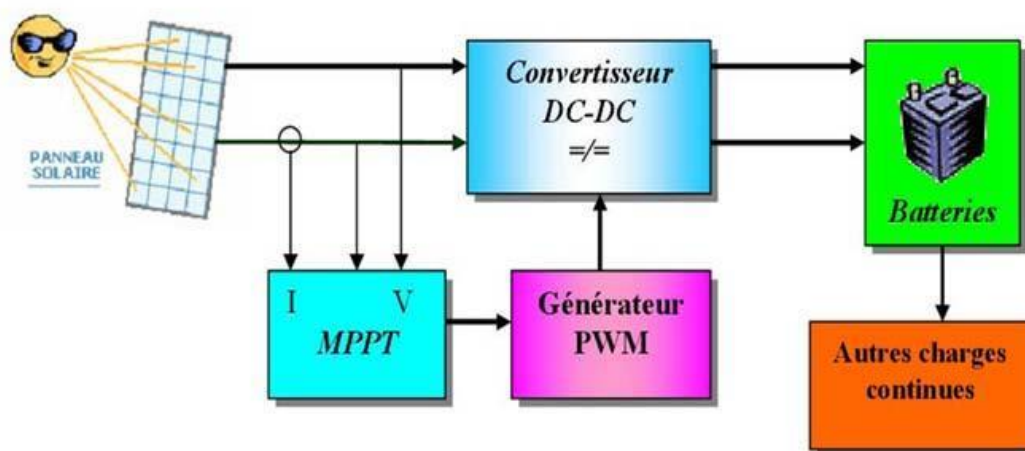


Figure 2.12 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec un commande MPPT

Les approches utilisées reposent sur des algorithmes de recherche itérative afin de déterminer le point de fonctionnement optimal du module solaire, afin d'optimiser la puissance générée sans perturber le fonctionnement du système.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_v = I_{pv} \cdot V_{pv}$

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP.

2.8 Principe de la commande MPPT

En termes de définition, une commande MPPT, combinée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de manière à optimiser constamment sa puissance. De cette manière, peu importe les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande

du convertisseur ajuste le système pour atteindre son maximum de fonctionnement (VPPM et IPPM). Un convertisseur statique (CS) sera utilisé pour optimiser la chaîne de conversion photovoltaïque, commandé par une MPPT [25].

On peut le visualiser en utilisant le schéma de la figure (2.13).

La commande MPPT permet de modifier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) en utilisant un signal électrique adéquat afin de maximiser la puissance offerte par le GPV. La recherche du MPP peut être plus ou moins complexe grâce à l'algorithme MPPT. En règle générale, il repose sur la fluctuation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de celui-ci (I et V, et donc de la puissance du GPV) jusqu'à atteindre le MPP [26].

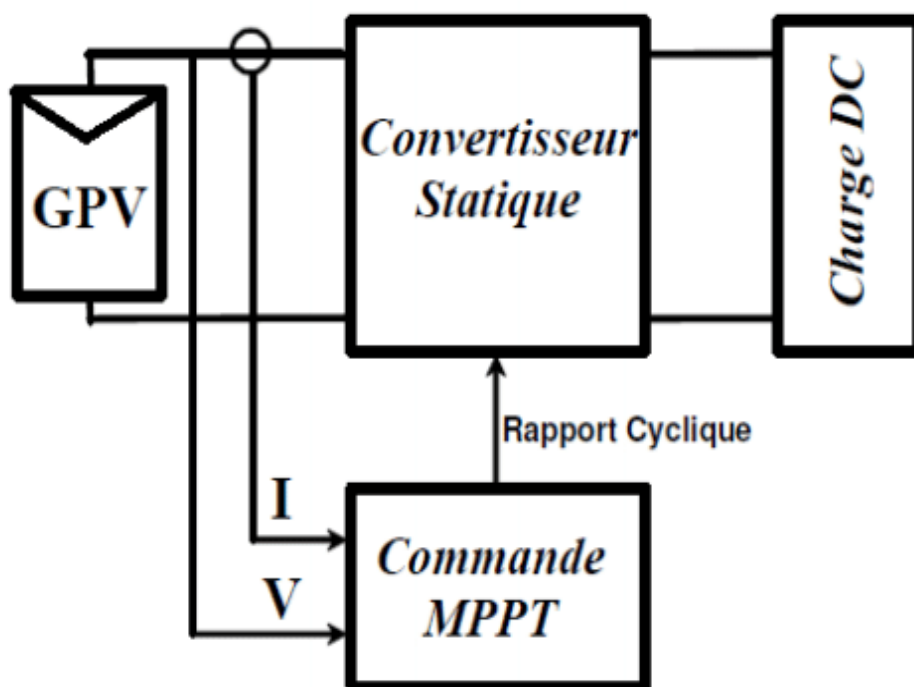


Figure 2.13 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge

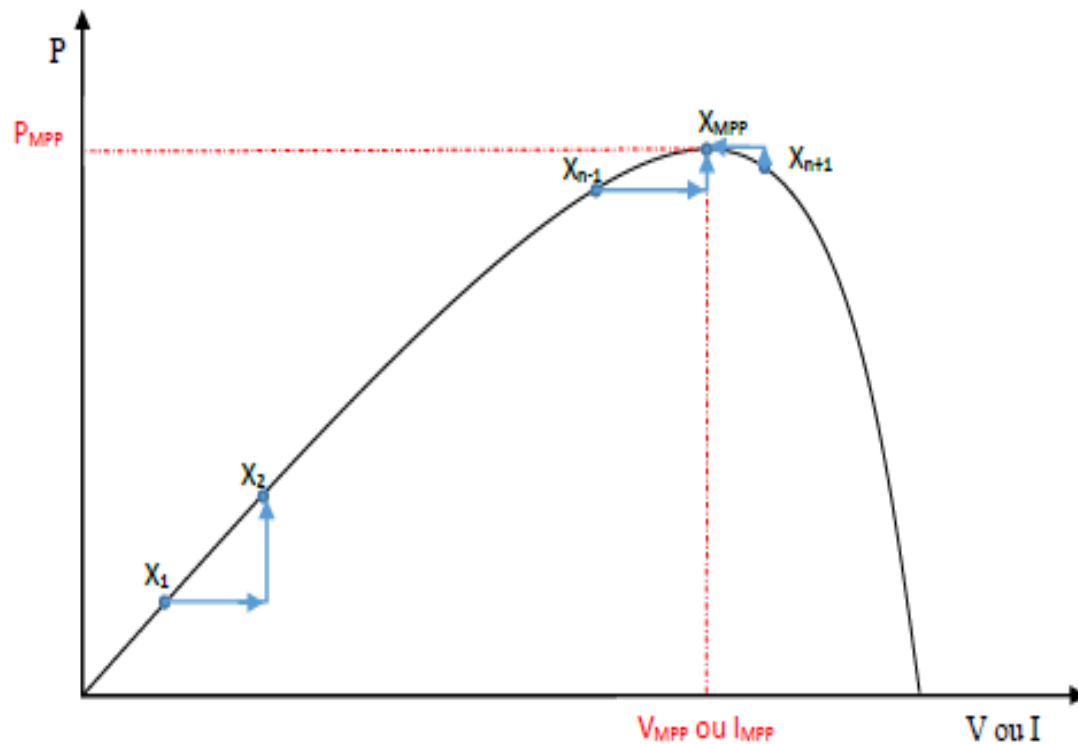


Figure 2.1 Principe de la commande MPPT

2.9 Classification des commandes MPPT

Les commandes MPPT peuvent être classées de manière générale en fonction du type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Néanmoins, il est plus pertinent de les classer en fonction du type de recherche qu'elles mènent et des paramètres d'entrée de la commande MPPT [27].

2.9.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée

2.9.1.1 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée

Il existe plusieurs commandes MPPT qui cherchent le PPM en fonction de l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Les algorithmes d'incrément de conductance, tels que la méthode de Perturb&Observe, utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour appliquer une action de contrôle appropriée pour le suivi du PPM. De plus, les commandes reposent sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{cc}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont

encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [27].

2.9.1.2 Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie

Il y a aussi dans la littérature des algorithmes qui se basent sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple, On utilise principalement les commandes MPPT qui se concentrent sur la maximisation du courant de sortie lorsqu'il s'agit d'une batterie chargée.

Dans tous les systèmes où les paramètres de sortie sont utilisés, une estimation d'est effectuée en utilisant le rendement du convertisseur. En résumé, à mesure que l'étage de conversion est élevé, cette approximation est plus valide. En revanche, de manière générale, tous les systèmes qui utilisent un seul capteur sont, par nature, peu précis. La majorité de ces systèmes ont été initialement destinés à l'espace [27].

2.9.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

2.9.2.1 MPPT indirect

Ce genre d'ordres MPPT exploite la relation existante entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être aisément identifiées, et la position approximative du point de référence. Il prend également en compte les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV établie à partir d'un modèle paramétrique préalablement défini. Il y a également des commandes qui permettent de maintenir une tension optimale en se basant uniquement sur les fluctuations de la température des cellules fournies par un capteur. L'avantage de ces commandes est qu'elles sont faciles à exécuter. Elles sont principalement conçues pour des systèmes abordables et peu précis qui doivent fonctionner dans des régions géographiques où les changements climatiques sont peu fréquents [27].

2.9.2.2 MPPT Direct

Le point de fonctionnement optimal (MPP) de ce type de commande MPPT est déterminé en se basant sur les courants, les tensions ou les puissances mesurées dans le système. Il a donc la capacité de faire face à des modifications imprévisibles du fonctionnement du GPV. En règle générale, ces méthodes reposent sur un algorithme de recherche qui permet de déterminer le maximum de la courbe de puissance sans interruption du fonctionnement. Ainsi, on augmente la tension du point de fonctionnement à des intervalles réguliers. La direction de recherche est conservée pour l'étape suivante si la puissance de sortie est plus élevée, sinon elle sera inversée. Le véritable point de fonctionnement varie donc autour du MPP. D'autres algorithmes peuvent protéger ce principe fondamental contre les erreurs d'interprétation. Ces fautes peuvent se produire,

Par exemple, en raison d'une direction de recherche incorrecte, qui entraîne une augmentation de puissance causée par une augmentation rapide du niveau de rayonnement. Pour calculer la puissance du générateur PV, qui est essentielle pour trouver le MPP, il est essentiel de mesurer la tension et le courant du générateur, ainsi que de les multiplier. D'autres algorithmes utilisent des variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur afin de comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV, afin de placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. Ce genre de commandes présente l'avantage de leur précision et de leur réactivité rapide [27].

2.10 Les algorithmes MPPT

Différents principes de fonctionnement des commandes MPPT, plus ou moins efficaces, sont établis en fonction des caractéristiques du GPV. Dans ce chapitre, une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants nous a donné une bonne compréhension de ce qui était déjà présent et des points à améliorer. Cela a servi de fondement théorique à nos recherches sur les simulations dans le prochain chapitre.

2.10.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturbe And Observe)

En général, la méthode P&O est la plus couramment employée en raison de sa simplicité et de sa facilité d'exécution. Cette méthode, comme son nom l'indique, s'appuie sur la modification (une augmentation ou une diminution) de la tension ou du courant et l'analyse de la répercussion de cette modification sur la puissance mesurée ($P=VI$) [28]. Toutefois, le MPP est caractérisé par une variable idéale qui fluctue peu lors d'un changement climatique. Le courant est plus influencé par la variation du rayonnement que par la tension photovoltaïque. En revanche, la fluctuation de la température affecte davantage la tension du GPV. Cependant, l'évolution de la température est lente et se déroule sur une plage limitée. Ainsi, il est recommandé de surveiller la tension du GPV [29].

Le principe du P&O est de créer une perturbation de faible intensité sur la tension, ce qui entraîne une fluctuation de la puissance [30]. Selon la Figure (2.15), il est possible de conclure qu'une augmentation positive de la tension entraîne une augmentation de la puissance, ce qui indique que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM. Si la puissance diminue au contraire, cela signifie que le système a dépassé le PPM. On peut faire un raisonnement similaire lorsque la tension diminue. En analysant ces différentes variations de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est donc aisé de déterminer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de faire converger ce dernier vers le PPM à travers un ordre de commande approprié.

En analysant ces différentes variations de tension sur la caractéristique $P(V)$, il devient ainsi aisé de déterminer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance en utilisant un ordre de commande adéquat. Pour ce genre de commande, il est essentiel d'avoir deux capteurs (courant et tension du GPV) afin de mesurer la puissance du GPV à chaque instant. Il est préférable d'utiliser un microprocesseur pour réaliser la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être employés [31].

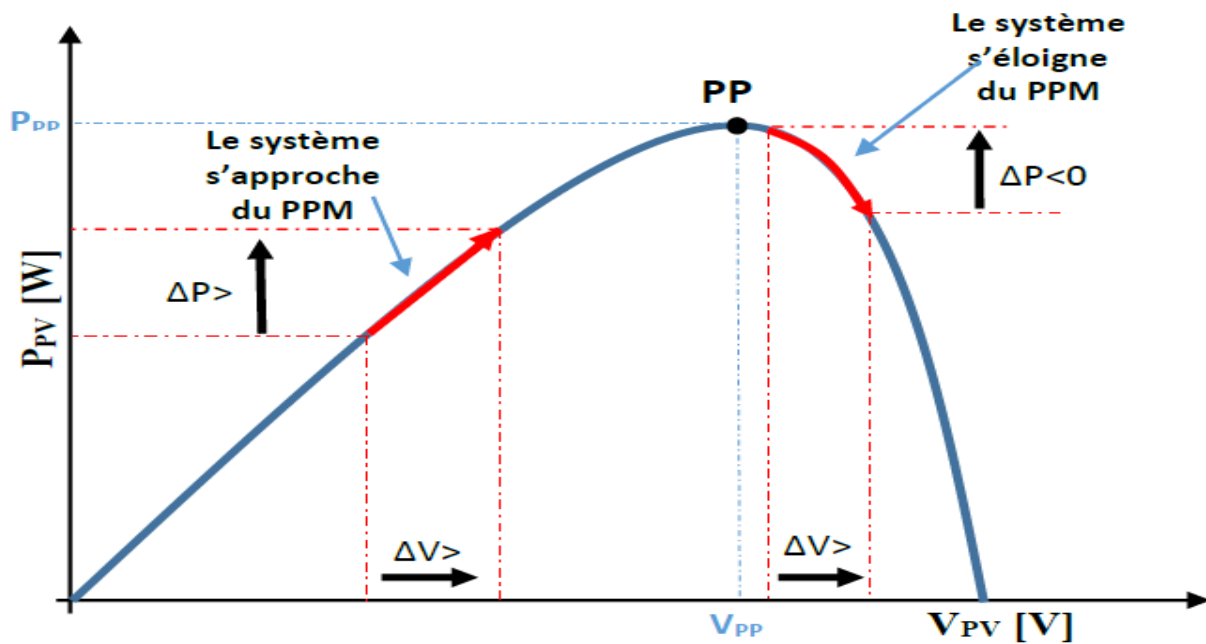


Figure 2.2 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

La figure (2.16) représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

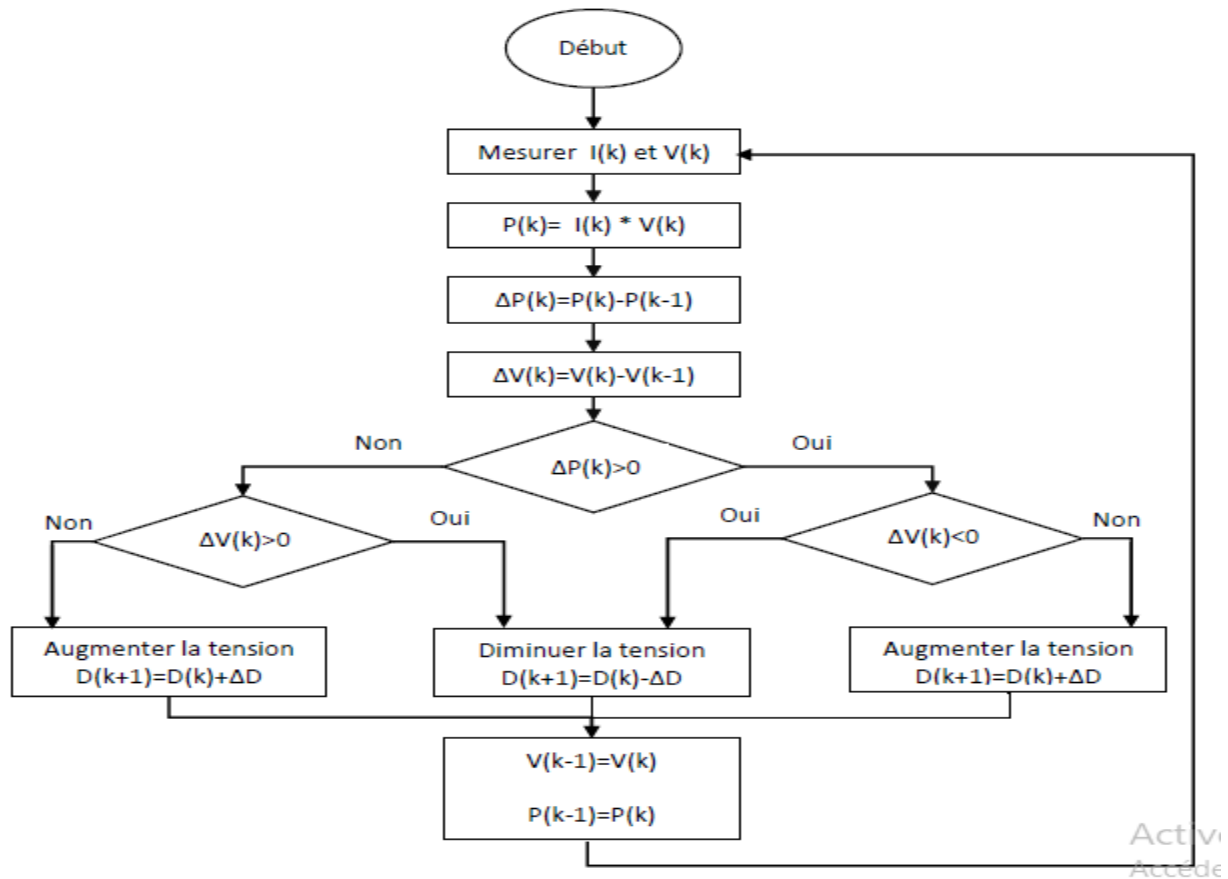


Figure 2.16 Algorithme de P&O classique

2.11 Résultats de simulation de la commande P&O avec convertisseur boost

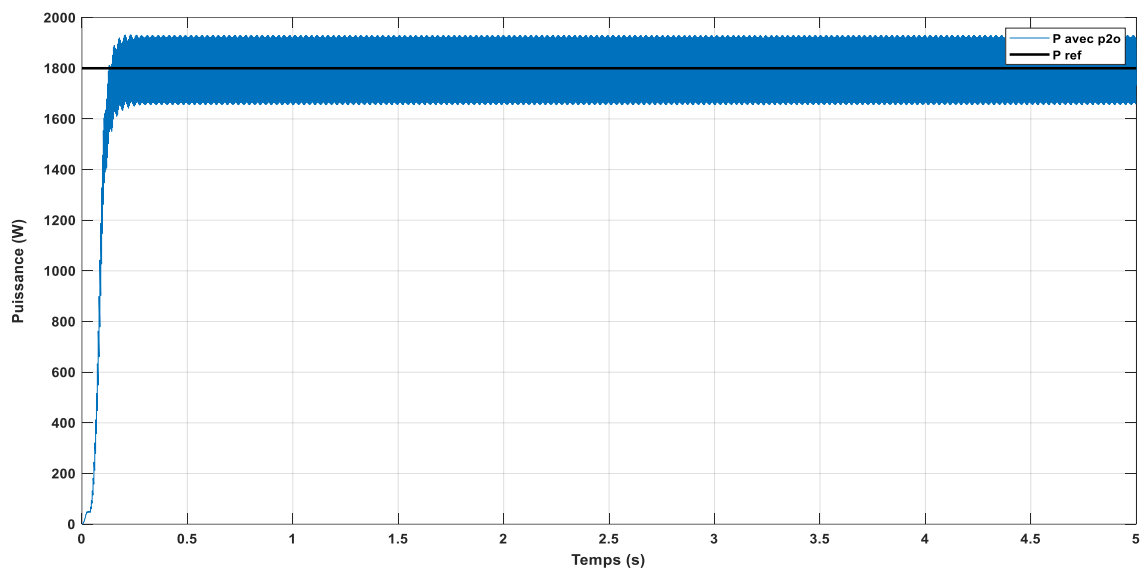


Figure 2.17 Résultat de la simulation de la méthode P&O avec des conditions standards

L'évolution de la puissance en fonction du temps est illustrée dans ce graphique pour un système photovoltaïque (PV) qui fonctionne dans des conditions normales, avec une irradiance de 1000 W/m² et une température de 25°C. Voici une analyse des éléments du diagramme :

- **Comportement des courbes** : Les courbes montrent la puissance produite par le système PV sur une période de 5 secondes.

La courbe (P avec P&O) et la courbe (P_{ref}) augmentent rapidement au début, se stabilisant ensuite à un certain niveau de puissance.

Analyse des segments de courbes : La puissance augmente d'abord rapidement, atteignant environ 1600 W en moins de 0,2 seconde.

À la suite de cette première montée, les courbes se stabilisent. La courbe (P avec P2O) est un peu plus élevée que la courbe (P_{ref}).

La courbe P avec P2O présente une légère différence de puissance par rapport à P_{ref} , ce qui suggère que le système avec P2O génère un peu plus de puissance.

- **Interprétation** :

o Dans des conditions normales (irradiance de 1000 W/m² et température de 25°C), les courbes indiquent que le système photovoltaïque avec l'ajout de P2O génère une puissance légèrement supérieure par rapport au système de référence sans P2O.

o Après la stabilisation initiale, la différence de puissance entre les deux courbes reste constante, ce qui laisse entendre que l'ajout de P2O améliore légèrement l'efficacité ou les performances du système photovoltaïque.

En résumé, cette représentation graphique démontre que le système photovoltaïque avec P2O présente une performance légèrement supérieure dans des conditions standard par rapport au système de référence, avec une augmentation rapide de la puissance au début suivie d'une stabilisation légèrement plus puissante.

2.11.1 Simulation de l'algorithme P&O avec une variation (irradiations)

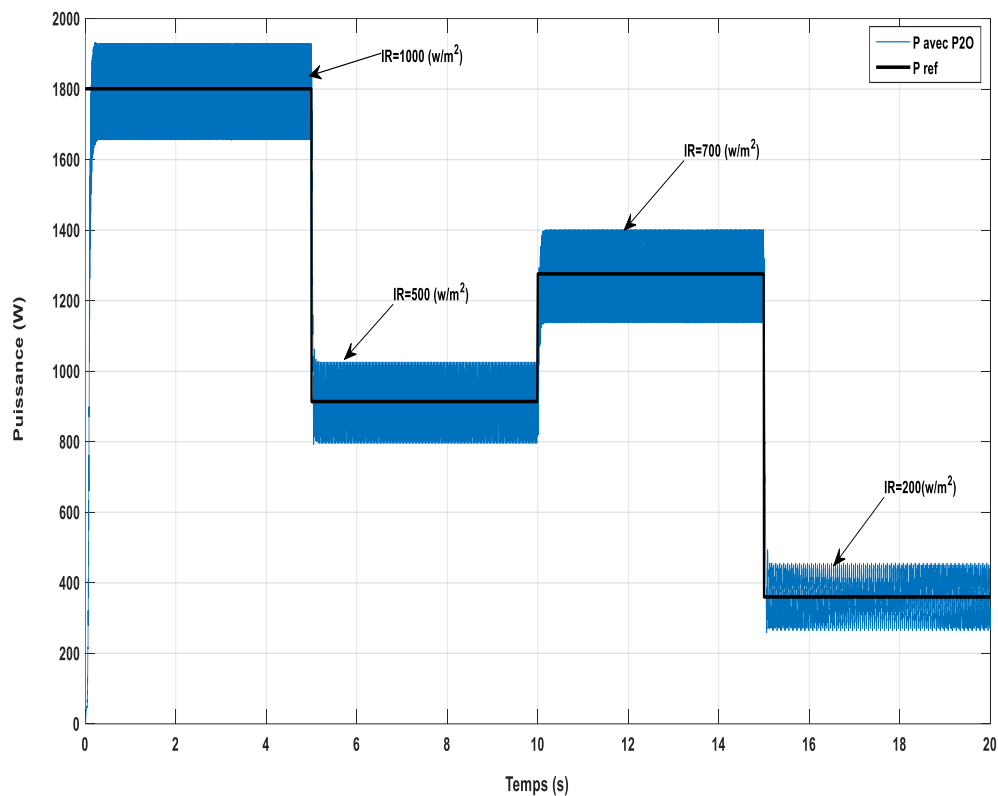


Figure 2.18 Puissance en fonction du temps avec variation d'irradiation

La simulation de système sous des irradiances de 200W/m² à 500W/m² et 700W/m² jusqu'à 1000W/m² a permis de tracer les graphes représentés dans les figures ci-dessous.

L'évolution de la puissance en fonction du temps pour un système photovoltaïque utilisant la méthode de commande P&O est illustrée dans ce graphique, en fonction des intensités de rayonnement (I_r , en W/m²).

Interprétation

- Durée de 0 à 5 secondes ($IR = 1000 \text{ W/m}^2$) : La puissance augmente rapidement jusqu'à environ 1800W, ce qui correspond à l'intensité de rayonnement maximale. La production de puissance atteint et conserve la puissance de référence (P_{ref}).
- Durée entre 5 et 10 secondes ($IR = 500 \text{ W/m}^2$) : L'intensité du rayonnement passe à 500 W/m² à environ 4 secondes, ce qui entraîne une diminution de la puissance produite à environ 1000 W. La technique P&O modifie rapidement la puissance afin de s'adapter à cette nouvelle situation.

- Durée de 10 à 15 secondes ($IR = 700 \text{ W/m}^2$) : Au bout de 8 secondes, l'intensité du rayonnement passe à 700 W/m^2 , ce qui entraîne une augmentation de la puissance produite à environ 1400 W . Le système s'ajuste une fois de plus pour atteindre la nouvelle puissance de référence.
- Pendant une période de 15 à 20 secondes ($IR = 200 \text{ W/m}^2$) : À 12 secondes, l'intensité du rayonnement diminue à 200 W/m^2 , ce qui entraîne une diminution de la puissance environ 400 W . La puissance générée par le système est ajustée en fonction de ce nouveau niveau de rayonnement.

Notes

- L'algorithme P&O présente une grande réactivité en ajustant la puissance produite en fonction des variations d'intensité du rayonnement solaire. Le système peut surveiller attentivement la puissance de référence malgré les variations de l'irradiance.
- Puissance Maximale : Le système parvient à atteindre et à maintenir la puissance maximale envisageable pour chaque niveau d'irradiance, ce qui prouve la capacité de l'algorithme P&O à optimiser la production énergétique.

En résumé, après avoir interprété. Ce schéma montre comment l'algorithme P&O fonctionne dans un contexte dynamique où l'intensité du rayonnement solaire fluctue. L'algorithme s'ajuste de manière efficace aux modifications, ce qui permet au système de générer la puissance maximale dans chaque situation.

2.11.2 Simulation de l'algorithme P&O avec une variation (température)

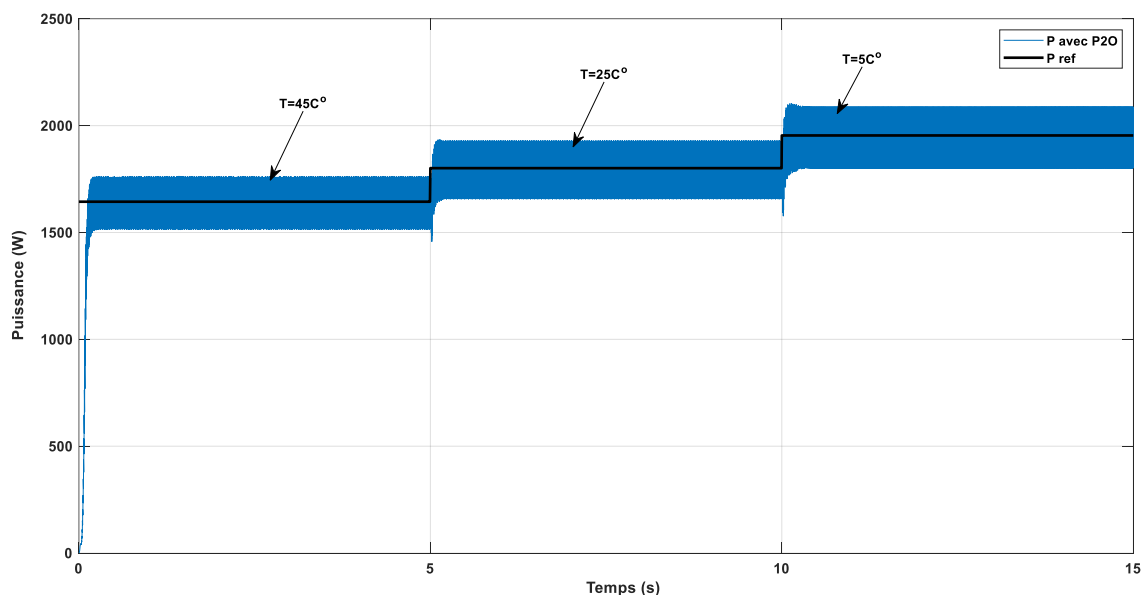


Figure 2.19 Puissance en fonction du temps avec variation de température

La simulation de système sous des Température de 5°C à 25°C jusqu'à 45°C a permis de tracer les graphes représentés dans les figures ci-dessous.

Ce schéma illustre comment la puissance évolue au fil du temps pour deux courbes distinctes : P avec P&O et P_{ref} . Voici une analyse des éléments du diagramme :

- **Comportement des courbes** : Des annotations sur le graphique indiquent trois niveaux de puissance différents à trois températures différentes : 45°C, 25°C et 5°C.

La courbe de puissance évolue brusquement à chaque température et se stabilise à un nouveau niveau.

- **Interprétation** :

- À l'origine (à $T=0$ s), la puissance débute à environ 1644 W pour P avec P&O et légèrement inférieure pour P_{ref} .
- Au bout de 5 secondes, la puissance augmente à 25°C, atteignant environ 1800W avec P&O, tandis que P_{ref} se stabilise légèrement en dessous.
- Environ 10 secondes plus tard, la puissance augmente à nouveau à une température de 5°C, avec une puissance de P avec P&O atteignant environ 1954 W et une puissance de P_{ref} légèrement inférieure à cette valeur.

À chaque niveau de température, la puissance de P avec P&O est légèrement supérieure à celle de P_{ref} , ce qui laisse entendre que l'effet de P&O augmente légèrement la puissance produite à chaque température testée.

Pour récapituler, le diagramme montre comment la température influence la puissance produite dans deux conditions distinctes (avec et sans P&O). À chaque niveau de température, la courbe (avec P&O) présente toujours une puissance supérieure à la courbe (référence).

2.12 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons commencé la section la plus cruciale de cette recherche. L'objectif est de décrire les hacheurs tout en présentant les diverses catégories de hacheurs, ainsi qu'un rappel théorique sur chaque catégorie. Par la suite, nous avons exposé le concept de la recherche du point de puissance maximale en utilisant le terme « MPPT » ainsi que les diverses méthodes (algorithmes) les plus couramment utilisées dans la recherche. Finalement, une analyse comparative a été présentée entre les méthodes de commande MPPT traditionnelles « Perturbe & Observe » et « Incrément des conductances ».

Dans le prochain chapitre, nous allons simuler un système photovoltaïque afin d'évaluer la tension et la puissance en sortie du convertisseur.

CHAPITRE III

COMMANDE ADAPTATIVE ET IDENTIFICATION DUN SYSTEME PV

CHAPITRE III

COMMANDE ADAPTATIVE ET IDENTIFICATION DUN SYSTEME PV

3.1 Introduction

La commande adaptative joue un rôle crucial dans les applications industrielles, car elle permet d'ajuster le régulateur en ligne en fonction des variations du processus régulé afin de garantir une qualité constante des performances, même lorsque les paramètres du régulateur sont modifiés.

Les méthodes de commande sont inconnues ou changent au fil du temps [35].

Au cours de ce chapitre, nous examinerons en détail l'aspect théorique et le principe de la commande adaptative, en mettant en évidence ses diverses classes et approches, en particulier la commande adaptative indirecte qui est l'objet de notre étude. Finalement, nous examinons un cas concret de la synthèse de cette commande.

3.2 Commande Adaptative

La commande adaptative regroupe différentes idées et méthodes utilisées pour ajuster automatiquement en ligne et en temps réel les régulateurs utilisés dans la gestion d'un processus, dans le but de réaliser ou de maintenir un niveau spécifique de performance.

Désirées lorsqu'on ne connaît pas ou que les paramètres de ce processus varient au fil du temps [36].

Dans la plupart des cas, un système de commande adaptative évalue un indice de performance (IP) du système à commander en fonction de l'écart entre la sortie souhaitée et la sortie mesurée. Les paramètres du système ajustable ou ajustable sont contrôlés par le mécanisme d'adaptation.

Ajoute un signal de commande supplémentaire en suivant une stratégie spécifique pour réduire l'IP. Le principe général d'un système de commande adaptative est illustré dans la figure (3.1) [35].

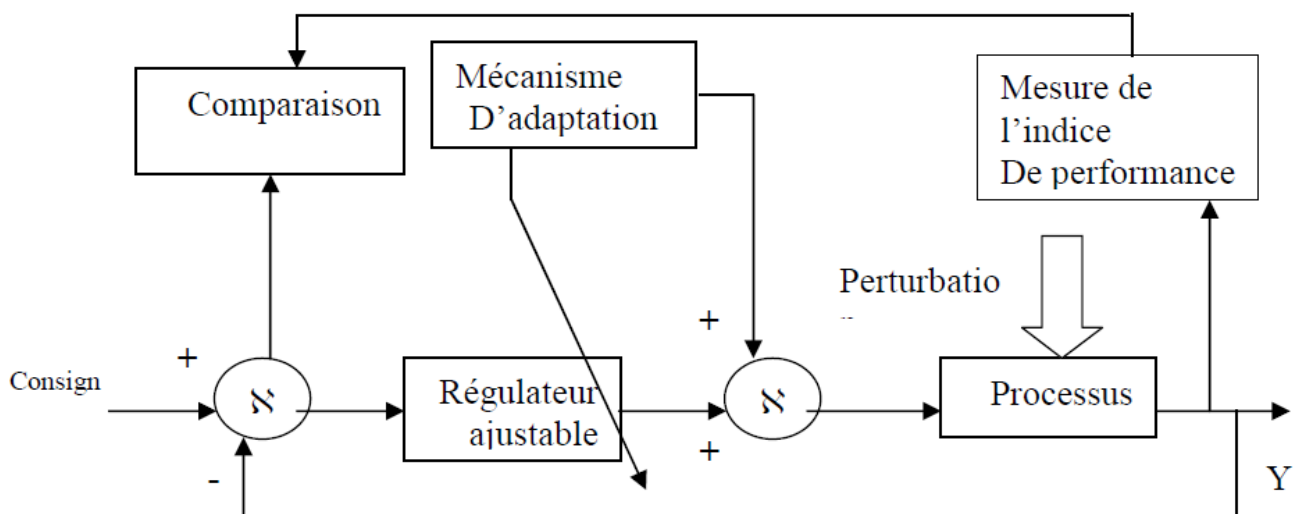


Figure 3.1 Principe d'un système de commande adaptative

Trois approches ont été essentiellement considérées pour le développement des stratégies de la Commande adaptative destinées aux procédés à paramètres inconnus et/ou variables dans le Temps :

- Approximation des stratégies de commande optimale stochastique.
- Système de commande auto-ajustable (self-tuning control).
- Commande adaptative à modèle de référence (MRAC).

Les stratégies qui en découlent entraînent l'utilisation de deux grandes techniques adaptatives qui ont été largement utilisées jusqu'à présent en pratique [37]. Ces deux principales méthodes sont :

- Commande directe adaptative.
- Commande indirecte adaptative.

3.2.1 Commande adaptative directe

Le concept est de calculer les paramètres du régulateur sans explicitement identifier les paramètres du système, ce qui justifie la terminologie de commande directe. Souvent, cette méthode emploie des algorithmes plus rapides et encourage une utilisation plus rapide.

Utilisation en direct. Elle est relativement attrayante en raison de sa facilité d'installation. Parmi les applications réalisées, on peut citer de manière non exhaustive des applications sur de grandes structures flexibles, des robots manipulateurs, des commandes de conduite de bateaux, des moteurs à courant continu, en aéronautique, sur des missiles et des servomécanismes non linéaires avec des incertitudes qui varient au fil du temps [35].

La commande adaptative directe à modèle de référence (CAMR) est la technique adaptative directe la plus populaire et la plus utilisée à ce jour en pratique.

Le schéma présenté dans la figure (3.2) représente ce genre de commande, où les performances de la On définit les boucles fermées en utilisant un modèle de référence sélectionné par l'utilisateur de manière cohérente avec les capacités intrinsèques du système [35].

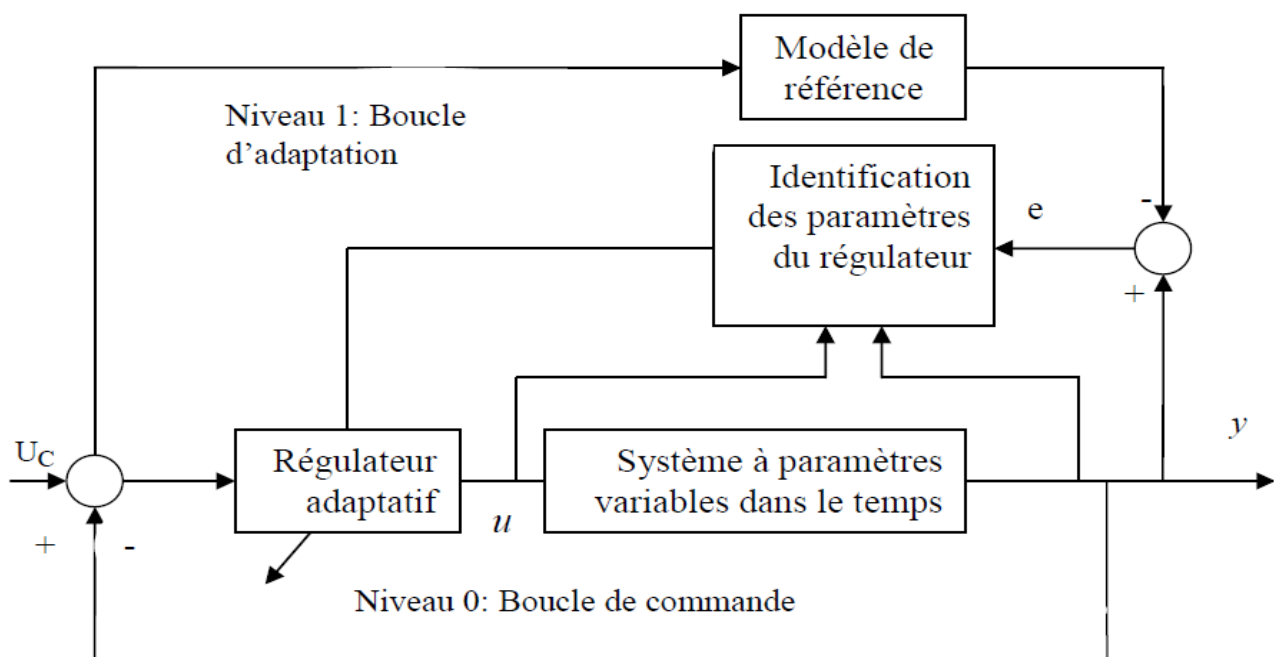


Figure 3.2 Structure de la commande adaptative directe

3.2.2 Commande adaptative indirecte

En 1958, Kelman a introduit la commande indirecte MIAC, également connue sous le nom de commande auto-ajustable. Cette stratégie repose sur les principes de séparation et d'équivalence.

Ce principe de séparation est utilisé pour concevoir un régulateur adaptatif. La figure (3.3). Présente le schéma synoptique de la commande indirecte MIAC [35].

Niveau 1: Boucle d'adaptation

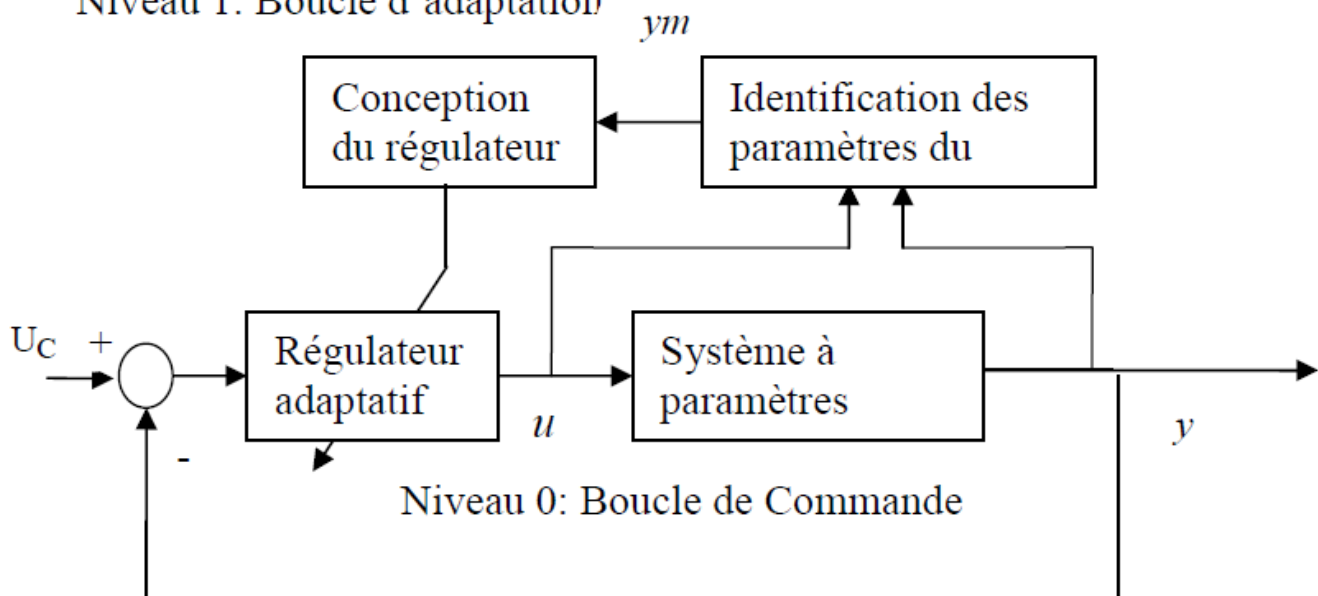


Figure 3.3 Structure de la commande adaptative indirecte

Cette méthode repose sur l'estimation des paramètres du modèle dynamique employé lors de la synthèse de la loi de commande. L'évaluation du modèle du système est réalisée de manière distincte de la conception du régulateur, c'est-à-dire que seul le critère de commande est pris en compte.

pour la phase de synthèse de ce dernier sans prendre en compte les résultats de l'estimation. En d'autres termes, toute erreur d'identification nécessaire n'est pas considérée lors de la phase de synthèse de la loi de commande (séparation complète des deux étapes), ce qui justifie l'utilisation de la terminologie de commande adaptative indirecte.

3.3 Structure des régulateurs indirecte (auto-ajustables)

Le fonctionnement de ces régulateurs est illustré par le schéma-bloc de la figure (3.4). Il est possible de distinguer deux boucles [38].

- Une boucle principale, représentant la boucle de réglage conventionnelle ;
- Une boucle superposée à la boucle principale, composée d'un bloc d'identification du Processus et d'un bloc de calcul des paramètres du régulateur ;

La mise en place d'une commande adaptative à l'aide d'un régulateur auto-ajusté se déroule donc en deux étapes :

- Identification du processus ;
- Mise à jour des paramètres du régulateur.

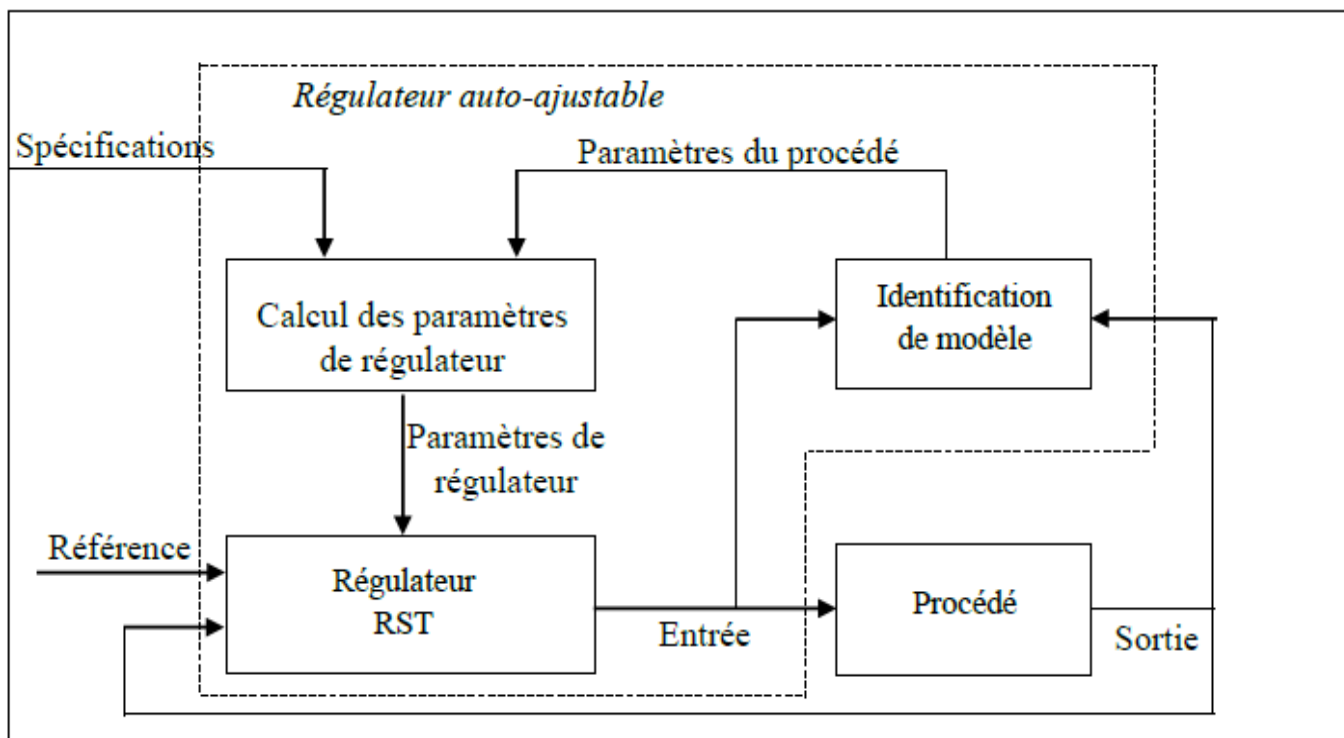


Figure 3.4 Schéma bloc du régulateur Auto-Ajustable

Après avoir identifié les paramètres du processus, ils sont ensuite transmis au bloc de calcul des paramètres du régulateur. Selon les paramètres reçus et les spécifications définies par le cahier des charges (rapidité, amortissement,), ce dernier mettra à jour les informations.

Les nouveaux paramètres du régulateur sont automatiquement mis à jour et transmis automatiquement, ce qui permet de le mettre à jour. Le processus mentionné précédemment se reproduira tout au long du fonctionnement de la boucle de réglage.

3.4 Identification du procédé

L'identification consiste à identifier les caractéristiques dynamiques d'un procédé, ce qui est essentiel pour concevoir et mettre en place un système de régulation efficace. D'un point de vue plus pratique, l'identification est une méthode.

Cette méthode expérimentale permet d'obtenir un modèle reliant les entrées aux sorties en utilisant les mesures effectuées sur la variable souhaitée, avec une erreur minimale avec les valeurs mesurées.

Les étapes du processus d'identification sont les suivantes :

- Acquisition des entrées/sorties sous un protocole d'expérimentation.
- Choix du modèle à adopter.
- Estimation des paramètres du modèle.
- Validation du modèle identifié (structure et valeur des paramètres).

De nombreux algorithmes d'identification efficaces, dotés d'une formulation réursive appropriée, ont été créés. La figure (3.5) présente le principe de l'estimation des paramètres des modèles échantillonnés, où $u(k)$ et $y(k)$ sont respectivement les valeurs de $u(k)$. Le système entre et sort à l'instant k [38-39].

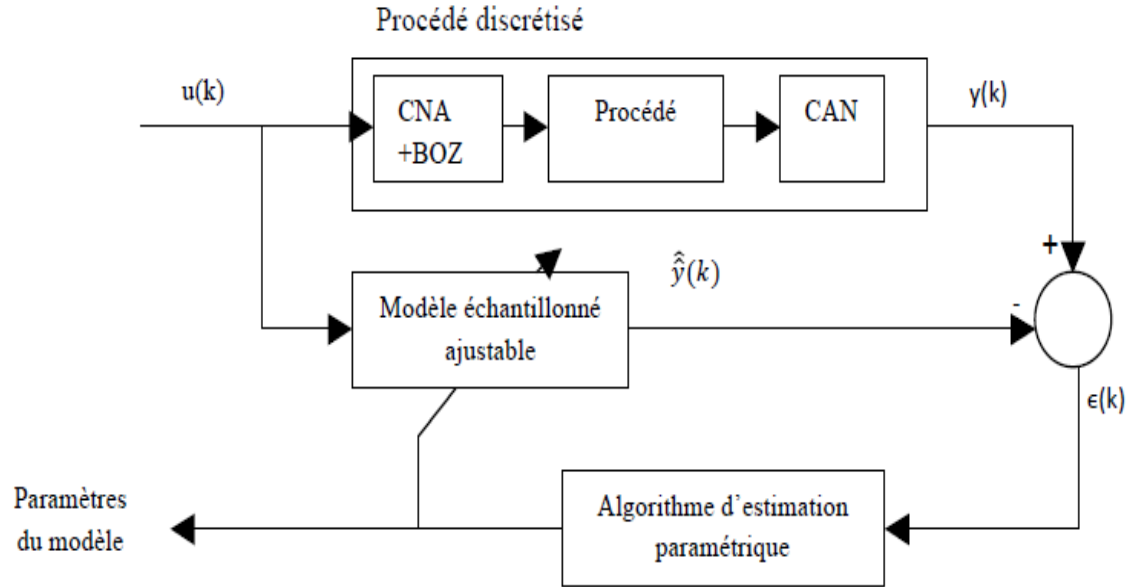


Figure 3.5 Principe de l'identification des modèles

3.4.1 Modèle du procédé

Nous supposons que le système est un modèle monovarié. L'entrée du système sera notée Par $u(k)$, la sortie du système par $y(k)$ [40].

$$(z-1)y(k)=B(z-1)[u(k-d)+v(k-d)] \quad (3.1)$$

Où

$$(z-1)=1+a_1z^{-1}+\dots+a_nz^{-n} \quad (3.2)$$

$$(z-1)=b_0+b_1z^{-1}+\dots+b_mz^{-m} \quad (3.3)$$

$d = n - m$: retard pur.

v : effet de bruit de mesure.

3.4.2 Algorithme des moindres carrés récurifs

Le concept de cette méthode est basé sur la régression linéaire [40.41].

$$\phi(k)=\phi^T(k)\theta+\varepsilon(k) \quad (3.4)$$

L'objectif est de minimiser un critère quadratique correspondant à la somme des carrés de L'écart entre la sortie réelles du processus à identifier et celle du modèle obtenu à chaque instant D'échantillonnage.

$$J(\theta) = \| \varepsilon(k) \|^2 = \varepsilon(k)^T \varepsilon(k) \quad (3.5)$$

$$J(\theta) = (y(k) - \phi(k)\theta)^T (y(k) - \phi(k)\theta) \quad (3.6)$$

Voici la forme générale de l'algorithme RLS (MCR) avec un facteur d'oubli :
Le critère à minimiser a pour expression

$$\hat{\theta}(k) = (\phi^T(k)\phi(k))^{-1} \phi^T(k)y(k) \quad (3.7)$$

Voici la forme générale de l'algorithme RLS (MCR) avec un facteur d'oubli :
Le critère à minimiser a pour expression.

$$J(\hat{\theta}, k) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} [y(i) - \phi^T(i)\hat{\theta}]^2 \quad (3.8)$$

Avec :

λ : facteur d'oubli tel que : $0 < \lambda \leq 1$.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \quad (3.9)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\hat{\theta}(k-1)}{[\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)]} \quad (3.10)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left\{ P(k-1) - \frac{P(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)P(k-1)}{\lambda + \phi^T(k-1)P(k-1)\phi(k-1)} \right\} \quad (3.11)$$

$$y(k) = -a_1(k)y(k-1) - \dots - a_n(k)y(k-n) + b_0(k)u(k-d) + \dots + b_m(k)u(k-m-d)$$

$$\theta = [a_1 \dots a_n, b_0 \dots b_m]$$

$$\phi^T(k-1) = [-(k-1) \dots -y(k-n), u(k-d) \dots u(k-m-d)]$$

$$(k) = \phi^T(k-1)\theta$$

3.5 Identification d'un système photovoltaïque

Les méthodes d'identification estiment les paramètres du PV. Plusieurs méthodes d'identification sont proposées dans la littérature.

L'identification d'un PV Ce titre aborde les différentes méthodes d'identification des paramètres électriques de la caractéristique IV en utilisant le modèle à une diode, Il est bien connu que l'étape d'identification des paramètres de n'importe quel système est une étape déterminante aussi bien pour la simulation que pour la pratique. Donc comme tout système, une connaissance précise des paramètres de panneaux photovoltaïques est indispensable pour la conception, le contrôle de qualité et pour des estimations de leurs performances. Ces paramètres sont souvent déterminés à partir de données expérimentales sous un éclairage et une température bien contrôlée. Les constructeurs des cellules et des panneaux PV fournissent généralement une fiche technique contenant quelques paramètres de la cellule ou du panneau PV composé par un groupement de plusieurs cellules. Mais il y a d'autres paramètres qui ne sont pas fournis sur la fiche technique. En pratique la détermination de ces paramètres inconnus est très importante. Dans cette partie, on aborde une des questions importantes liées aux systèmes photovoltaïques qui consiste à la modélisation et à la détermination de ces paramètres inconnus. En effet, plusieurs méthodes d'identification ont été proposées dans la littérature [42].

Le test standard d'un panneau photovoltaïque fournit la tension de circuit ouvert (V_{os}), courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à la puissance maximale (V_{mpp}), le courant à la puissance maximale (I_{mpp}), aux conditions standard de rayonnement de 100W/m^2 et de température 25°C .

3.6 Méthodes d'identification

Les différentes techniques d'identification peuvent être réparties Comme suit:

- Méthode analytique
- Méthode des cinq points
- Méthode du modèle de reference

3.6.1 Méthode applique au modèle à une diode

Dans cette partie, quelques méthodes sont présentées pour identifier les paramètres associés au modèle à une diode (I_{ph} , I_{01} , A_1 , R_s , et R_{sh}), de l'équation:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3.12)$$

Avec:

- Au point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$)

$$0 = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (3.13)$$

- Au point de court-circuit ($0, I_{cc}$)

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (3.14)$$

- Au point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp})

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (3.15)$$

▪ Méthode analytique

Cette méthode est utilisée pour trouver les paramètres inconnus en utilisant les trois points remarquables de la courbe I-V, et deux autres points. Ces point doivent être :le point de court-circuit ($0, I_{cc}$), le point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$), le point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp}), la pente au point du circuit ouvert qui est R_{s0} , et la pente au point du court-circuit R_{sh0} .

Les expressions suivantes sont tirées de [43].

$$A_1 = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_{s0} - V_{co}}{n_s V_t \left[\ln \left(I_{cc} - \frac{V_{mpp}}{R_{sh0}} - I_{mpp} \right) - \ln \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} + \frac{I_{mpp}}{I_{cc} - (V_{co}/R_{sh0})} \right) \right]} \quad (3.16)$$

$$I_{01} = \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) e^{\left(\frac{-V_{co}}{A_1 n_s V_t} \right)} \quad (3.17)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (3.18)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) \quad (3.19)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{A_1 n_s V_t}{I_{01}} e^{\left(\frac{-V_{co}}{A_1 n_s V_t} \right)} \quad (3.20)$$

Avec d'après la figure:

$$R_{sh0} = - \frac{dV}{dI} \big|_{I=I_{cc}} \quad (3.21)$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \big|_{V=V_{co}} \quad (3.22)$$

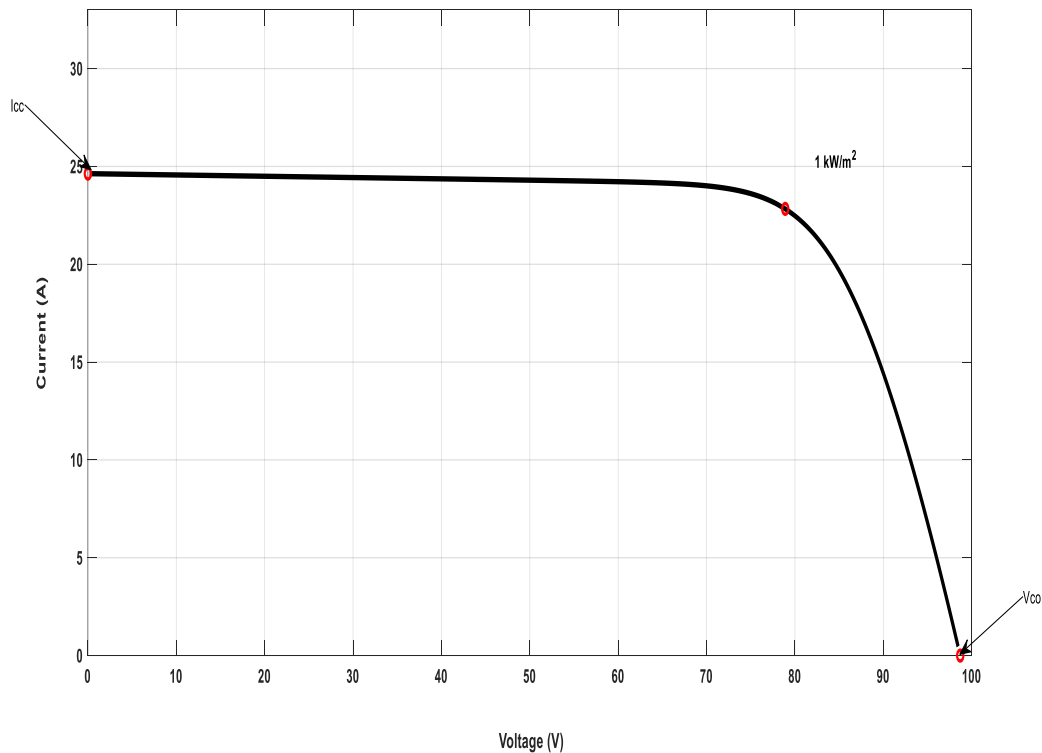


Figure 3.6 Les deux points sur la courbe I-V

▪ Méthode de cinq points

Cette méthode est utilisée pour trouver les paramètres inconnus en utilisant plus de trois points de la courbe I-V au lieu de seulement les trois points remarquables en fonction du nombre d'inconnues pour chaque modèle. Pour le modèle à une diode, cinq points sont nécessaires pour trouver les paramètres inconnus. Cette méthode, basée sur la résolution d'un système de cinq équations non linéaires résultant de l'application de l'équation (2.3) à cinq points qui doivent être

: le point de court-circuit ($0, I_{cc}$), le point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$), le point de puissance maximales (V_{mpp}, I_{mpp}), et deux autres points (V_x, I_x) et

$$(V_{xx}, I_{xx}) \text{ tel que : } V_x = \frac{1}{2} V_{co} \text{ et } V_{xx} = \frac{1}{2} (V_{co} - V_{mpp}) [44].$$

Ces points sont mentionnés sur le tracé de la figure (2.2) :

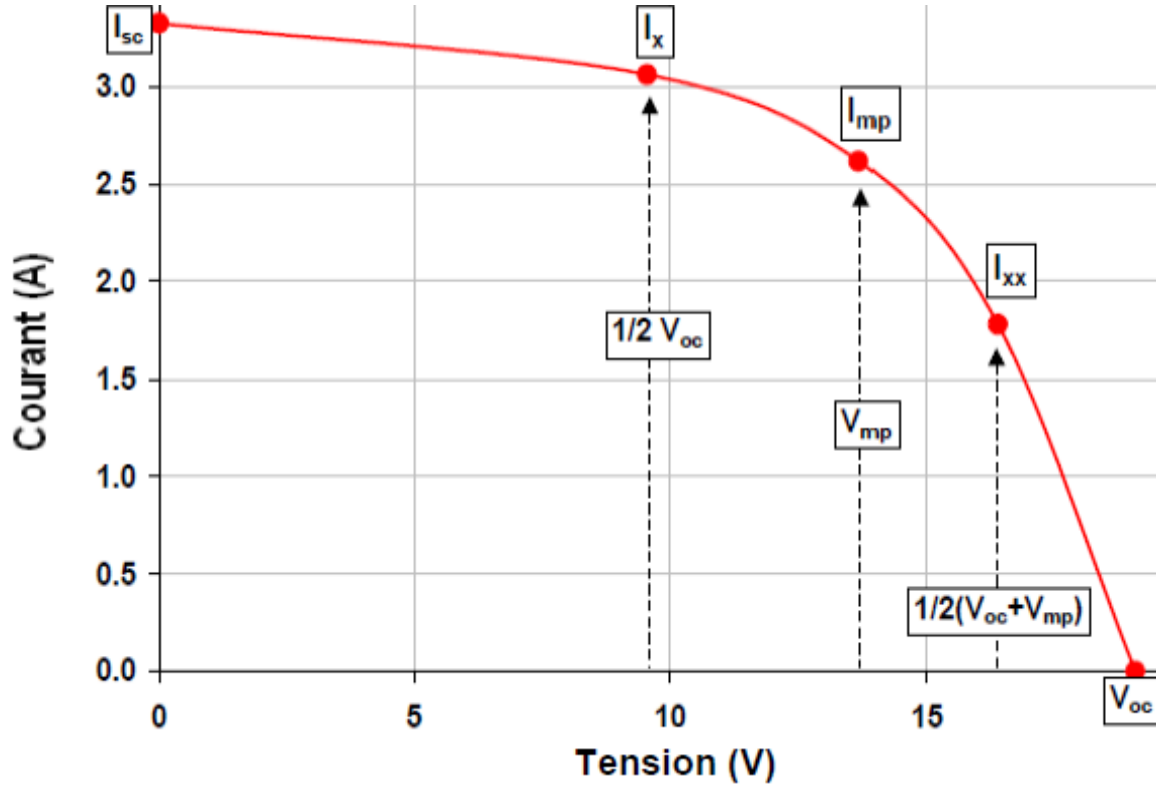


Figure 3.7 Les cinq points sur la courbe I-V

Donc, en réécrivant l'équation (3.12) sous la forme $(I, V) = 0$, aux cinq points considérés, les cinq équations du système sont les suivants :

$$I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (3.23)$$

$$I_{cc} - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.24)$$

$$I_{mpp} - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.25)$$

$$I_x - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{V_x + I_x R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{V_x + I_x R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.26)$$

$$I_{xx} - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.27)$$

Les équations allant de (3.23) à (3.27) constituent donc un système non linéaire qu'on peut résoudre avec des méthodes itératives connues comme la méthode de Newton-Raphson,

▪ Méthode de modèle de référence

Cette méthode utilise des signaux d'entrée-sortie pour identifier les paramètres des modèles mathématiques de structures variées. La figure (3.7) montre le schéma de principe de la méthode [45, 46].

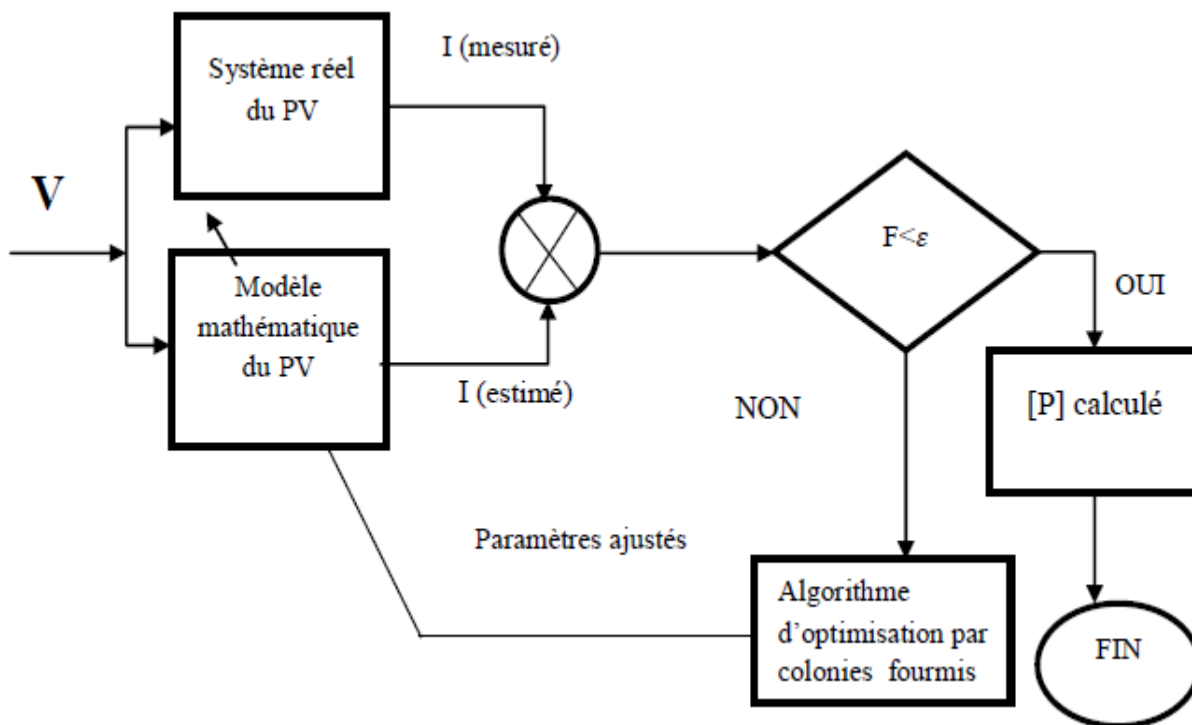


Figure 3.8 Principe d'identification

Les entrées-sorties sont mesurées pour le ou les régimes désirés (transistor permanent). L'estimation du vecteur paramètres est ensuite effectuée en minimisant le critère d'évaluation retenu. Ce dernier représente généralement l'erreur quadratique F entre les grandeurs mesurées sur le système et les grandeurs calculées avec la même tension V que le système.

Le problème consiste à trouver le minimum du critère quadratique F , fonction qui dépend des paramètres. Si le critère est linéaire par rapport aux paramètres, son minimum peut être calculé analytiquement par la méthode des moindres carrés par exemple. Par contre, si la fonction est non linéaire par rapport aux paramètres, la solution est approchée par des algorithmes itératifs de programmation non linéaire.

L'estimation des paramètres du panneau photovoltaïque à l'aide de la méthode du

modèle de référence, c'est-à-dire l'approximation des valeurs expérimentales par un modèle mathématique, repose sur le choix d'un critère objectif qualifiant l'approximation mesure. L'écart entre les mesures effectuées sur le système réel et les valeurs calculées par simulation à partir du modèle est :

$$\varepsilon(k) = I_m(k) - I_c(k) \quad k = 1, \dots, N \quad (3.28)$$

Où N désigne la dimension de vecteur de mesure.

Le but de l'estimation des paramètres est une minimisation de $\varepsilon(k)$ qui ne peut exactement s'annuler à cause des erreurs de mesures ou des erreurs de structure du modèle.

Si nous considérons comme critère F directement $\varepsilon(k)$, nous apercevons que les erreurs positives peuvent compenser les erreurs négatives sur l'ensemble des N mesures. Pour s'affranchir de cette contrainte, deux solutions existent:

- Considérer la valeur absolue de $\varepsilon(k)$;

Considérer le carré de $\varepsilon(k)$.

L'élévation au carré est préférée à la valeur absolue car elle accorde plus d'importance aux grandes erreurs ; elle permet donc une compensation mieux adaptée des

Paramètres.

Donc le critère quadratique s'écrit sous la forme suivante :

$$F = \sum_{k=1}^N \varepsilon(k)^2 = \sum_{k=1}^N \left(I_m(k) - I_c(k) \right)^2 \quad (3.29)$$

Dans ce travail nous utilisons la méthode RLS pour identifier notre système et pour valider c'est méthode nous travaillons sur un programme dans (Matlab) où il transfère les paramètres de système en une fonction de Transfert ou nos paramètres de ce système sont insérés dans un script comme suit :

$V_{in} = 82 \text{ (V)}$

$C = 250 \cdot 10^{-6} \text{ (F)}$

$L = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ (H)}$

$R = 200 \text{ } \Omega$

$D = 0.75$

Les Valeurs des paramètres du système sont définies en définissant les paramètres : V_{in} , C, R, L, D. Il s'agit respectivement de la tension d'entrée, de la capacité, de la résistance, de l'inductance et du rapport cyclique.

Ce programme dépend de deux équations pour calculer le numérateur et le dénominateur de cette fonction de transfert

V_1 : Cette tension est calculée à partir de la tension d'entrée, de la résistance, de la capacité et du rapport cyclique.

$$V_1 = \frac{V_{in}}{RC(1-D^2)} \quad (3.30)$$

V_2 : Cette tension est calculée à partir de la résistance, de l'inductance et du rapport cyclique.

$$V_2 = \frac{R(1-D)}{L} \quad (3.31)$$

La formule de fonction de transfert donne comme suit :

$$FT = \frac{-V_1 S + V_1 V_2}{S^2 + \frac{1}{RC} S + \frac{1-D^2}{LC}} \quad (3.32)$$

Après la simulation le programme affiche la fonction de transfert ;

$$FT = \frac{-3749 S + 7,497.10^7}{S^2 + 20 S + 700000} \quad (3.33)$$

- Identification du Système PV

Il semble que ce programme soit une approche pour identifier un système photovoltaïque (PV) en simulant son fonctionnement à l'aide d'une fonction de transfert. Le système photovoltaïque est représenté par les paramètres définis (V_{in} , C, R, L, D), et la fonction de transfert obtenue (Sys) permet de représenter la relation entre l'entrée (tension) et la sortie (courant ou tension).

- La fonction de transfert représente la manière dont le système photovoltaïque réagit aux variations de l'entrée (tension V_{in}) en prenant en considération les éléments passifs (R, L, C) et le rapport cyclique (D).

En bref, ce logiciel exploite les concepts de la théorie des circuits et des fonctions de transfert afin de représenter un système photovoltaïque, ce qui permet de saisir et de prédire le comportement du système en fonction de diverses conditions d'entrée.

3.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé la commande adaptative de manière générale, puis nous avons focalisé notre attention sur la commande indirecte. Une fois que nous avons examiné en détail cette méthode de commande, nous avons examiné un exemple concret, les résultats de la simulation.

Les résultats obtenus pour ce dernier démontrent l'importance de cette méthode de contrôle pour améliorer les performances en termes de stabilité, de rapidité et de précision.

L'objectif de notre travail est de consacrer le dernier chapitre à l'application de cette stratégie de commande sur le générateur photovoltaïque.

CHAPITRE IV

SIMULATION ET EVALUATION DES RESULTAT

CHAPITRE IV

SIMULATION ET EVALUATION DES RESULTAT

4.1 Introduction

Les panneaux solaires (PV) jouent un rôle essentiel dans la génération d'énergie renouvelable, proposant une solution respectueuse de l'environnement et durable pour satisfaire les demandes croissantes en électricité. Afin de tirer le meilleur parti de ces générateurs, il est primordial d'adopter des méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) performantes. La méthode de Perturbe and Observe (P&O) est couramment employée parmi les méthodes MPPT en raison de sa simplicité et de sa solidité.

De plus, la popularité des stratégies de commande adaptative s'est accrue afin d'améliorer le fonctionnement des générateurs photovoltaïques dans des conditions variables, comme les variations météorologiques et les variations de l'irradiance solaire. Grâce à cette méthode, il est possible d'adapter de manière dynamique les paramètres de contrôle afin de maintenir le générateur photovoltaïque à son état optimal, ce qui améliore son rendement global.

Les résultats de simulations d'un générateur PV équipé d'un MPPT utilisant la méthode P&O et d'une commande adaptative sont présentés dans cette étude. Nous étudions l'impact de ces deux méthodes sur les performances du générateur photovoltaïque dans diverses situations environnementales. Les conclusions obtenues offriront une meilleure compréhension de l'efficacité et de la fiabilité de ces techniques pour optimiser la production d'énergie solaire.

4.2 Simulation d'un convertisseur boost avec un commande MPPT(P&O) et la commande adaptative (MRAC)

4.2.1 Validation de fonction de transféré de MRAC

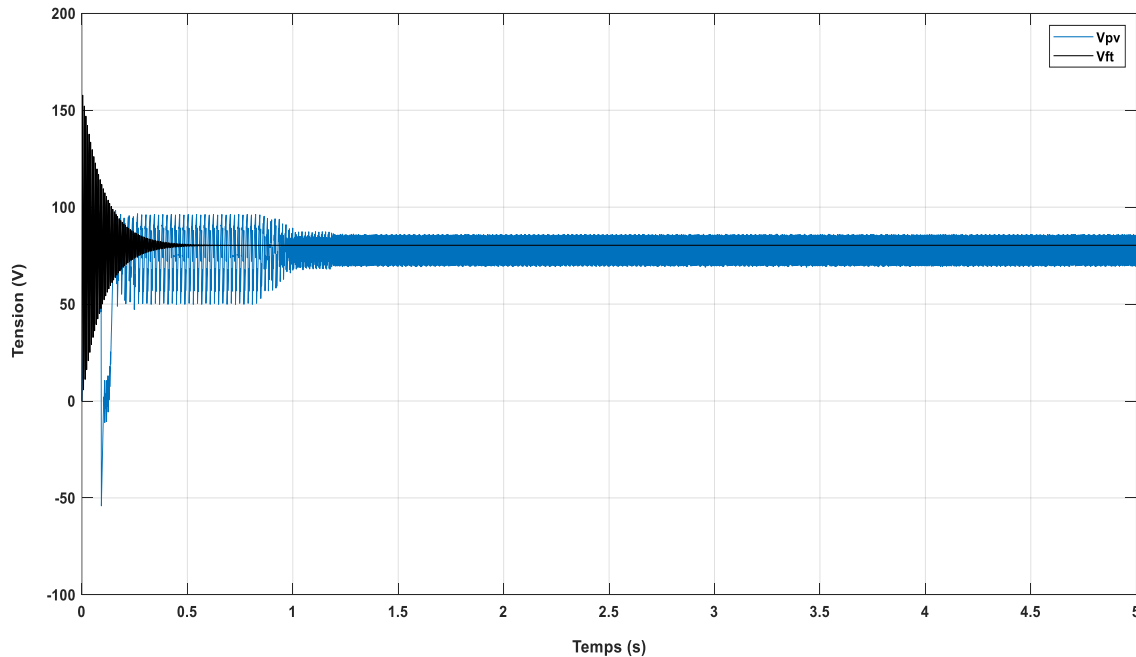


Figure 4.1 Tension de MRAC par rapport V_{pv}

Afin de valider la fonction de transfert d'un modèle de référence, il est primordial de saisir les courbes représentées et leurs variations dans le temps.

Interprétation

- Les oscillations initiales se manifestent par des oscillations évidentes sur les deux courbes. Cela suggère une réaction temporaire où le système éprouve des oscillations limitées avant de se stabiliser.
- État de stabilisation : Après une période d'environ 1 seconde, il semble que les deux courbes convergent vers une valeur constante. Cela démontre l'état stable du système après la période transitoire.
- Après la période transitoire, les courbes semblent converger vers une valeur semblable, ce qui suggère que la réponse du modèle de référence (V_{pv}) et la réponse du système mesuré (V_{ft}) sont cohérentes.

Une légère différence ou des imperfections dans la modélisation ou les mesures pourrait être suggérée par la présence de petites oscillations résiduelles en régime permanent.

Validation de la Fonction de Transfert

- Si l'objectif est de reproduire fidèlement le modèle de référence par le système observé, la similitude entre les deux courbes après la période transitoire confirme que le modèle est adéquat.

- Période transitoire : Il est également important que la durée et l'amplitude des oscillations initiales soient similaires afin de garantir une validation adéquate. Ici, elles présentent une correspondance satisfaisante, ce qui est positif.
- Le régime permanent confirme la précision du modèle en attestant de la convergence vers une valeur stable et comparable.

En conclusion. On peut observer sur le graphe que le modèle de référence a été approuvé avec succès. Le fait que les deux courbes présentent une réponse transitoire et une stabilité en régime permanent suggère que la fonction de transfert modélisée reproduit correctement le comportement du système réel. Toutefois, une analyse plus approfondie pourrait être bénéfique, par exemple, en calculant les erreurs quadratiques moyennes ou en utilisant d'autres indicateurs de performance afin de mesurer la précision de la correspondance entre V_{pv} et V_{ft} .

4.2.2 Résultats de Simulation

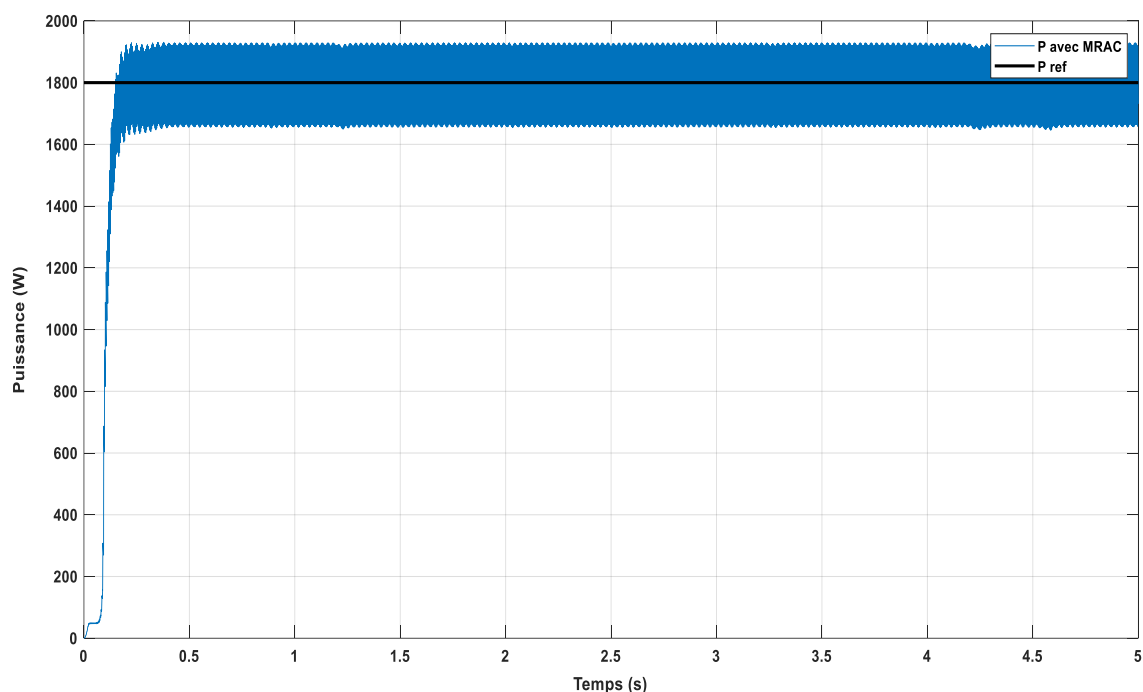


Figure 4.2 Résultat de la simulation de MRAC avec P&O des conditions standards

Nous devons examiner les courbes et leurs significations dans le cadre de la validation d'un modèle ou d'un système de contrôle afin d'interpréter ce graphique.

Interprétation

- Phase de Montée : Au début, la puissance mesurée augmente rapidement (courbe bleue). La rapide montée initiale témoigne de la réaction rapide du système pour atteindre la puissance de référence.
- Régime Permanent et Stabilisation : La puissance mesurée atteint environ 1800 W et fluctue légèrement autour de cette valeur après environ 0.2 seconde. La valeur cible est également de 1800 W, ce qui indique que la ligne noire de référence est à 1800 W.

Les variations des oscillations autour de la valeur de référence sont légèrement différentes, mais dans l'ensemble, le système conserve une puissance très proche de celle de référence.

- La convergence rapide de la courbe bleue vers la ligne noire témoigne du bon fonctionnement du contrôle adaptatif, qui atteint rapidement la valeur de référence.

Des ajustements dynamiques du contrôleur MRAC peuvent entraîner des petites oscillations afin de maintenir la puissance à la valeur de référence.

En conclusion. Selon le diagramme, le système avec contrôle adaptatif par modèle de référence (MRAC) atteint rapidement et maintient la puissance de référence de 1800 W. Les légères variations autour de la valeur de référence sont normales et témoignent de l'adaptation continue du contrôleur pour rester proche de la valeur de référence.

Point de validation essentiel

- Réponse Transitoire : Le fait que la courbe bleue atteigne rapidement la valeur de référence témoigne d'une excellente performance du système en ce qui concerne le temps de réponse.
- L'efficacité du contrôle adaptatif est démontrée par la stabilité et la capacité du système à maintenir la puissance autour de la valeur de référence, malgré de petites fluctuations.
- Précision : Le fait que la courbe bleue reste toujours proche de la ligne noire de référence témoigne d'une précision élevée du contrôle.

Globalement, ce graphique confirme l'efficacité du contrôleur MRAC dans la stabilité et la précision de la puissance de référence.

4.3 Simulation de la commande adaptative et P&O avec une variation de la capacité et l'inductance

4.3.1 Variation de la capacité

Les facteurs externes qui peuvent varier la valeur d'une capacité électrique incluent :

- Matériaux diélectriques environnants : La constante diélectrique effective de l'espace entre les armatures d'un condensateur peut être influencée par les matériaux diélectriques environnants, ce qui peut avoir un impact sur sa capacité électrique.
- Température : Les propriétés des matériaux diélectriques peuvent être impactées par la température, ce qui peut entraîner une modification de la constante diélectrique et donc de la valeur de la capacité électrique.
- Humidité : Les matériaux diélectriques peuvent également être impactés par l'humidité, ce qui peut provoquer des variations dans la capacité électrique.
- Pression : La pression peut avoir un impact sur la densité de l'électrolyte dans les condensateurs électrolytiques, ce qui peut à son tour avoir un impact sur la valeur de la capacité électrique.
- Champ électrique externe : Les matériaux diélectriques peuvent être polarisés par un champ électrique externe, ce qui peut entraîner une modification de leur permittivité relative, ce qui entraîne une diminution de la capacité électrique.
- Fréquence du signal : La fréquence du signal peut avoir un impact sur la capacité électrique des condensateurs à capacité variable ou des condensateurs utilisés dans des applications à haute fréquence en raison des effets de série et de parallèle inductifs.

- Champs électromagnétiques : Les courants de fuite dans les condensateurs peuvent être causés par les champs électromagnétiques externes, ce qui peut entraîner une modification de leur capacité.
- Vibrations ou chocs mécaniques : La géométrie du condensateur peut être modifiée par les vibrations ou les chocs mécaniques, ce qui peut avoir un impact sur sa capacité.

Variation de la capacité $\pm 20\%$ de la valeur initiale a permis de tracer les graphes représentés dans les figures ci-dessous.

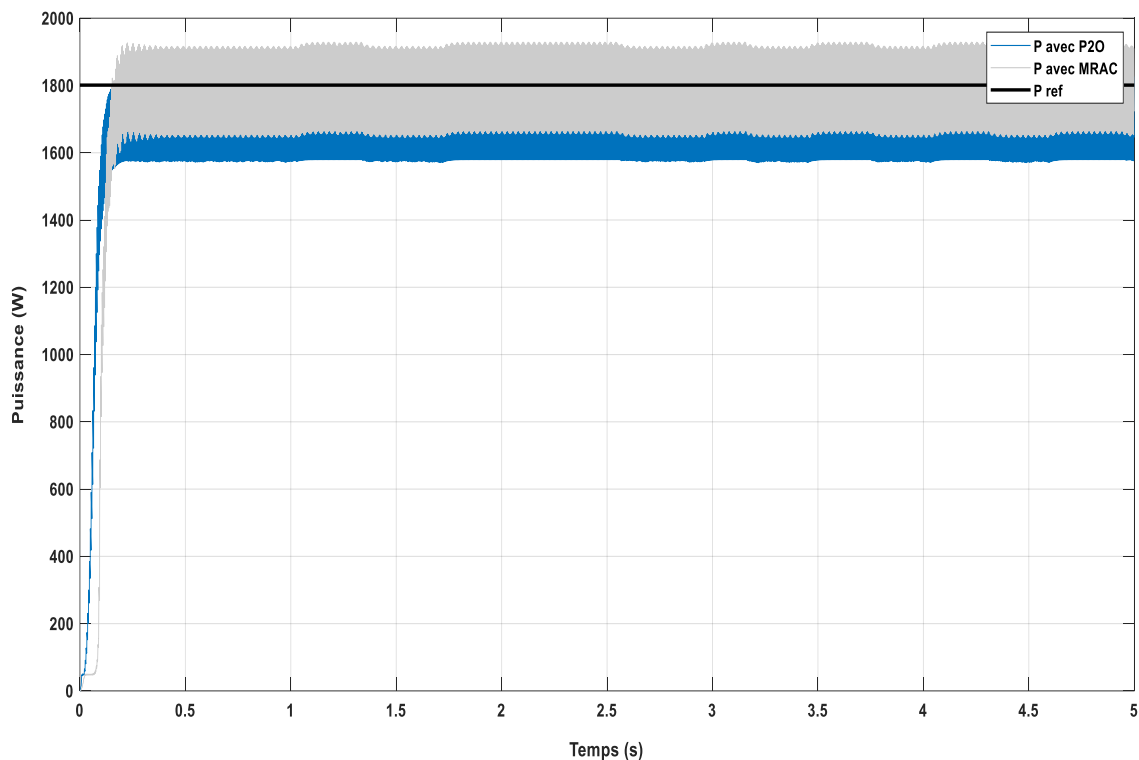


Figure 4.3 Puissance en fonction du temps avec variation de la capacité

Cette représentation graphique illustre la relation entre la puissance (en watts) et le temps (en secondes) pour trois courbes distinctes dans le cadre de l'utilisation d'un hacheur boost avec une variation de la valeur de capacité C . Voici une interprétation des données présentées :

Analyse des courbes

- La courbe P en utilisant une méthode P&O illustre la puissance mesurée.

Cette courbe est sensible à des variations autour de la valeur de référence, plus importantes que celles observées pour la méthode MRAC.

La période de 5 secondes est marquée par des variations, ce qui témoigne d'une certaine instabilité dans le suivi de la puissance.

- La courbe P utilisant une méthode MRAC illustre la puissance mesurée.

L'évolution de cette courbe est plus stable que celle de la courbe grise, avec des variations bien moins importantes autour de la valeur de référence.

La courbe tend rapidement à atteindre une valeur proche de la référence et reste stable tout au long de l'observation.

- La courbe P_{ref} représente la puissance de référence à atteindre, qui est généralement fixée autour de 1800W.

Les deux autres courbes sont ciblées par cette ligne.

Interprétation

- La méthode MRAC présente des performances supérieures en ce qui concerne la stabilité et le suivi de la référence par rapport à la méthode P2O, même lorsque la capacité C du hacheur boost change.
- Les variations significatives dans la courbe P2O (grise) témoignent de la faiblesse de cette méthode face aux variations de la capacité du hacheur, ce qui entraîne des fluctuations plus significatives de la puissance mesurée.
- L'utilisation de la méthode MRAC (bleue) permet de maintenir une puissance proche de la valeur de référence avec des variations minimales, démontrant ainsi une meilleure capacité d'adaptation et de résistance aux modifications des paramètres du système.

En conclusion. Ce schéma met en évidence l'avantage de la méthode MRAC par rapport à la méthode P&O lorsqu'il y a des variations de la capacité C dans un hacheur boost. La méthode MRAC garantit une stabilité accrue et un suivi plus précis de la puissance de référence, tandis que la méthode P&O présente des variations significatives, ce qui indique une moindre résistance aux variations de paramètres.

4.3.2 Variation de l'inductance

Les facteurs externes qui peuvent changer la valeur de l'inductance d'un composant bobiné incluent :

- Présence de matériaux magnétiques à proximité : Les substances ferromagnétiques, comme le fer, ont la capacité d'affecter le champ magnétique autour de l'inductance, ce qui entraîne une modification de sa valeur d'inductance.
- Positionnement par rapport à d'autres composants : Le champ magnétique autour de l'inductance peut être modifié par la proximité d'autres composants électriques, ce qui a un impact sur sa valeur.
- Champ magnétique externe : Le champ magnétique de l'inductance peut être influencé par des champs magnétiques externes, comme ceux générés par des aimants permanents ou des courants électriques dans des conducteurs adjacents.
- Température : Les fluctuations thermiques peuvent altérer les caractéristiques magnétiques des matériaux employés dans le domaine de l'inductance, ce qui peut entraîner des changements dans sa valeur d'inductance.
- Courant à travers d'autres bobines ou conducteurs : Les courants qui circulent à proximité d'autres bobines ou conducteurs peuvent créer des champs magnétiques qui perturbent celui de l'inductance, ce qui entraîne une modification de sa valeur d'inductance.

- Vibrations ou chocs mécaniques : La valeur d'inductance peut être affectée par les vibrations ou les chocs mécaniques, qui peuvent modifier la géométrie de l'inductance ou déplacer les matériaux magnétiques à l'intérieur.

Variation de l'inductance $\pm 20\%$ de la valeur initiale a permis de tracer les graphes représentés dans les figures ci-dessous.

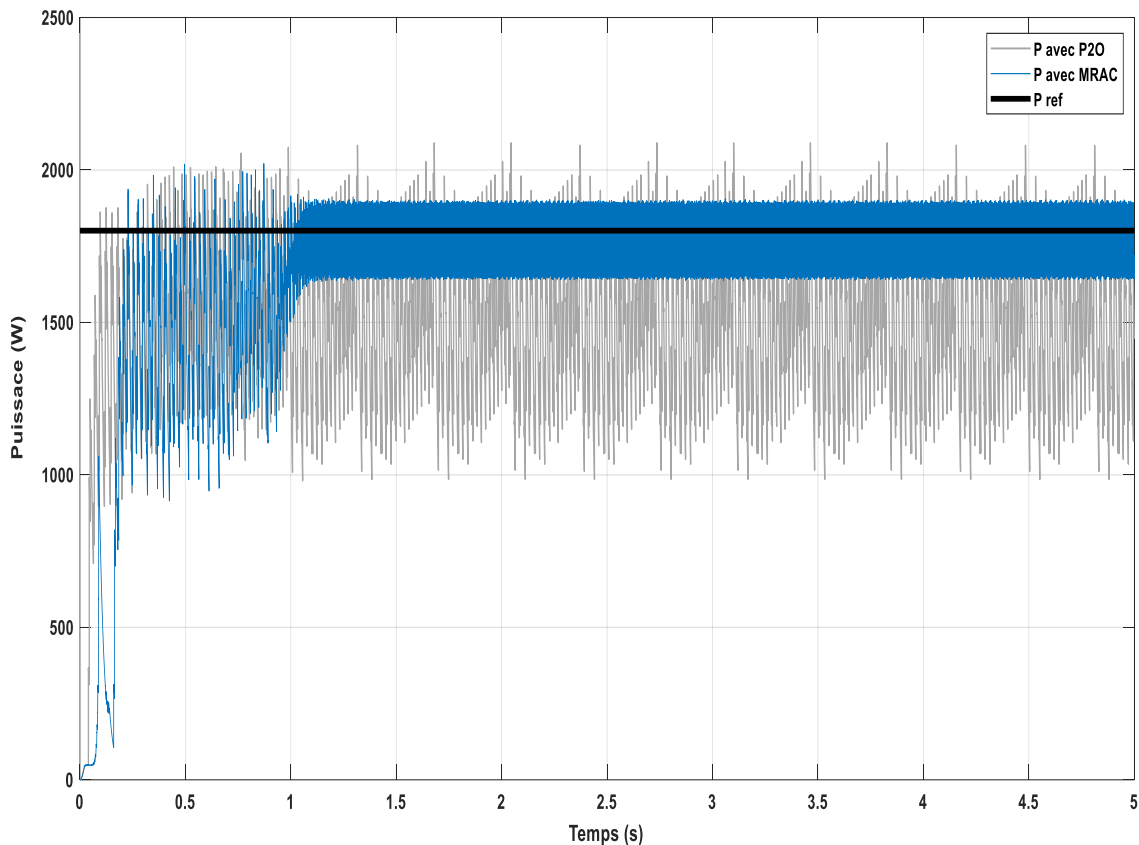


Figure 4.4 Puissance en fonction du temps avec variation de l'inductance

Ce schéma illustre comment la puissance augmente au fil du temps pour un système photovoltaïque lorsque la valeur de l'inductance L du convertisseur varie. Voici une explication approfondie :

Comportement des courbes : La ligne horizontale (P_{ref}) est une courbe stable, ce qui indique une puissance de référence constante.

La courbe (P en utilisant P&O) atteint rapidement un niveau de puissance stable légèrement supérieur à celui de P_{ref} .

La courbe (P avec MRAC) montre des variations significatives avant d'atteindre une stabilité partielle.

Analyse des segments de courbes : Au départ (de 0 à environ 0,3 s), toutes les courbes sont très rapidement élevées. La courbe présente des variations importantes pendant cette période.

Après une période d'environ 0,5 s, P avec P&O se stabilise à une valeur d'environ 1900 W, légèrement supérieure à P_{ref} .

La valeur de P avec MRAC continue de varier autour de la puissance de référence, ce qui peut être dû aux variations dans la valeur de l'inductance L.

- **Interprétation :**

Les différences observées dans la courbe (P avec MRAC) indiquent que le système est vulnérable aux fluctuations de l'inductance L. Lorsque l'inductance change, ces variations peuvent témoigner d'oscillations ou d'instabilités dans le convertisseur.

La courbe (P en combinaison avec P&O) présente une stabilité plus marquée et une puissance légèrement supérieure par rapport à P_{ref} , ce qui suggère une adaptation ou un contrôle plus efficace.

Les performances des deux autres configurations peuvent être comparées en utilisant la courbe (P_{ref}) comme référence stable.

En résumé, ce schéma illustre que le système photovoltaïque avec P&O conserve une puissance constante malgré les fluctuations de l'inductance L du convertisseur, tandis que le système avec MRAC montre des variations importantes. Cela laisse entendre que le contrôle utilisant P&O est plus résistant aux fluctuations de l'inductance par rapport au MRAC.

4.3.2.1 θ contrôleur paramétriser de MRAC

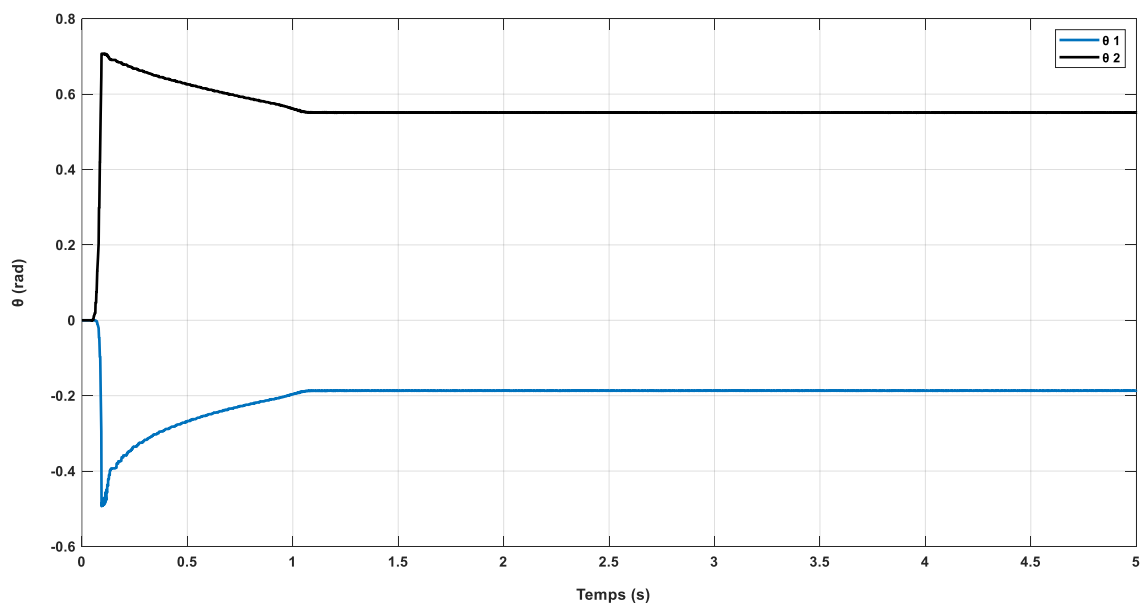


Figure 4.5 θ contrôleur paramétriser d'un MPPT MRAC

Ce diagramme illustre comment les paramètres θ_1 et θ_2 évoluent au fil du temps pour un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) utilisant la méthode MRAC (Model Reference Adaptive Control). Voici une analyse détaillée des données affichées :

Analyse des courbes

- Cette courbe θ_1 débute à 0 rad et se déplace rapidement en dessous de -0,4 rad au début de la période.

θ_1 remonte progressivement après 0,5 seconde et se stabilise autour de -0,2 rad à partir de 2 secondes jusqu'à la fin de la période de 5 secondes.

Dans la première dynamique, on observe une réaction puissante du contrôleur pour s'ajuster aux conditions initiales, puis une stabilisation.

- Cette courbe θ_2 débute également à 0 rad et atteint rapidement 0,6 rad au début de la période.

θ_2 diminue légèrement après 0,5 seconde et se stabilise autour de 0,5 rad à partir de 2 secondes jusqu'à la fin de la période de 5 secondes.

Tout comme pour θ_1 , θ_2 présente une réaction initiale intense suivie d'une stabilité.

Interprétation

- La réaction initiale des deux paramètres θ_1 et θ_2 est très forte, ce qui est caractéristique d'un contrôleur adaptatif qui cherche à s'adapter rapidement aux conditions du système.
- Après cette phase initiale d'ajustement rapide, les deux paramètres se stabilisent, ce qui suggère que le contrôleur MRAC a découvert des valeurs de paramètres qui permettent de suivre efficacement le point de puissance maximale (MPPT).
- L'adoption de valeurs constantes pour les paramètres (θ_1 autour de -0,2 rad et θ_2 autour de 0,5 rad) laisse entendre que le système a atteint un équilibre stable afin d'améliorer les performances.

En conclusion. Selon ce graphique, il est démontré que le contrôleur MPPT qui utilise la méthode MRAC est capable de s'adapter rapidement aux conditions initiales et de stabiliser les paramètres de contrôle (θ_1 et θ_2) afin de garantir une performance optimale. Les réactions initiales suivies de stabilisations témoignent de la capacité du contrôleur à suivre efficacement le point de puissance maximale.

4.3.2.2 L'erreur entre le système et le modèle de référence

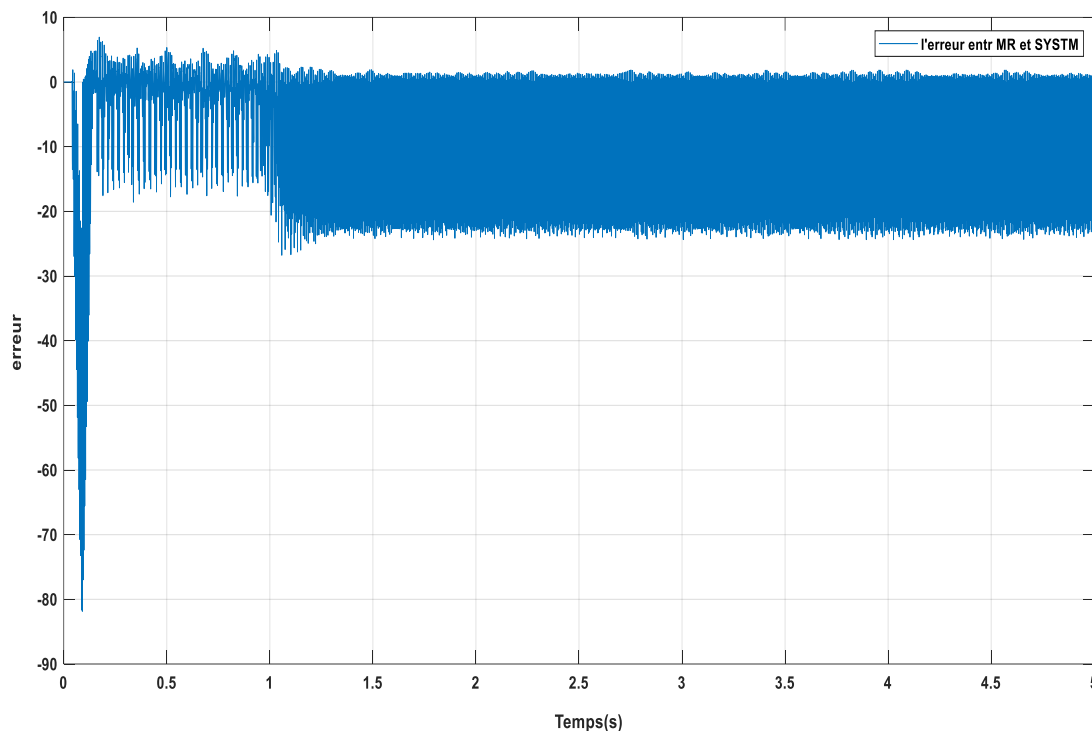


Figure 4.6 erreur en fonction de temps

L'évolution de l'erreur entre le système réel et le modèle de référence (MR) est illustrée dans ce graphique en présence d'oscillations causées par l'algorithme Perturb and Observe (P&O) pour le suivi du maximum Power Point (MPPT).

Analyse de l'Erreur

- Initialement (0 à 0,5 seconde) : La valeur initiale de l'erreur est très négative, environ -80, et elle augmente rapidement.

On peut expliquer ce pic initial par l'ajustement initial du système afin de déterminer le point de puissance maximale (MPP).

Il y a des oscillations significatives, ce qui suggère une phase initiale d'instabilité causée par l'algorithme P&O.

- Entre 0,5 et 1 seconde : L'erreur varie considérablement mais tend à diminuer, atteignant près de -10. Cela indique que le système est en train de se stabiliser et de se rapprocher du MPP.
 - Après 1 seconde : L'erreur est stable entre -10 et -15, avec de petites variations et des fluctuations constantes.
Les oscillations continuent de se produire, ce qui est caractéristique de l'algorithme P&O, mais leur intensité est diminuée.
Le système parvient à un état permanent où l'erreur demeure constante malgré les perturbations.

On peut observer sur le graphique que le système photovoltaïque qui est réglé par MPPT avec la méthode P&O atteint rapidement une région où l'erreur par rapport au modèle de référence se stabilise, même si des oscillations continuent. Ces variations font partie intégrante de la méthode P&O, qui utilise des perturbations régulières afin d'améliorer la puissance. Le niveau d'erreur reste assez constant entre 0 et -20, ce qui suggère une disparité constante entre le système réel et le modèle de référence, probablement en raison de défauts dans la réponse du système réel ou des limitations de la méthode P&O. Afin d'améliorer encore plus la précision et diminuer les oscillations, il serait possible d'utiliser une méthode de commande plus avancée ou d'optimiser davantage la méthode P&O.

4.4 Conclusion

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné le fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque, qui a été adapté à l'aide d'un convertisseur DC-DC (hacheur boost), et qui est régulé par une commande MPPT de perturbation et d'observation (P&O). La commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque afin de déterminer le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Nous avons également exposé une commande avancée MRAC qui permet d'optimiser la puissance du module photovoltaïque en utilisant les entrées déjà disponibles dans l'algorithme P&O. Une comparaison a également été réalisée entre les deux techniques MPPT. Il est supposé que la commande adaptative par modèle de référence offre de meilleures performances en termes de rapidité, de puissance et de stabilité par rapport à l'algorithme P&O, en particulier lorsqu'il s'agit de modifier les paramètres du convertisseur boost, tels que l'inductance et la capacité.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La recherche scientifique est aujourd'hui très intéressée par les énergies renouvelables, car elles représentent une alternative aux énergies fossiles polluantes. L'énergie solaire présente un avenir prometteur en raison de son caractère inépuisable, car elle peut être une solution rentable pour répondre aux besoins énergétiques des populations tout en préservant l'environnement. L'énergie solaire photovoltaïque, qui implique la conversion de la lumière solaire en électricité grâce à des panneaux solaires, représente une source d'énergie généreuse et non polluante. Malgré son faible rendement et son investissement élevé, elle a des coûts d'exploitation et de maintenance réduits.

La recherche vise à garantir, améliorer et optimiser l'énergie générée par le champ photovoltaïque en adoptant une conception optimale et une stratégie de gestion dynamique, ce qui entraîne une amélioration globale du rendement du système de conversion électrique. La commande de suivi du point de puissance maximal (MPPT) est un dispositif qui oblige le générateur à fonctionner à son point de puissance maximal (PPM). Grâce à cette opération, il est possible d'atteindre le maximum de puissance du champ photovoltaïque, peu importe les conditions météorologiques. Nous avons examiné la mise en œuvre et la simulation des diverses méthodes MPPT ainsi que leurs algorithmes de programmation relativement simples dans l'environnement Matlab/Simulink.

En somme, les panneaux solaires (PV) sont indispensables pour passer à une énergie propre et renouvelable. Il est essentiel d'utiliser des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), telles que la méthode Perturb and Observe (P&O), pour maximiser l'efficacité de ces générateurs en ajustant en permanence leur point de fonctionnement optimal. De plus, l'ajout de techniques de contrôle adaptatives permet d'améliorer les performances des panneaux solaires dans différents environnements, ce qui améliore leur efficacité globale et leur fiabilité.

Les résultats des simulations présentées dans cette étude démontrent l'efficacité de la méthode P&O et de la commande adaptative pour optimiser la production d'énergie solaire, en particulier dans des conditions de variation de l'irradiance solaire et de la température ambiante. Ces approches proposent une solution robuste et souple pour faire face aux difficultés liées à l'intégration des panneaux solaires photovoltaïques dans des réseaux électriques modernes.

Cependant, il est important de noter que chaque application peut présenter des particularités spécifiques qui nécessitent une adaptation des stratégies de contrôle. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour approfondir les procédés d'amélioration des performances des générateurs photovoltaïques et les techniques de suivi du point de puissance maximale, en prenant en considération les avancées technologiques et les exigences particulières de chaque application.

Finalement, il est primordial d'améliorer les générateurs photovoltaïques et les techniques MPPT en incorporant une gestion intelligente de l'énergie grâce à des stratégies de commande adaptatives, afin de garantir une production d'énergie solaire efficace, fiable et durable. Cela favorisera le passage à un avenir énergétique plus respectueux de l'environnement et plus durable.

Références bibliographiques

- [1] https://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Technologies_de_cellules_solaires.
- [2] https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche_
- [3] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaïque/types-cellules-solaires.html>.
- [4] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaïque/types-cellules-solaires.html#:~:text=Le%20rendement%20d%27une%20cellule%20photovoltaïque%20correspond%20au%20rapport%20entre,l%27efficacité%20des%20cellules%20photovoltaïques>.
- [5] <https://www.power-africa.com/systemes-denergies-solaires-photovoltaïques-autonomes-et-hybrides/>.
- [6] <https://dSPACE.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/3497b69d-b4c6-4166-ae67-a2b57564c393/content>.
- [7] https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques/_
- [8] <https://dSPACE.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/f528a7ce-03df-455f-9dba-858f1c60a9e3/content>.
- [9] <https://dSPACE.univ-eloued.dz/server/api/core/bitstreams/f528a7ce-03df-455f-9dba-858f1c60a9e3/content>.
- [10] https://www.researchgate.net/figure/Datasheet-parameters-of-the-KC200GT-PV-module-at-STC_tbl1_282918281.
- [11] M.H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001
- [12] M. Biswal, "Control Techniques for DC-DC Buck Converter with Improved Performance", Master Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, March 2011.
- [13] C. Chabert and A. Rufer, "Optimisation des Convertisseurs de Puissance Embarqués: Adaptation Des Cellules A Lien Alternatif MF Et Commutation Douce," 8^{ème} Colloque Electronique de Puissance du Future, Lille, France, Novembre-Decembre 2000.
- [14] V.M. Nguyen and C.Q. Lee, "Indirect Implementations of Sliding-Mode Control Law in Buck-Type Converters," in IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 1, San Jose, pp. 111-115, 1996.
- [15] S.C. Tan, Y.M. Lai, C. K. Tse, and M.K.H. Cheung, "Adaptive Feedforward and Feedback Control Schemes for Sliding Mode Controlled Power Converters," IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 21, no. 1, pp. 182-192, Jan 2006
- [16] Henri FOCH et autres, "Electronique de Puissance", Vol. D3000 à D3233, Ed.Techniques de l'Ingénieur, 1989
- [17] A. Rufer, P. Barrade, « Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC », EPFL, 90 pages. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, octobre 2001
- [18] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.
- [19] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.
- [20] Seif Eddine NAFFOUTI, "Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque", Mémoire de diplôme national d'ingénieur en Génie Electrique, Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir, Université de Monastir, Tunisie, 2012

- [21] B. W. Williams, "Power Electronics : Devises, Drivers, Applications and Passive Components", 2^e Subi-Ed, McGraw-Hill, 1992
- [22] Mr. Faraheddine BELKACEM, "Contribution à La Commande Des Convertisseurs DC-AC Alimenter Par Un Panneau Photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Électrique, Université de Picardie Jules Verne, 2006.
- [23] HANOUN Brahim, "Etude et réalisation d'un hacheur Boost destiné à l'implémentation des commandes à base DSP ", Mémoire de Master, Département de Génie Electrique, Université LARBI BEN M'HIDI , OUM EL BOUAGHI, 2016
- [24] Saleh H. Elkelani Babaa "High Efficient Interleaved Boost Converter with Novel Switch Adaptive Control in Photovoltaic Application", Mars 2013.
- [25] Aamarouyache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », thèse de doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014.
- [26] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [27] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.
- [28] Hajar Bagheri, "Advances in electric power engineering", publisher: lulu (usa), 2015.
- [29] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi ,,,active power control for a single-phase grid connected pv system ", international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [30] Bisker Asma, Chiri Meriem, « Commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, el-harrach, algérie, 2012.
- [31] Akihiro Oi, " design and simulation of photovoltaic water pumping system", faculty of California polytechnic state university, 2005
- [32] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: Application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Tunisie ,Avril 2015.
- [33] Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output"ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012.
- [34] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », université de Sfax, Tunisie, 2013.
- [35] Bensafia Yassine. « Utilisation des filtres fractionnaires pour la conception derégulateurs adaptatifs robustes. », thèse doctorat en science, Université de Skikda, 2016.
- [36] I.D Landau, R. Lozano, M. M'Saad, A. karimi. « Adaptive control Algorithmes,Analysis and applications » Edition Springer London 2011.
- [37] Åström K.J., Wittenmark. B. « Adaptive control. » NewYork: Addison-Wesleypublishing company, 1995.
- [38] Hassani Walid. « Commandes adaptative auto-ajustable et multi modèles superviséed'un réacteur chimique. », Mémoire de fin d'étude ingénieur. Université de Bejaia2007.
- [39] I. D. Landau. « Identification et commande des systèmes », Traité des Nouvelles Technologies, série Automatique, 2ème édition 'Hermes', 1993.

- [40] L. D. Landau. « Introduction to adaptive control. ». Edition Springer. London. 2011.
- [41] Guillaume Mercère. « Contribution à l'identification récursive des systèmes par l'approche des sous-espaces. », Automatique / Robotique. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2004. Français. tel-00007958.
- [42] R. KHENFER, « « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques ». Thèse de doctorat en automatique, université Ferhat Abbes Sétif-1, Sétif, 2015. »
- [43] D. S. H. Chan et J. C. H. Phang, « « Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics ».IEEE Transactions on Electron Devices, vol 34, N°2, pages 286-293, 1987. »
- [44] J. A. Kratochvil, W. E. Boyson, et D. L. King, « « Photovoltaic array performance model ». SAND2004-3535. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2004. »
- [45] A. Walter, E., Pronzato, L., « Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales », Ed. Masson 1994.
- [46] « B.Bounekhla, M., Zaim, M.E., and Rezzoug, A. "Comparative study of three minimization methods applied to the induction machine parameters identification using transient stator current", Electric Power Components and Syst., vol.33, n°8, pp. 913-930,2005 ».