

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة Hassiba Benbouali بن بوعلي – الشلف

Université Hassiba Benbouali de Chlef (UHBC)

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



Projet de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux électrique

Thème

Amélioration de la recherche du point de puissance maximale dans un système photovoltaïque lors de variations rapides du climat et de la charge

Présenté par :

DEKKICH Nabil

CHAKRAR Oussama

Soutenu le 25/06/2025 devant le jury composé de :

Président	Mr. TAHRI Toufik	Professeur
Encadreur	Mr. BELHADJ DJILALI Abdelkadir	MCA
Examineur	Mr. SAHRAOUI Hamza	MCA
Examineur	Mr. TOUALBIA Asma	MCA

Promotion : 2024/2025

Remerciement

Avant tout , nous remercions Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage et la patience qu'il nous a donné pour terminer ce travail ,

Comme nous remercions l'encadreur, Dr. BELHADJ DJILALI Abdelkadir pour sa confiance, sa disponibilité, son soutien et ses exigences, on espère avoir été à la hauteur.

Nous tenons à remercier le président et les membres du jury d'avoir accepté de lire et évaluer le travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à nos recherches et à l'élaboration de cette mémoire.

Merci



Dédicaces

Je dédie ce travail A ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle Je n'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau .Que **Allah** puisse la garder éternellement heureuse . Merci du fond du cœur.

A mon cher père qui m'a toujours aider et soutenir dans les moments difficiles que dieu le garde.

A mon petit frère Nadir que dieu le protège, à mes chères sœurs.

A toute ma famille.

Et à mon binôme **Chakrar Oussama** et mon ami proche **Ghalem Abderrahmane** .et ma sœur **Ameur marwa**.

Finalement À ma fleur, **Mervet**

Et à tous ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin à finaliser cette thèse et qui m'ont contribué dans ma formation.

Nabil

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail : A mon support de vie ; A **mon père** ,que Dieu ait pitié de lui et ma très cher **maman** qui ont sacrifié toutes leurs forces pour assurer ma réussite et qui m'ont soutenu durant toutes mes études, en particulier, pour leur soutien moral. A mes rayons de vie ; mes frères et ma sœur : **Zakaria ,et Yasser , et Nesrine.***

*A ma petite fleur de jardin: **IKRAM***

*A toute la famille **CHAKRAR***

*A mon ami **GHALEM ABDERAHMAN** et mon binôme **DEKICH NABIL.***

*A tout **la promotion électrotechnique 2024 / 2025***

Table de matières.....	I
List de figures.....	IV
List d'abréviations.....	VI
Résumé.....	VIII
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

I.1.Introduction.....	4
I.2. Composants d'un système photovoltaïque (PV).....	4
I.3.Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque.....	5
I.3.1.Technologie des cellules photovoltaïques.....	7
I.4.Application des systèmes photovoltaïques.....	12
I.4.1.Installation photovoltaïque raccordée au réseau.....	15
I.4.2.Installations autonomes.....	17
I.5.Options de consommation de l'énergie photovoltaïque.....	18
I.5.1Exportation vers le réseau.....	18
I.5.2. L'autoconsommation.....	20
I.6.Conclusion.....	20

CHAPITRE II : Commande MPPT d'un système photovoltaïque

II.1. Introduction.....	22
II.2. Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs).....	22
II.3 Domaine d'utilisation des hacheurs.....	23
II.4.Convertisseur Buck-Boost.....	23
II.4.1.Définition.....	23
II.4.2.Schéma du convertisseur Buck-Boost.....	23
II.4.3. Principe de fonctionnement.....	23
II.4.4. Applications.....	25
II.5 Modélisation du système.....	26
II.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	26
II.7 Recherche du point de puissance maximale MPPT.....	27
II.8 Principe de la commande MPPT.....	27

II.9. Classification des techniques MPPT	29
II.9.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres L'entrée/sortie	29
II.9.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche ou contrôle	29
II.10 les méthodes classiques de MPPT.....	30
II.10.1 La méthode perturbe et observe P&O	30
II.10.2 La méthode de l'Incrémentation de la Conductance.....	32
II.10.3 La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert.....	34
II.10.4 Commande à base de la mesure du courant de court-circuit	35
II.11 Conclusion	37

Chapitre III : Élimination de déviation du mode de recherche de la commande MPPT

III.1 Introduction	39
III.2 Utilisation de l'algorithme P&O classique sous variations environnementales et de charge	40
III.2.1 Utilisation de l'algorithme P&O classique	40
III.2.2 Effets des variations d'irradiance et de la charge	40
III.2.3 Conséquence : La déviation	40
III.2.4 Illustration du problème	41
III.3 Simulation et synthèse du système global	41
III.3.1. Bloc de Simulation d'un system PV Sous MATLAB simulink	41
III.4. Analyse de la déviation du mode de recherche	42
III.4.1. Cas d'une Variation rapide de l'irradiation solaire.....	42
III.4.2. Cas d'une Variation rapide de la charge	44
III.5. Organigramme de la commande P&O modifiée.....	48
III.6. Bloc de la commande P&O modifiée sous MATLAB SIMULINK.....	49
III.7. Résultat de simulation	49
III.7.1. En cas de changement de l'irradiation solaire	49
III.7.2. En cas de variation de la charge	51
III.7.3. Interprétation des résultats	52
Conclusion générale	55

Chapitre I

Figure I.1 : Système photovoltaïque.....	4
Figure I.2 : Installation photovoltaïque.....	5
Figure I.3 :Principe de fonctionnement photovoltaïque.	6
Figure I.4 : Différents types de cellules photovoltaïques.	7
Figure I.5 : Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un Concentrateur photovoltaïque....	8
Figure I.6 :Cellules flexibles.	8
Figure I.7 : Module photovoltaïque.....	9
Figure I.8 : Schéma synoptique d'un générateur PV.....	10
Figure I.9 : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.10 : Caractéristique puissance-tension.....	12
Figure I.11 : Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).....	12
Figure I.12 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie.....	13
Figure I.13 : Représente un système PV connecté au réseau électrique.	15
Figure I.14 : Les constituants d'un système PV.	16
Figure I.15 : Système photovoltaïque directement relié au réseau.	18
Figure I.16 : Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.	19
Figure I.17 : Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie.	19
Figure I.18 : Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie.....	19

Chapitre II

Figure II.1 : Principe de base d'un hacheur.	22
Figure II.2 : Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost	31
Figure II.3 : Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost.....	31
Figure II.4 :Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.....	32
Figure II.5 : Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est fermé.	32
Figure II.6 : Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est ouvert.	33
Figure II.7 :Schéma d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.....	36
Figure II.8 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	37
Figure II.9 :Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.....	38
Figure II.10 : Classification des méthodes MPPT	39
Figure II.11 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ P&O	40
Figure II.12 : Organigramme de la méthode P&O.....	41
Figure II.13 : Caractéristique $P(V)$ du module photovoltaïque.	43
Figure II.14 : Organigramme de la méthode InCond.....	43

Figure II.15: Organigramme de la méthode de mesure du VCO.	44
Figure II.16: Organigramme de la méthode de mesure su Icc.	45
Chapitre III	
Figure III.1 : Implémentation Simulink-Model d'un système photovoltaïque autonome	51
Figure III.2 : Analyse de la déviation du mode recherche cas d'augmentation rapide l'irradiation solaire.....	51
Figure III.3 : Analyse de la déviation du mode recherche cas diminution rapide de l'irradiation solaire.	52
Figure III.4: Courbe PV lors d'une augmentation rapide de la charge résistive.	54
Figure III.5: Courbe PV lors d'une diminution rapide de la charge résistive	55
Figure III.6 : Organigramme de la commande P&O MPPT modifiée.	57
Figure III.7: Implémentation Simulink-Model d'un système photovoltaïque autonome	58
Figure III.8: Variation de l'irradiance solaire.	59
Figure III.9 : Comparaison entre P&O classique et P&O modifiée en cas de changement de l'irradiation solaire	59
Figure III.10: Variation de la charge	60
Figure III.11: Comparaison entre P&O classique et P&O modifiée en cas de changement de la charge	60

Symbole	L'explication
DC-DC:	Continue-continue.
PV:	Photovoltaïque .
GPV:	Générateur Photovoltaïque.
<i>I_{Ph}</i> :	Le photo – courant .
<i>I</i> :	Le courant généré par la photopile .
<i>V</i> :	la tension aux bornes de la cellule
<i>R_S</i> :	La résistance série.
<i>I_S</i> :	le courant de saturation.
<i>q</i> :	la charge de l'électron = 1.6×10^{-19} C
<i>A</i> :	le facteur de qualité de la cellule .
<i>K</i> :	la constante de boltzmanne = 1.38×10^{-23} J K/.
<i>T</i> :	la température de fonctionnement en Kelvin.
<i>V_{th}</i> :	La tension thermique (un paramètre dépendant de la température)
<i>P_{PV}, V_{PV}</i>	Puissance ,courant Photovoltaïque.
MPP:	Le point optimal ,maximum power point.
MPPT:	Maximum power point tracking.
P&O:	Algorithme MPPT perturbation & observe.
HC:	Algorithme MPPT hill climbing.
INC:	Algorithme MPPT incremental conductance .

ملخص

يشهد الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة توسعاً متزايداً على الصعيد العالمي، وذلك استجابة للطلب المتنامي على الطاقة الكهربائية، لا سيما في المناطق النائية مثل المناطق الصحراوية والجبلية أو تلك التي يصعب الوصول إليها. وفي هذا السياق، تُعد الأنظمة الفوتوضوئية بديلاً واعدًا لمصادر الطاقة التقليدية، نظرًا لما تتميز به من موثوقية وقدرة على التكيف.

ومع ذلك، ومن أجل تحسين كفاءتها وتشجيع استخدامها على نطاق أوسع، ركز العديد من الباحثين على التحديات المرتبطة بانخفاض المردودية وفقدان الطاقة في الأنظمة الفوتوضوئية. وقد أظهرت هذه الدراسات أهمية أجهزة تحسين الطاقة، وخاصة متحكمات التتبع الأقصى لنقطة القدرة (MPPT)، التي تهدف إلى تحقيق أقصى استفادة من الطاقة المنتجة من الألواح الشمسية.

وفي إطار هذا الدراسة، نقترح استراتيجية تحكم محسنة تستند على الخوارزمية التقليدية "التذبذب والمراقبة" (P&O) وتهدف هذه الطريقة إلى توقيف انجراف نقطة التشغيل الناتجة عن الاضطرابات المفاجئة، سواء كانت ناجمة عن تغيرات سريعة في الإشعاع الشمسي أو عن تقلبات فجائية في الحمولة المقاومة، وهما عاملان يمكن أن يؤثر سلبًا على الكفاءة اللحظية للنظام.

سيتم مقارنة هذه الاستراتيجية المقترحة مع تقنية MPPT التقليدية من أجل تقييم أدائها من حيث الكفاءة الطاقية. ويتمثل التحدي الرئيسي في ضمان استخراج أمثل للطاقة مع الحفاظ على استقرار النظام في مواجهة التغيرات المناخية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، خوارزمية التذبذب والمراقبة (P&O)، الإشعاع الشمسي، فقدان الطاقة.

Abstract

The use of renewable energy is expanding significantly on a global scale, addressing the growing demand for electricity, particularly in remote areas such as desert, mountainous, or hard-to-reach regions. In this context, photovoltaic systems emerge as a promising alternative to conventional energy sources, due to their reliability and adaptability.

However, to enhance their efficiency and promote their widespread adoption, many researchers have focused on the challenges related to low efficiency and power losses in photovoltaic systems. These studies have highlighted the critical role of energy optimization devices, particularly Maximum Power Point Tracking (MPPT) controllers, which are designed to maximize the power extracted from solar panels.

Within the framework of this study, we propose an improved control strategy based on the classical "Perturb and Observe" (P&O) algorithm. This method aims to stop the operating point drift caused by sudden disturbances. —whether due to rapid changes in solar irradiation or abrupt variations in resistive load—both of which can lead to temporary efficiency losses.

This proposed strategy will be compared with the conventional MPPT technique. to evaluate its performance in terms of energy efficiency. The main challenge is ensuring optimal energy extraction while maintaining system stability in the face of climate change.

Keywords: renewable energy, "Perturb and Observe" (P&O) algorithm, solar irradiation , power losses.

Résumé

Le recours aux énergies renouvelables s'intensifie à l'échelle mondiale, répondant ainsi à une demande énergétique en forte croissance, en particulier dans les zones reculées telles que les régions désertiques, montagneuses ou difficilement accessibles. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques se présentent comme une alternative prometteuse aux sources conventionnelles, en raison de leur fiabilité et de leur adaptabilité.

Toutefois, pour améliorer leur efficacité et encourager leur adoption, plusieurs chercheurs se sont penchés sur les problèmes de rendement limité et de pertes de puissance affectant les systèmes photovoltaïques. Il ressort de ces études l'intérêt majeur porté aux dispositifs d'optimisation énergétique, notamment les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui permettent d'exploiter au mieux la puissance produite par les panneaux solaires.

Dans le cadre de cette étude, nous proposons une méthode de commande améliorée basée sur l'algorithme classique "Perturber et Observer" (P&O). Cette méthode vise à stopper la déviation du point de fonctionnement provoquée par des perturbations soudaines. qu'il s'agisse de changements rapides de l'irradiation solaires ou de variations brutales de la charge résistive, deux facteurs pouvant compromettre le rendement énergétique momentané du système.

Cette stratégie proposée sera comparée à la technique MPPT conventionnelle. afin d'évaluer ses performances en termes d'efficacité énergétique. Le principal défi consiste à garantir une extraction optimale de l'énergie tout en préservant la stabilité du système face au changement climatique.

Mots clés : énergies renouvelables, l'algorithme "Perturber et Observer" (P&O), l'irradiation solaires , pertes de puissance

Introduction générale

Introduction Générale

Les enjeux d'approvisionnement en énergie à l'échelle mondiale ne découlent pas uniquement de la dégradation de l'environnement et des changements climatiques associés aux ressources conventionnelles, mais également de leur accroissement. de la consommation à l'échelle mondiale, spécifiquement en termes de production d'électricité .L'emploi des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, constitue la solution idéale pour produire de l'électricité écologique. Ceci s'explique principalement par le fait que ces énergies sont pléthoriques, accessibles et sans impact négatif sur l'environnement. [1]

Un changement brusque de température est un phénomène extrêmement rare dans la nature et dans la plupart des environnements physiques. Pour qu'un corps voie sa température augmenter d'un degré ou plus en une fraction de seconde, il faudrait qu'une quantité d'énergie très importante lui soit transférée instantanément, ce qui est en contradiction avec les lois connues du transfert thermique. Que ce soit par conduction, convection ou rayonnement, le transfert de chaleur prend du temps, car les matériaux possèdent des propriétés thermiques telles que la capacité calorifique et l'inertie thermique, qui rendent leur réponse aux variations de température relativement lente.

très court – comme une milliseconde ou moins – est pratiquement impossible dans la réalité. Cette base scientifique constitue donc une justification suffisante pour écarter l'hypothèse d'un changement thermique soudain lors de l'analyse ou de l'interprétation des phénomènes liés à la température. Cela conduit également, de manière cohérente, à ne pas aborder les effets secondaires associés à une telle variation, comme la dérive thermique, qui perd toute pertinence lorsque le changement lui-même ne peut se produire dans des conditions réelles. Nous ne l'avons donc pas abordé dans notre étude.

Dans le premier chapitre , nous avons présenté les principes de base de l'énergie solaire photovoltaïque et les différents composants d'un système photovoltaïque. Nous avons également décrit les différents types de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques électriques. Le chapitre se termine par un aperçu des applications courantes telles que le pompage solaire de l'eau, l'électrification rurale, le dessalement et le chauffage solaire.

Le deuxième chapitre , Nous avons présenté les principales topologies buck-boost, et expliqué leur structure, leurs principes de fonctionnement et leurs équations mathématiques . De plus, nous avons présenté leurs domaines d'application. aussi on a présenté les algorithmes de contrôle du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la puissance des panneaux solaires. Les méthodes traditionnelles telles que la perturbation et l'observation (P&O) et la conductance

incrémentale (InCond) sont détaillées, ainsi que les méthodes indirectes basées sur des mesures de tension ou de courant de court-circuit .

Le dernier chapitre constitue la partie principale de la mémoire : l'algorithme P&O proposé est simulé afin d'évaluer sa capacité à éliminer la déviation aux variations d'ensoleillement et de charge résistive.

Enfin, nous concluons notre travail par une conclusion générale.

Ce mémoire propose une étude sur l'amélioration de la technique MPPT traditionnelle pour garantir une efficacité optimale malgré les variations d'ensoleillement et de charge. [2]

Chapitre I

Généralité sur le système photovoltaïque

I.1.Introduction

L'énergie photovoltaïque est le résultat de la conversion directe de la lumière du soleil en électricité, réalisée grâce à des cellules généralement fabriquées à partir de silicium cristallin. Cette technologie est la plus avancée sur le plan industriel. Le silicium, qui est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, se trouve sous forme de silice non toxique.

Le terme "photovoltaïque" provient du grec, où "photo" signifie lumière et "voltaïque" fait référence à Alessandro Volta (1754-1827), un physicien italien qui a grandement contribué à la découverte de l'électricité. Ainsi, le mot photovoltaïque peut être interprété littéralement comme "lumière électricité". [3-4]

Le système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions d'alimentation adéquates pour les batteries et les charges continues et un convertisseur continu-alternatif pour l'alimentation des autres appareils à courant alternatif.[5]

I.2. Composants d'un système photovoltaïque (PV)

Un module photovoltaïque à lui seul ne suffit généralement pas à alimenter de manière régulière une application. Tout comme l'éclairage, l'énergie qu'il génère est très variable et est toujours en courant continu. Il est donc souvent nécessaire de la stocker et parfois de la convertir. On désigne par "système photovoltaïque" l'ensemble des composants requis pour assurer une alimentation fiable d'une application. En règle générale, un système photovoltaïque se compose des différents éléments illustrés dans la figure. [4]

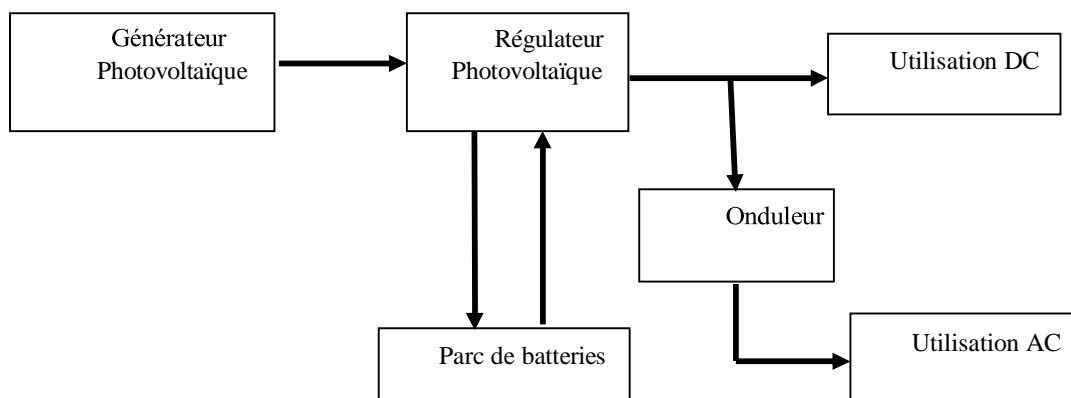


Figure I.1 : Système photovoltaïque.

I.3.Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité.



Figure I.2 : : Installation photovoltaïque. [6]

Cette opération repose sur un phénomène physique appelé *effet photovoltaïque*. Ce mécanisme a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921. De façon très schématique,

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure.

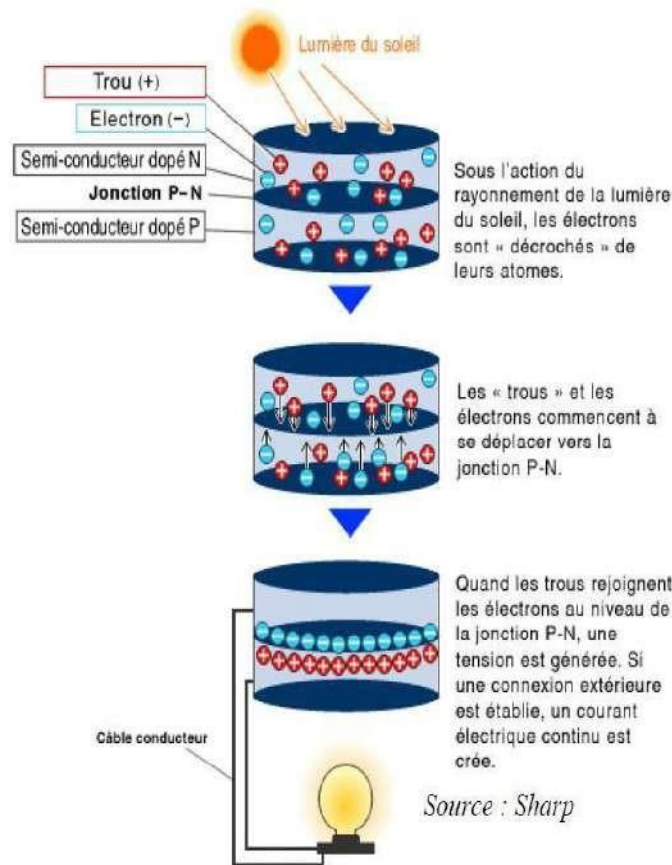


Figure I.3 ::Principe de fonctionnement photovoltaïque. [7]

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire.

- **Les avantages**

- Énergie électrique non polluante à l'utilisation et s'inscrit dans le principe de développement durable.
- Source d'énergie renouvelable car inépuisable à l'échelle humaine.
- Utilisables dans les pays en voie de développement sans réseau électrique
- Important dans des sites isolés tels qu'en montagne où il n'est pas possible de se raccorder au réseau électrique national.

- **Les Inconvénients**

- Coût du photovoltaïque élevé car il est issu de la haute technologie.
- Coût dépendant de la puissance de crête.

- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible (environ 10% pour le grand public) et donc ne délivre qu'une faible puissance.
- Marché très limité mais en développement.
- Production d'électricité ne se fait que le jour alors que la plus forte demande chez les particuliers se fait la nuit.
- Le stockage de l'électricité est quelque chose de très difficile avec les technologies actuelles (coût écologique des batteries très élevé).
- Durée de vie : 20 à 25 ans, après le silicium "cristallisé" rend inutilisable la cellule.-
Pollution à la fabrication : certaines études prétendent que l'énergie utilisée pour la fabrication des cellules n'est jamais rentabilisée durant les 20 années de production
Même en fin de vie, le recyclage des cellules pose des problèmes environnementaux.

I.3.1. Technologie des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque constitue l'élément clé d'un module photovoltaïque. Elle est fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium, qui capte la lumière et la convertit en électricité, un phénomène connu sous le nom d'effet photovoltaïque.

Le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé en raison de son efficacité. On distingue trois types de cellules en silicium : monocristallin, polycristallin et amorphe. Le rendement des cellules monocristallines et polycristallines se situe entre 12 et 16 %, tandis que celui des cellules amorphes est d'environ 7 %., [8]



Figure I.4: Différents types de cellules photovoltaïques. [9]

Autres types de cellules :

Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées

ou encore à l'étude, les principales étant :

- **Photovoltaïque à concentration**

Certaines cellules sont destinées à fonctionner avec des rayons solaires concentrés. Elles sont alors placées à l'intérieur d'un collecteur qui concentre la lumière du soleil sur les cellules au moyen d'une lentille. L'idée est d'utiliser le moins possible de matériau photovoltaïque semi-conducteur, et le plus possible de la lumière du soleil. Le rendement se situe entre 20 et 30.

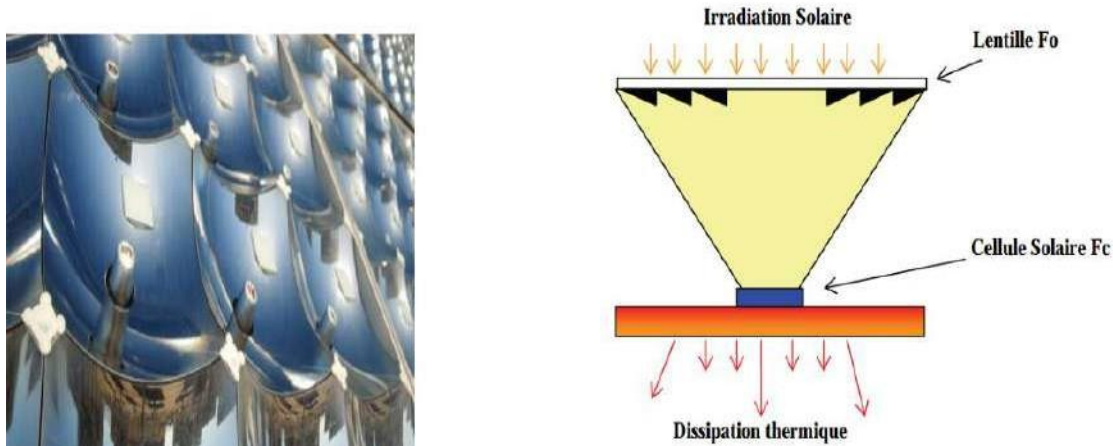


Figure I.5: Photovoltaïque à concentration et Schéma de principe d'un Concentrateur photovoltaïque.

- **Cellules flexibles**

Basées sur un processus de production similaire à celui des couches minces, ces cellules sont constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible. Cela ouvre la voie à une série d'applications, en particulier pour l'intégration aux bâtiments (toiture) et pour les applications domestiques.

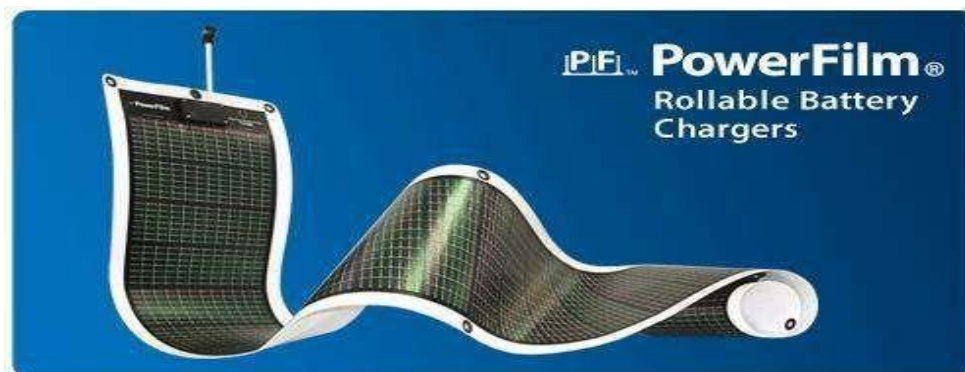


Figure I.6: Cellules flexibles [10].

I.3.2. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I.7). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) figure (I.7) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [11]



Figure I.7: Module photovoltaïque.

Actuellement la puissance d'un module est de quelques watts crêtes à quelques dizaines de watts crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série-parallèle des modules Figure (I-7) pour avoir un générateur PV. Pour des déséquilibres importants dus à l'occultation d'une ou plusieurs cellules, les modules peuvent être amenés à travailler en récepteur. Pour remédier à ces problèmes, des diodes peuvent être placées en parallèle et en série avec les modules [12, 13, 14, 15].

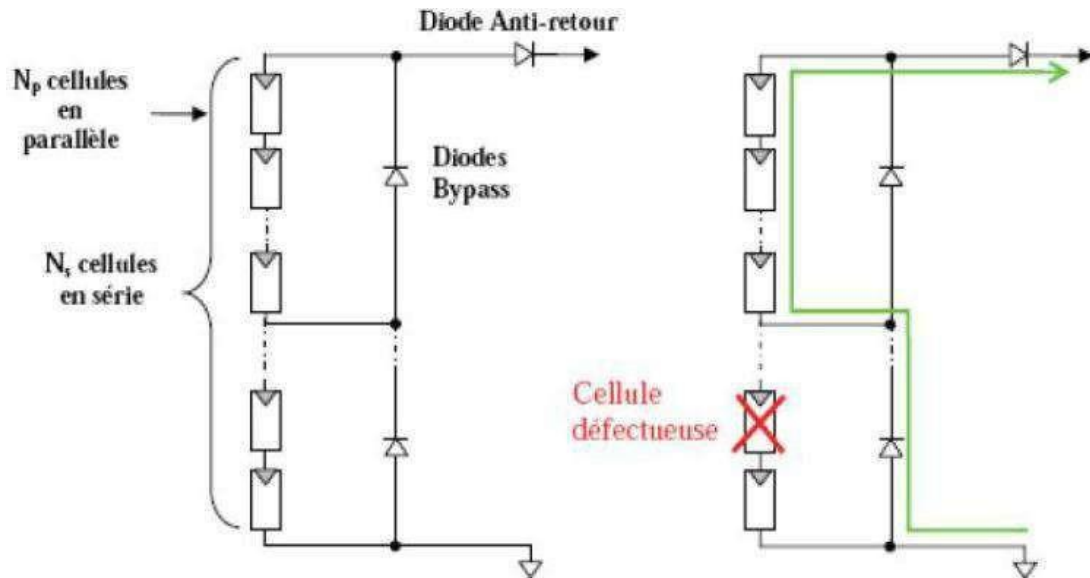


Figure I.8 : Schéma synoptique d'un générateur PV.

- **Les diodes en série**

Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les cellules PV ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué de devenir réceptrice du courant fourni par les autres séries, qui ont alors une tension plus élevée qu'elle, une diode est intégrée dans chaque série. On l'appelle aussi diode anti-retour et elle est située en série avec les modules.

B) Les diodes en parallèle

Au sein d'une série un module qui ne peut plus produire d'énergie (masqué, défaillance), doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement ; des diodes sont donc placées en parallèle sur chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par les autres modules de la série et sont placées en parallèle avec les modules [16, 17, 18].

C) Caractéristiques d'un module PV [19]

-La puissance de crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).

-La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

-Courant de court-circuit, I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

-Point de fonctionnement optimum, (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m * I_m$.

-Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de

radiation incidente.

-Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{oc} * I_{cc}$.

I.3.3.Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

- Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque :

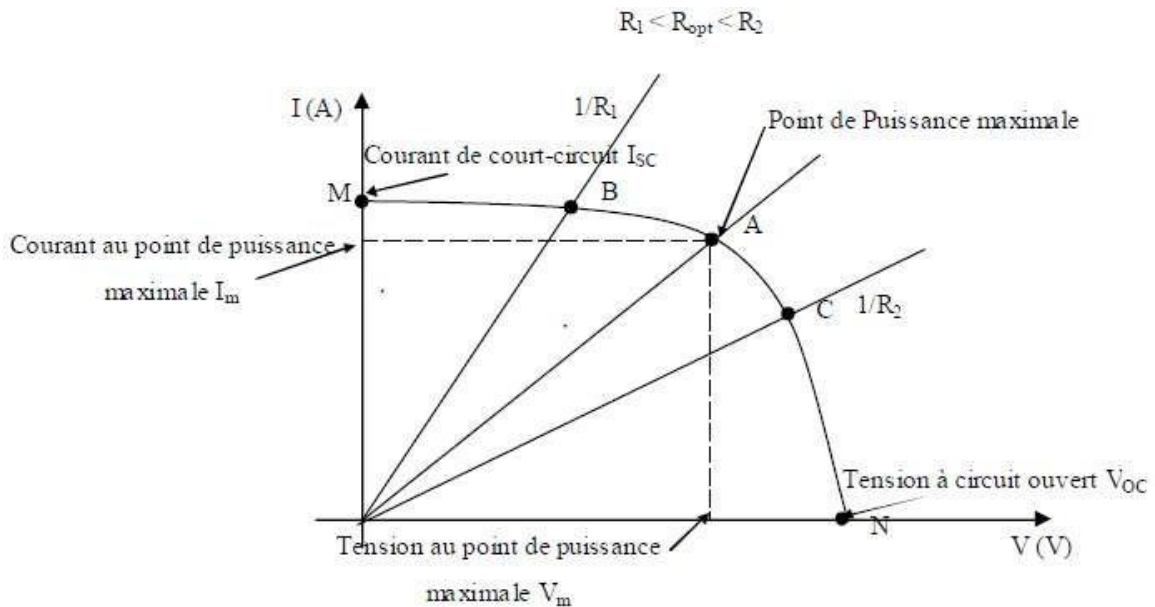


Figure I.9 : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.

Comme nous le voyons sur la figure (1-9), la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe $I(V)$ non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cette courbe nous informe sur trois points importants : [20]

Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).

- Le point du courant maximal (I_{sc}). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{sc}).
- Le point de la tension maximale de la cellule (V_{oc}), (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}).

- Caractéristique puissance-tension (P-V) :

La puissance crête d'une cellule PV, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard :- éclairement solaire de $1 \text{ kW} / \text{m}^2$; - température de la cellule PV égale à $+ 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

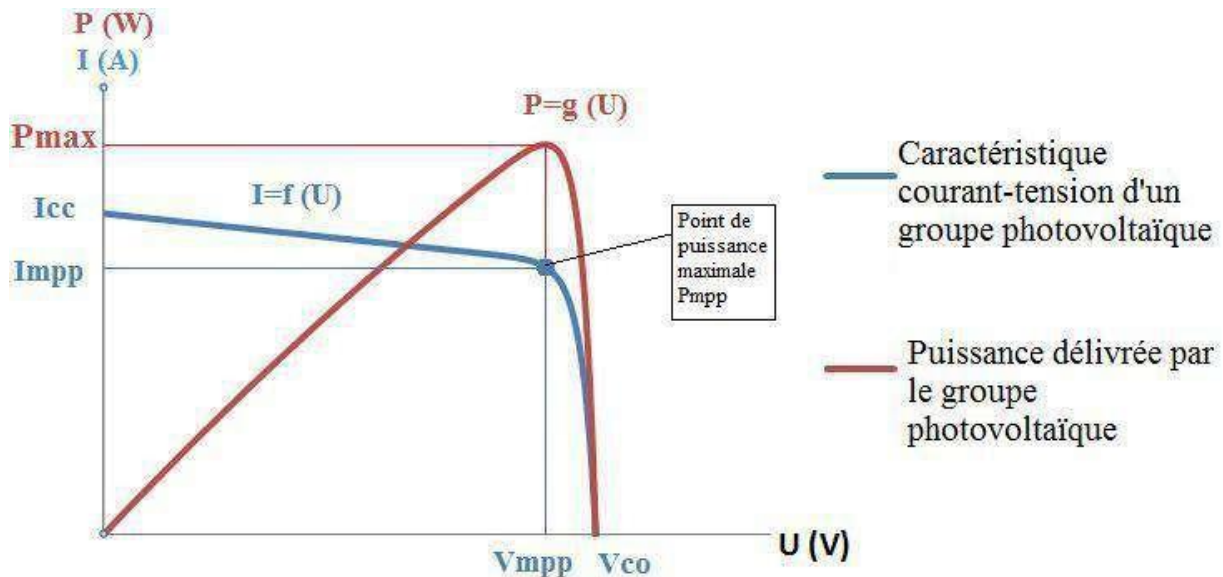


Figure I.10 : Caractéristique puissance-tension.

I.4. Application des systèmes photovoltaïques

- **Electrification hybride (photovoltaïque-éolienne)**

Ce système hybride de production d'électricité associe et exploite deux sources d'énergies renouvelables, l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, afin de générer de l'électricité de manière optimisée., comme représenter sur la figure (I.11).

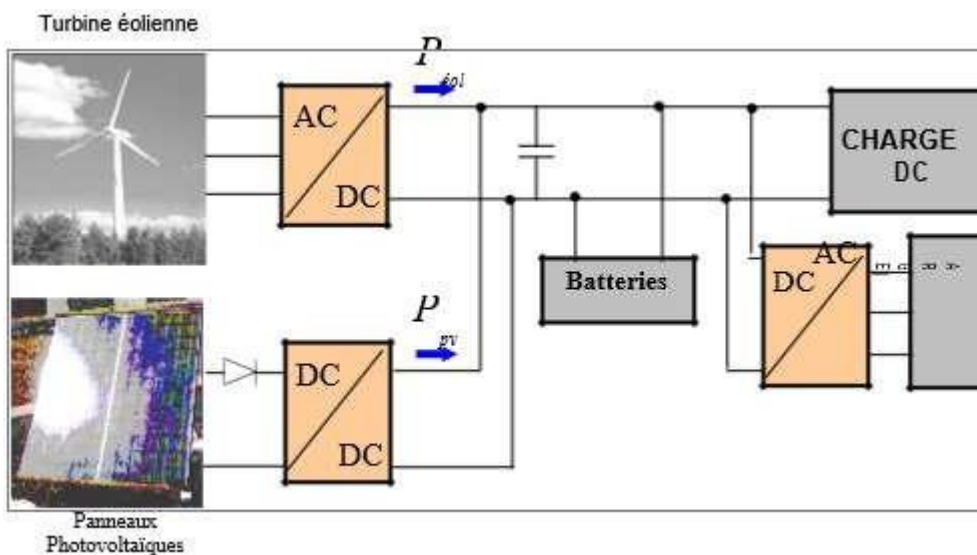


Figure I.11 : Structure de la chaîne hybride (éolienne, photovoltaïque).

Le système hybride se compose d'un sous-système photovoltaïque équipé d'un convertisseur DC/DC, permettant d'optimiser en permanence le point de puissance maximale. Il intègre également une turbine éolienne, chargée de convertir l'énergie du vent en électricité.

Les deux sources d'énergie sont connectées à un bus continu, tandis que le stockage est assuré par des batteries. La charge à alimenter peut être soit en courant continu, soit en courant alternatif, via un onduleur.

- **Le pompage photovoltaïque**

Le pompage photovoltaïque est une méthode qui exploite l'énergie solaire pour faire fonctionner des pompes à eau. Ce système utilise des panneaux solaires qui transforment l'énergie solaire en électricité, permettant ainsi d'alimenter directement une pompe pour extraire, transporter ou stocker de l'eau.

Cette technique est particulièrement adaptée aux régions isolées dépourvues d'accès au réseau électrique. Elle présente de nombreux avantages, tels qu'une faible maintenance, une autonomie énergétique et une réduction des coûts d'exploitation. Le pompage photovoltaïque est couramment utilisé pour l'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable et diverses autres applications hydrauliques.

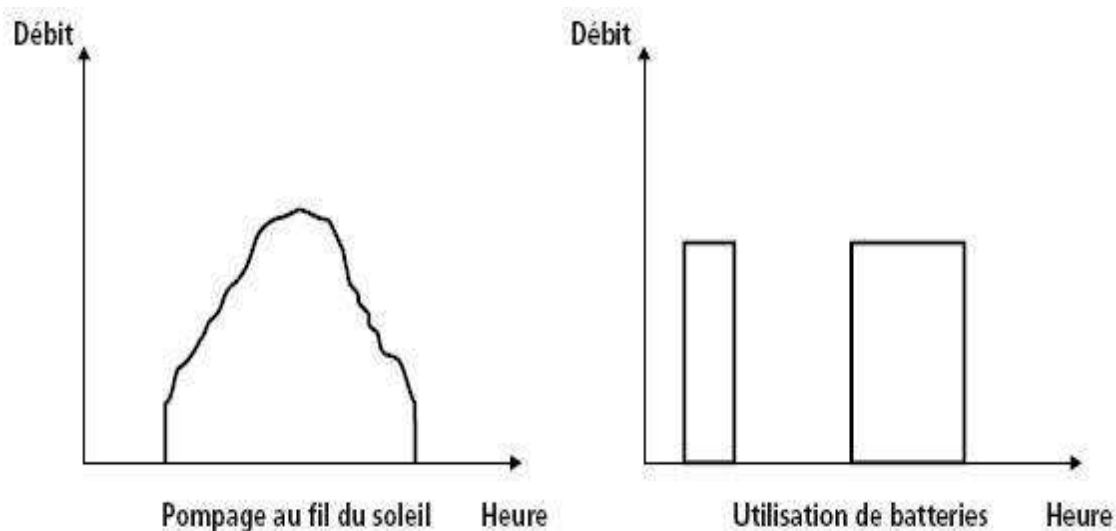


Figure I.12 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie.

- **Le pompage au fil du soleil**

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin.

- Permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable.
- Moins coûteux qu'un système avec batterie.

- **Le pompage avec batterie**

-permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

-Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.

-L'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.

-L'utilisation de batteries comporte davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système.

- **Le chauffe-eau solaire**

Produire de l'eau chaude, chaque jour, grâce à l'action de la lumière du soleil et la stocker pour la journée et la nuit dans un réservoir étanche et isolé (le ballon), c'est le principe fondamental du chauffe-eau solaire. Pour cela on utilise des panneaux sur lesquels, la source primaire d'énergie, le soleil, va rayonner et faire élever la température du liquide qui circule dans ce qu'on appelle, l'absorbeur. Lorsque le fluide est plus chaud que l'eau stockée dans le ballon, le fluide va se mettre à circuler et ainsi transmettre l'énergie emmagasinée.

- **La climatisation solaire**

La climatisation solaire désigne l'ensemble des moyens de production de froid en utilisant comme ressource énergétique primaire l'énergie solaire afin de refroidir un bâtiment. La climatisation s'effectue soit en récupérant l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques soit la chaleur solaire récupérée grâce à des capteurs solaires thermiques,

- **Dessalement de l'eau de mer**

Une des solutions pour pallier le manque d'eau potable sont les stations de dessalement. C'est un processus qui permet de supprimer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour le rendre potable.

I.4.1. Installation photovoltaïque raccordée au réseau

Une installation photovoltaïque connectée au réseau est un système dans lequel les panneaux solaires génèrent de l'électricité, qui est ensuite directement injectée dans le réseau public à l'aide d'un onduleur. Ce type d'installation permet soit de consommer l'énergie produite (autoconsommation), soit de revendre l'excédent au réseau.

L'un des principaux avantages est la réduction de la facture d'électricité, tout en garantissant un approvisionnement continu grâce au réseau. De plus, ce système ne requiert pas de batteries, ce qui contribue à diminuer les coûts d'installation et d'entretien.



Figure I.13 : Représente un système PV connecté au réseau électrique

I.4.1.1. Classification des centrales photovoltaïques connectées au réseau

Une première classification des (CPCR) en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante :

a. Centrales de petite taille ($P_w=1$ à 10 KW) :

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings, ... Elles se connectent au réseau basse tension .

b. Centrales de taille moyenne ($P_w=10$ à 100 KW) :

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être con.[21]

centrales de grande taille (P_w500 KW) :

Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

I.4.1.2.Composition d'un système photovoltaïque raccordé réseau

Un système PV est un ensemble complet d'équipements PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux : le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge.

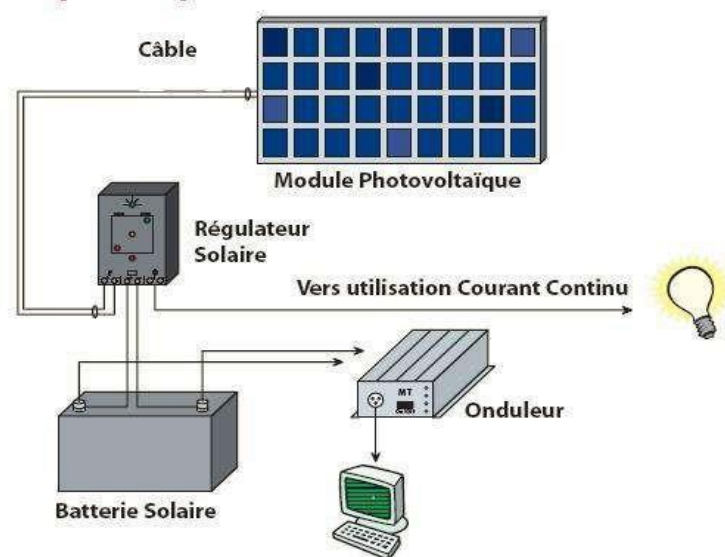


Figure I.14 : Les constituants d'un système PV.

- **Le panneau PV**

L'ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles constitue le module ou le panneau PV, ce dernier est chargé de capter les rayons solaires et les convertir en électricité.

- **La batterie solaire**

Elle est chargée de stocker le courant produit par le panneau pour assurer l'autonomie du système, sa durée de vie est définie par nombre de cycle (charge-décharge), elle se caractérise par :

- Ampérage en Ampère heure (Ah).
- Voltage en Volt.

- **Le régulateur (contrôleur de charge)**

Les régulateurs sont mis en place dans le souci d'assurer une longévité de système de stockage, donc de minimiser le coût d'installation. En effet, un régulateur est chargé de :

-Contrôler la surcharge et la décharge de la batterie.

-Assurer l'optimisation du système du point de vue énergétique où il constitue un nœud de transfert d'énergie entre le module, le stockage et l'utilisation.

Pour fonctionner, un régulateur a besoin d'un indicateur qui l'informe sur l'état de charge des batteries. Il doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils : un seuil haut et un autre bas. Le choix des seuils dépend des caractéristiques des batteries et des conditions d'utilisation. Un régulateur est défini par : Ampérage en Ampère et Voltage en Volt. [22]

- **Le convertisseur d'énergie (onduleur)**

Il est chargé de convertir le courant continu développé par le solaire, vers un courant alternatif, et de voltage de branchement (12 V, 24 V...48V) vers 220 V, il est défini par : le voltage de branchement en volt et la puissance nominale à développer en watt.

- **La charge**

Elle représente l'ensemble des fonctions assurées par divers appareils reliés au système photovoltaïque. Vu les contraintes sur le rendement énergétique des systèmes photovoltaïque, il est importé de définir les critères sur lesquels s'appuiera un choix des charges à utiliser : charge continue ou alternative.

I.4.2.Installations autonomes

Selon le besoin, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones isolées du réseau électrique. Ils sont indépendants du réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité.

Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique

la plus économique. On peut classer ces systèmes en deux catégories :

- **Systèmes avec accumulateurs**

L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure suivante décrit ce système.

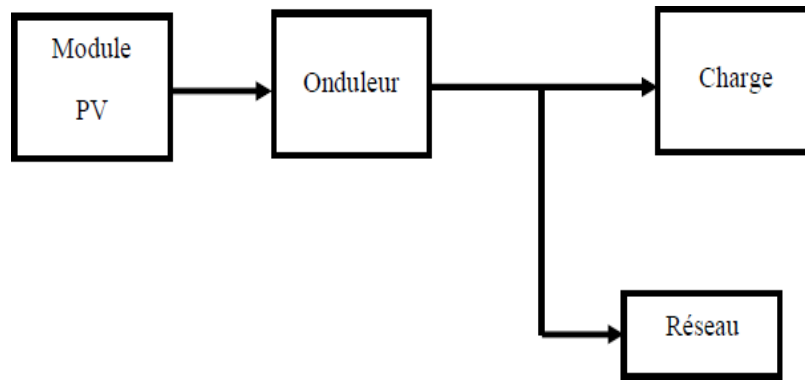


Figure I.15 : Système photovoltaïque directement relié au réseau.

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le coût de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelques années.

- **Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie**

Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant.

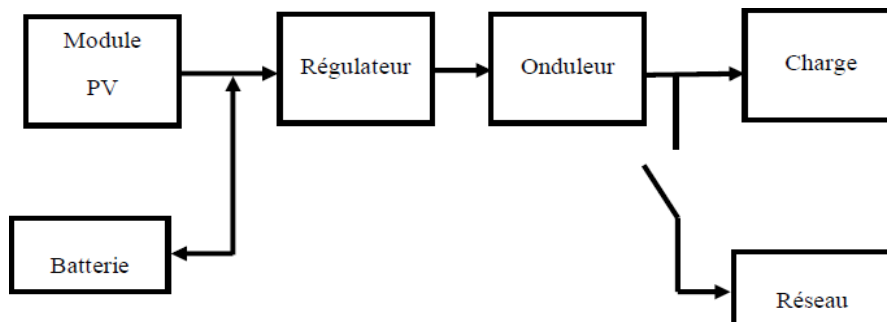


Figure I.16 : Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie. [23]

I.5.Options de consommation de l'énergie photovoltaïque

I.5.1Exportation vers le réseau

Une partie de la production est injectée au réseau lorsque la production dépasse la consommation, le client soutire aussi du réseau le manque. Cette installation est équipée de deux compteurs, l'un mesurant l'énergie soutirée du réseau lorsque la consommation excède

la production (compteur de consommation), l'autre mesurant l'énergie injectée dans le réseau

(compteur d'injection). Ce principe exclut le compteur réversible comme est indiqué sur la figure (I.17).

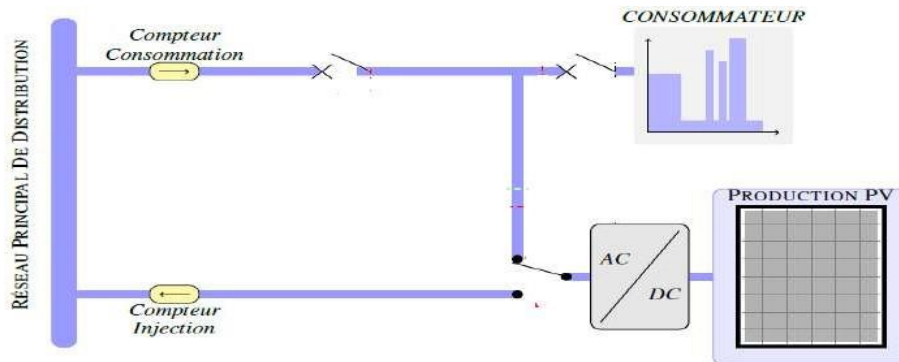


Figure I.17 : Schéma de principe de la configuration d'injection du surplus d'énergie.

I.5.1.1. Installation PV raccordée au réseau avec injection totale de l'énergie produite

Le générateur de production d'origine photovoltaïque est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'un point de livraison distinct du point de livraison utilisé pour les besoins de soutirage du producteur. Comparé à l'achat des excédents, ce type de raccordement conduit le plus souvent à des modifications plus importantes de l'installation par le gestionnaire du réseau. Le producteur injecte au réseau la totalité d'énergie produite et soutirer du réseau la totalité d'énergie nécessaire à sa consommation. La séparation entre les deux points de livraison consommation et injection (production) conduit donc à étoiler le branchement en deux parties, Avec cependant une seule liaison au réseau BT. Le branchement production comporte deux compteurs montés en tête bêche (production et consommation des dispositifs de la chaîne PV), voir figure (I.18).

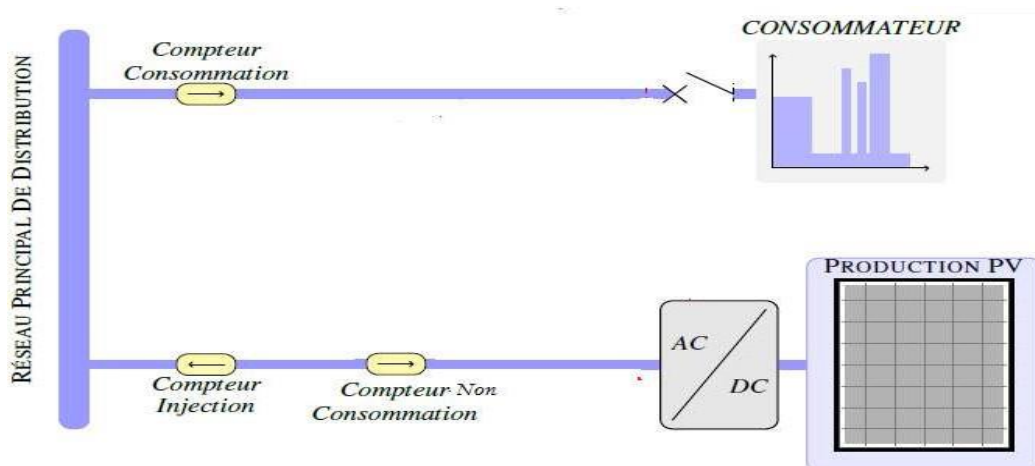


Figure I.18 : Schéma de principe de la configuration d'injection totale d'énergie.

I.5.2. L'autoconsommation

Du point de vue physique, l'autoconsommation de l'électricité photovoltaïque ne diffère pas de la revente totale. Dans les deux cas, les centrales sont connectées au réseau public, et l'électricité emprunte toujours le chemin le plus court. L'autoconsommation se manifeste uniquement par le point de raccordement de la centrale et sa position par rapport aux compteurs. Dans ce contexte, la centrale est reliée au réseau du côté du propriétaire, c'est-à-dire en aval du compteur de consommation. Ainsi, la production est considérée comme une charge négative, ce qui réduit la demande de puissance sur le réseau public. Par conséquent, cette méthode permet de diminuer la consommation d'électricité provenant du réseau public et, par conséquent, de réduire les factures associées

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les bases de l'énergie photovoltaïque, ses éléments clés, ainsi que les diverses utilisations envisageables. Cette fondation théorique est indispensable pour saisir le mécanisme général d'un système photovoltaïque, ses bénéfices et ses contraintes.

CHAPITRE II

Commande MPPT d'un système photovoltaïques

II.1. Introduction

Dans le cadre de l'exploitation optimale des systèmes photovoltaïques, le rôle des convertisseurs statiques de type DC-DC, appelés hacheurs, s'avère fondamental. Ces dispositifs permettent d'adapter la tension ou le courant issus des générateurs photovoltaïques aux exigences des charges ou aux conditions de stockage d'énergie. Leur efficacité repose non seulement sur leur structure, mais également sur la stratégie de commande utilisée pour extraire la puissance maximale du générateur, même en présence de variations météorologiques ou de perturbations de charge.

Ce chapitre est dédié à l'étude approfondie des convertisseurs DC-DC et de leur intégration dans les systèmes photovoltaïques. Il commence par une présentation des hacheurs et de leurs domaines d'application, avec un accent particulier sur le convertisseur Buck-Boost, dont le fonctionnement abaisseur-élevateur est adapté à la grande variabilité de la production solaire. Ensuite, la modélisation du système photovoltaïque est abordée, incluant celle de la cellule PV et du comportement global du système. Enfin, les différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont détaillées, avec une classification rigoureuse et l'analyse des méthodes classiques telles que P&O, InCond, ainsi que les approches basées sur la tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit.

II.2. Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

Un hacheur est un convertisseur DC/DC qui convertit l'énergie DC à un niveau de tension (ou de courant) donné en énergie DC à un autre niveau de tension (ou de courant). Il est nécessaire de stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou d'alimenter des charges continues. Il est composé de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Idéalement, tous ces appareils devraient avoir une bonne efficacité et ne consommer aucune puissance active. Un hacheur est un convertisseur DC qui fonctionne en coupant une quantité d'entrée DC, une tension ou un courant, de sorte que la quantité de sortie soit également DC ou ait une faible ondulation.. [26]

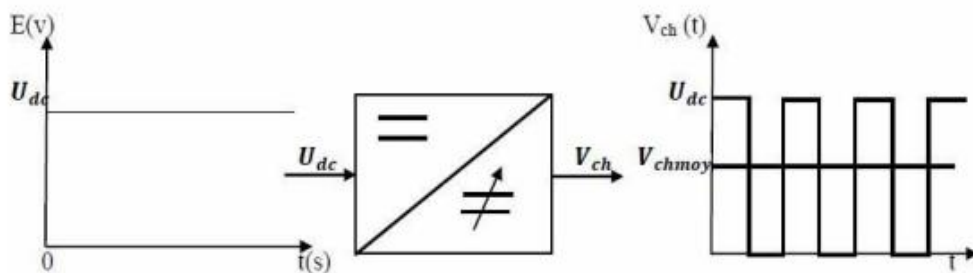


Figure II.1 : Principe de base d'un hacheur.

II.3 Domaine d'utilisation des hacheurs

L'un des principaux domaines d'application des hacheurs est la variation de vitesse des moteurs à courant continu (DCM). Par exemple, ils équipent la plupart des véhicules de traction de poids moyen, comme ceux utilisés dans le métro. Le TGV de première génération (TGV Sud Est) est équipé d'un ensemble moteur hacheur à courant continu. [27]

Tous les équipements utilisant l'énergie éolienne ou solaire sont équipés d'un hacheur. Ils peuvent maintenir une tension d'entrée très flexible et constante. Les hacheurs sont également utilisés pour alimenter les moteurs pas à pas.

II.4. Convertisseur Buck-Boost

II.4.1. Définition

Le hacheur abaisseur-élevateur, également connu sous les noms de dévolteur-survolteur ou de type Buck Boost, est un convertisseur DC-DC à stockage inductif de type indirect. Il utilise une source d'entrée de tension continue, avec un filtrage capacitif en parallèle, et alimente une charge de sortie continue, qui se compose d'une source de tension (un condensateur en parallèle avec une charge résistive). Ce convertisseur dévolteur-survolteur allie les caractéristiques des deux types de convertisseurs précédemment mentionnés. [28]

II.4.2. Schéma du convertisseur Buck-Boost

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation.

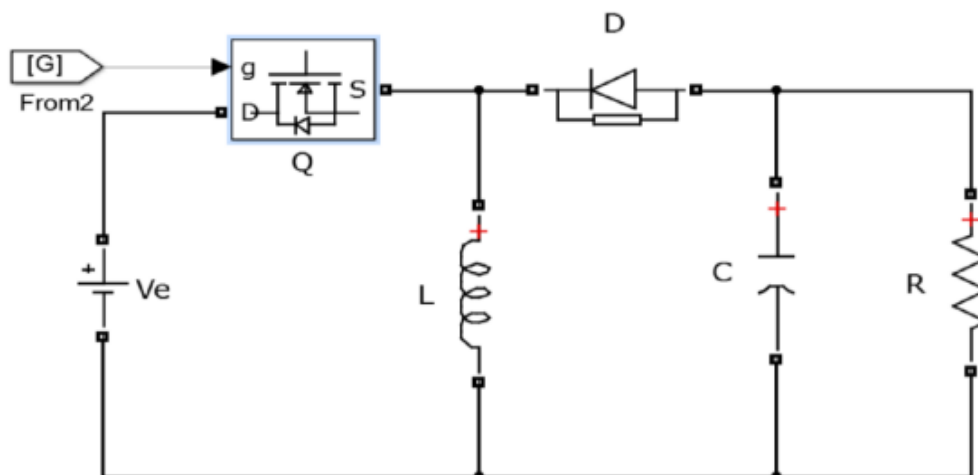


Figure II.2: Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost.

II.4.3. Principe de fonctionnement

La figure (II.2) présente le principe de fonctionnement de ce convertisseur, et la figure (II.3) illustre les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes des courants (à gauche) et des tensions (à droite).

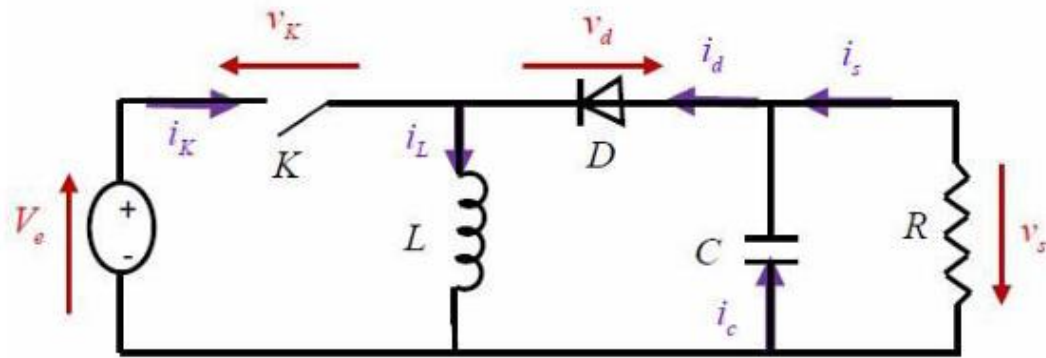


Figure II.3: Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost.

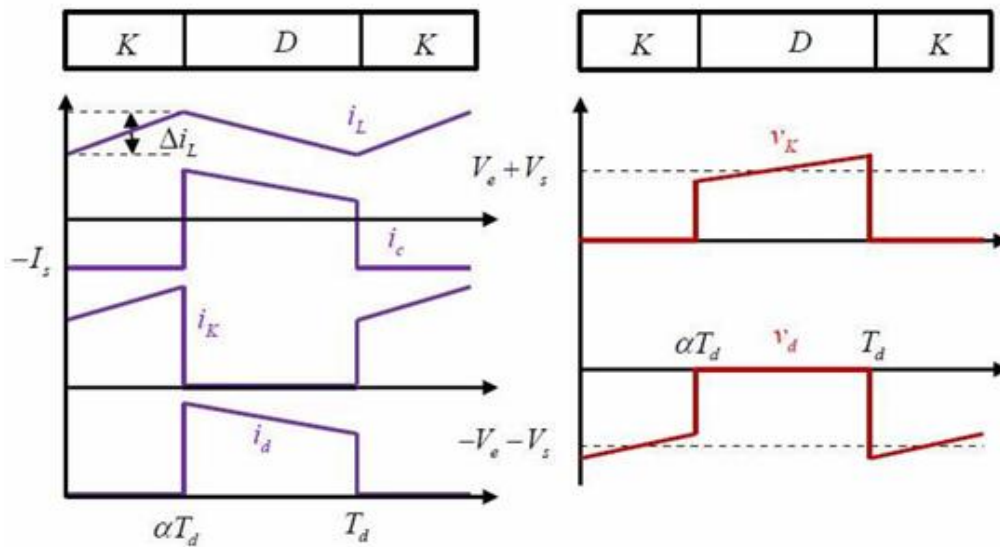


Figure II.4: Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck-Boost.

Lorsque K est fermée et D est ouvert durant l'intervalle $[0 \alpha T_d]$, le circuit électrique du convertisseur sera comme montré dans la figure (II.4) :

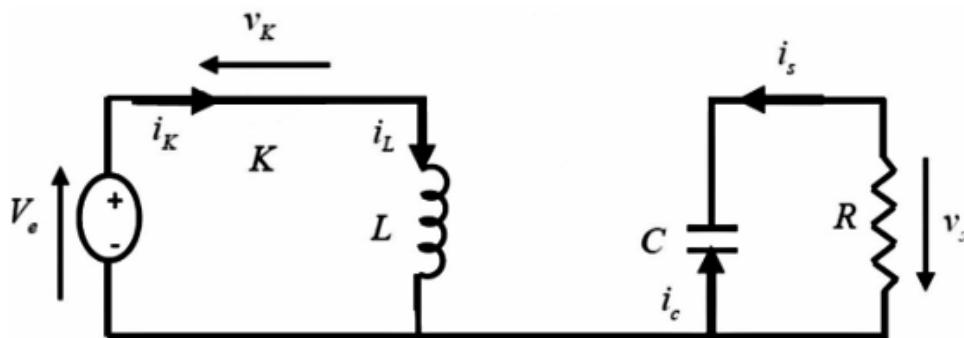


Figure II.5: Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est fermé.

On a les équations qui régissent le système comme suit :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \tag{II.1}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \tag{II.2}$$

À l'instant $t = \alpha T_d$, le courant atteint sa valeur maximale dans l'inductance I_{max}

D'où :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (II.3)$$

Lorsque K est ouvert et D est fermée durant l'intervalle $[\alpha T_d T_d]$, le circuit électrique devient (figure II.13) :

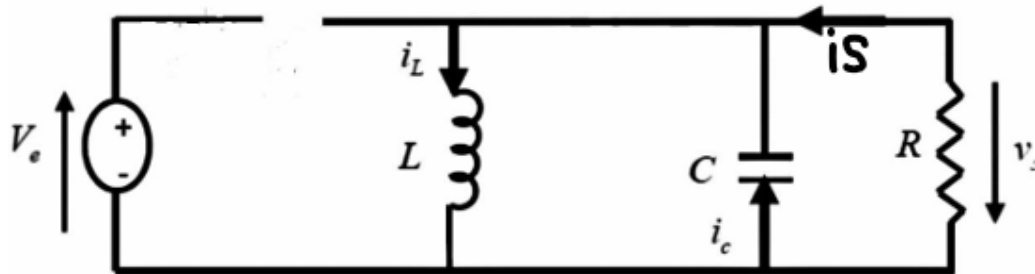


Figure II.6: Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est ouvert.

On prend maintenant les nouvelles équations :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_s \quad (II.4)$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e}{L} (t - \alpha T_d) \quad (II.5)$$

à l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min} comme suit:

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (II.6)$$

Ainsi que l'ondulation du courant dans l'inductance est exprimée comme suit :

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min} \quad (II.7)$$

L'égalité des deux équations de l'ondulation de courant (II.2) et (II.5) donne la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (II.8)$$

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance comme suit:

$$i_L = \frac{i_s}{1-\alpha} \quad (II.9)$$

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur inverseur en tension. [29]

II.4.4. Applications

- Alimentation de systèmes embarqués

- Alimentations pour dispositifs portables
- Énergie renouvelable
- Alimentations pour LED
- Applications automobiles
- Dispositifs médicaux portables
- Alimentations de secours
- Batteries et chargeurs intelligents
- Systèmes de régulation de puissance
- Alimentation de circuits RF

II.5 Modélisation du système

Le circuit étudié est composé d'un générateur photovoltaïque GPV qui sera optimisé à travers un convertisseur DC-DC commandé par une MPPT, (comme montre la figure II.7)

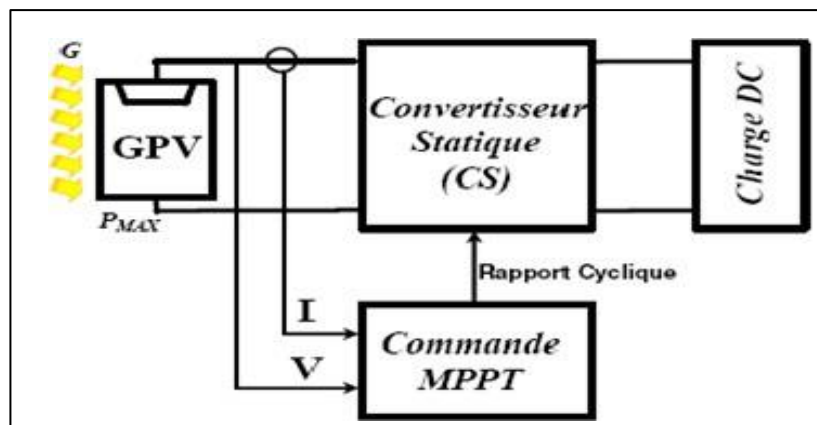


Figure II.7: Schéma d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.[30]

II.6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques nécessite un choix approprié des circuits électriques équivalents (voir figure II.8). Le modèle idéal d'une cellule se compose d'une source de courant en parallèle avec une diode. Pour prendre en compte les effets dissipatifs, deux résistances ont été ajoutées : la résistance série et la résistance shunt. [31].

Pour élaborer un circuit équivalent précis d'une cellule photovoltaïque, il est essentiel de comprendre la configuration physique des composants de la cellule ainsi que les caractéristiques

électriques de chacun d'eux, en tenant compte de divers niveaux de détail. Dans cette optique, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, qui découle des propriétés des jonctions semi-conductrices à la base de ces dispositifs. Ces modèles se distinguent par les méthodes mathématiques utilisées et le nombre de paramètres pris en compte pour le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. Nous examinerons deux types de modélisations d'une cellule photovoltaïque : le modèle à une seule diode (ou exponentielle simple) et le modèle à deux diodes (ou double exponentielle). [32].

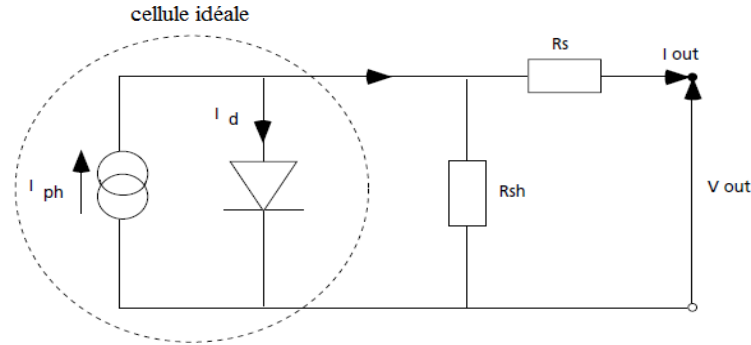


Figure II.8: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.10}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qV_{pv} + qR_s I_{pv}}{N_s K T a}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \tag{II.11}$$

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_{sc}(T - 298)] \frac{G}{G_{sc}} \tag{II.12}$$

Où I_{sc} est le courant de court-circuit dans les conditions d'essai standard, G (W/m^2) est l'indice SI à la surface de la cellule et K_{sc} est le coefficient du courant de court-circuit. I_0 est influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_{sc}(T - 298)}{e^{\frac{V_{oc} + K_v(T - 298)}{a \times V_{th}} - 1}} \tag{II.13}$$

V_{th} est la tension thermique de la cellule, qui s'exprime comme suit :

$$V_{th} = \frac{(K \times T)}{q} \tag{II.14}$$

II.7 Recherche du point de puissance maximale MPPT

MPPT, ou Maximum Power Point Tracking, désigne une technologie qui permet d'optimiser la production d'énergie des panneaux photovoltaïques. Le régulateur MPPT analyse la tension électrique générée par le panneau plusieurs fois par jour afin d'identifier le point de puissance maximale. Son objectif est de garantir que cette puissance optimale soit constamment exploitée.

II.8 Principe de la commande MPPT

La méthode de contrôle généralement utilisée consiste à ajuster automatiquement le rapport cyclique pour optimiser le fonctionnement du générateur, indépendamment des instabilités météorologiques ou des variations brusques de charge qui peuvent survenir à tout moment.

Comme le montre la figure III.5, selon le type de perturbation, le point de fonctionnement peut se déplacer du point de puissance maximale PPM1 vers un nouveau point P1, qui peut être plus ou moins éloigné de l'optimum. En cas de variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster le rapport cyclique pour atteindre le nouveau point de puissance maximale PPM2. Pour une variation de charge (cas b), on constate également un changement du point de fonctionnement, qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'intervention d'un système de commande. Enfin, un dernier type de variation du point de fonctionnement peut se produire en raison des fluctuations de température. [33]

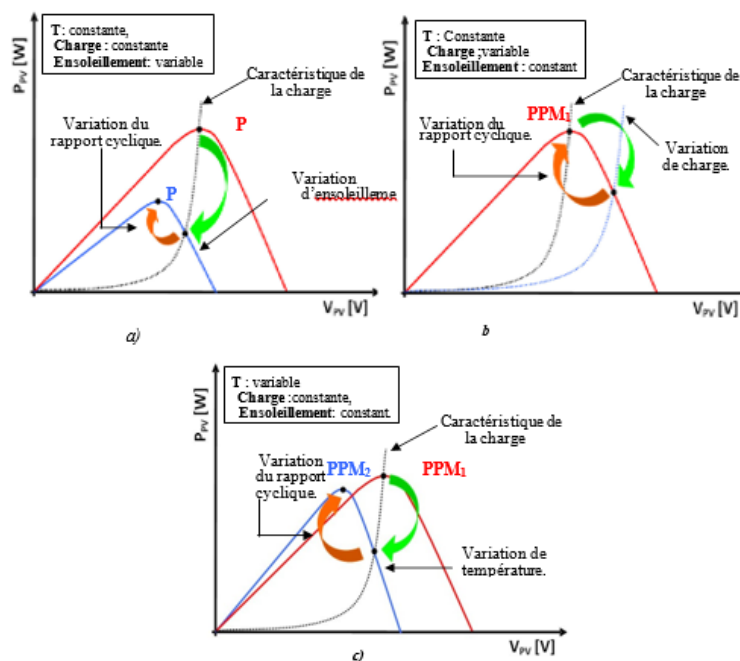


Figure II.9: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal[34]

- a) suite à une variation d'ensoleillement,
- b) suite à une variation de charge,
- c) suite à une variation de température.

Dans la littérature il existe plusieurs méthodes et techniques de la commande MPPT, qu'ils sont classifiés selon les critères de la précision de la recherche, la rapidité, ses techniques sont différées t en termes de complexité, le nombre et les types des capteurs nécessaires, la mise en œuvre du matériel.

On peut classer quelques méthodes on quatre groupes comme suit :

- Technique directe : méthode de perturbation et observation, incrémentation de conductance.
- Technique indirecte : Courant de court-circuit, tension de circuit ouvert.
- Technique basée sur intelligence artificiel :Logique floue, réseau neurone, les algorithmes génétiques et PSO.
- Autres techniques :Mode glissant, théorème de bisection et les méthodes hybrides.

II.9. Classification des techniques MPPT

Il existe plusieurs algorithmes de recherche de point maximum qui peuvent améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Les principales différences entre ces algorithmes sont la mise en œuvre (numérique ou analogique), la simplicité de conception, les exigences du capteur, la vitesse de convergence, la plage d'efficacité et le coût du matériel. La classification peut être basée sur le type de recherche ou sur les paramètres d'entrée/sortie de la commande MPPT. Nous distinguons [35]:

II.9.1. Classification des commandes MPPT selon les paramètres L'entrée/sortie

- Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrées du convertisseur statique.
- Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur statique.

II.9.2. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche ou contrôle

1. Les méthodes indirectes :

- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de courant de court-circuit.

2. Les méthodes directes :

- La méthode Perturb & Observe (P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance (IC).
- La méthode de Hill Climbing

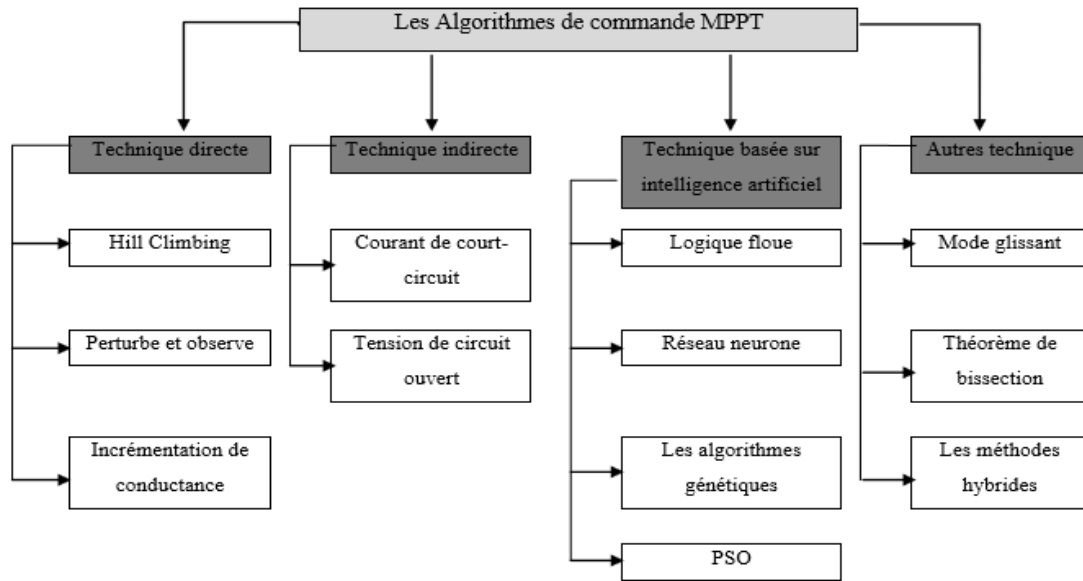


Figure II.10: Classification des méthodes MPPT [36].

II.10 les méthodes classiques de MPPT

II.10.1 La méthode perturbe et observe P&O

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension du panneau photovoltaïque V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II.11), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [37]. (figure II.11).

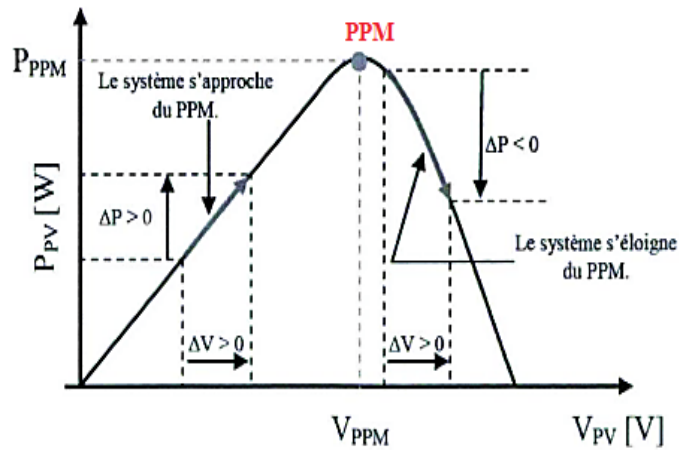


Figure II.11: Caractéristique Pp (Vpv) P&O.

Cette méthode facilite de situer le point de fonctionnement par rapport au ppm, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié (figure II.12), si suite à une perturbation de tension, la puissance du générateur augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.[38]

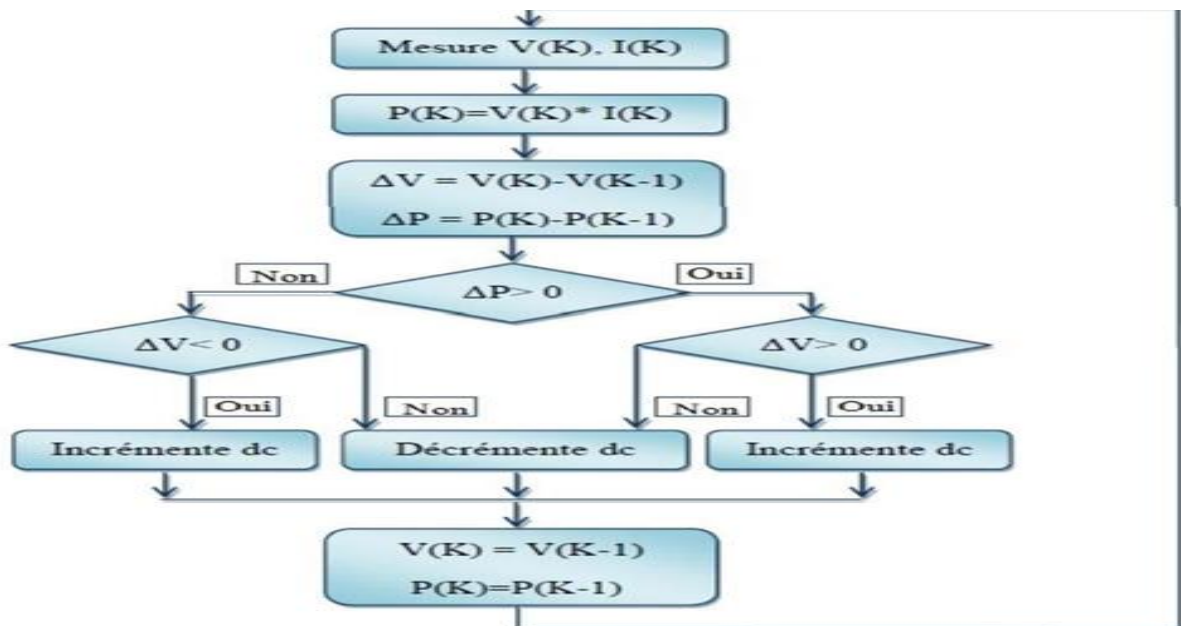


Figure II.12: Organigramme de la méthode P&O.

Tel que :

$P(k)$: la nouvelle puissance .

$P(k-1)$: l'ancienne puissance dans le temps (t-1).

$$\Delta V = V(K) - V(K - 1) \tag{III.16}$$

$$\Delta P = P(K) - P(K - 1) \tag{III.17}$$

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM.

En mesure $V(k)$ et $I(k)$ pour calculer la puissance :

$$P(k) = V(k) * I(k) \tag{III.18}$$

Si $P(k) > 0$ et $V(k) > 0$; Si oui on incrémente la tension V , Sinon on décrémente la tension V .

Si $P(k) < 0$ et $V(k) < 0$; Si oui on incrémente la tension V , sinon on décrémente la tension V .

$$\text{Si } P(k) = 0 \text{ alors } P(k) = P(k - 1) \qquad \text{donc } V(k) = V(k - 1) \tag{III.19}$$

le tableau ci-dessous résume les quatre cas de variation possible :

Perturbation précédente	Changement dans la puissance	Perturbation prochaine
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Tableau II.1 Fonctionnement de la méthode P&O.

II.10.2 La méthode de l'Incrémentation de la Conductance

Ainsi que la méthode de P&O , la méthode de l'incrémentation de la conductance (en anglais : Incremental conductance « InCond »), est très utilisé pour la recherche de la puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. La technique de cette dernière est basée sur la pente du dérivé de la puissance par rapport à la tension de la courbe $P(V)$ la figure (II.13), tel que la pente est nulle au point de puissance maximale MPP, positive à gauche du ppm et négative à droite. [39]

Pour appliquer cette méthode on doit connait la valeur de la conductance G du générateur, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.20})$$

et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \Delta I_{pv} / \Delta V_{pv} \quad (\text{II.21})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (PPV) par rapport à la tension (VPV) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM.

- Si la dérivée est nulle $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ donc , le point de fonctionnement est à gauche du PPM
- Si la dérivée est nulle $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ donc , le point de fonctionnement est sur le PPM
- Si la dérivée est nulle $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ donc , le point de fonctionnement est à droite du PPM

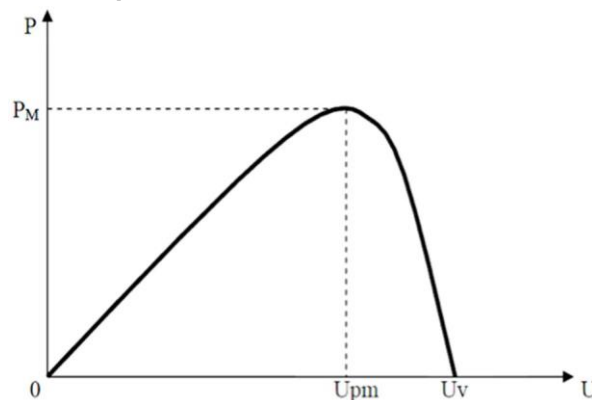


Figure II.13: Caractéristique P(V) du module photovoltaïque.

Le MPP est donc recherché par la comparaison entre la conductance G (I/V) et l'incrément de la conductance $dG(dI/dV)$ instantanées voir figure (II.13). Une fois le MPP est trouvé, on ne change plus la tension jusqu'à une variation du courant. Dans ce cas, l'algorithme commence de nouveau la recherche du nouveau MPP.

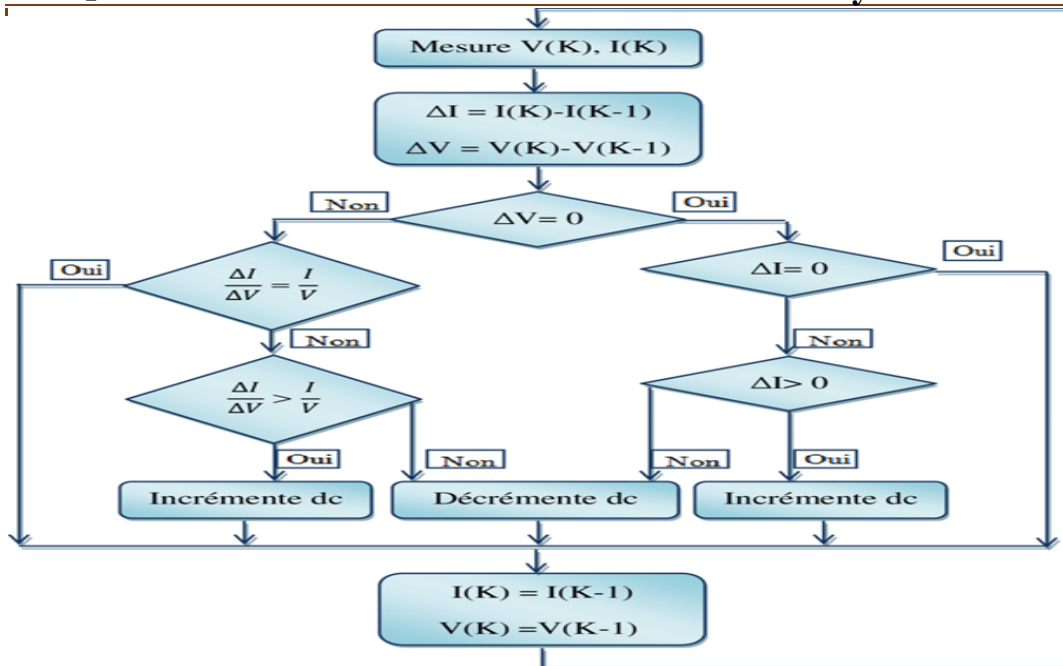


Figure II.14 : Organigramme de la méthode InCond.

comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition , ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme InCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

II.10.3 La méthode basée sur la mesure de la tension du circuit ouvert

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation suivante :

$$V_{opt} = k1 * V_{co} \tag{II.22}$$

où k est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

Pour en déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{co} . Par conséquent, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimale en ajustant la tension de panneau à la tension optimale calculée. Le processus permet d'agir cycliquement sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale (figure II.15).

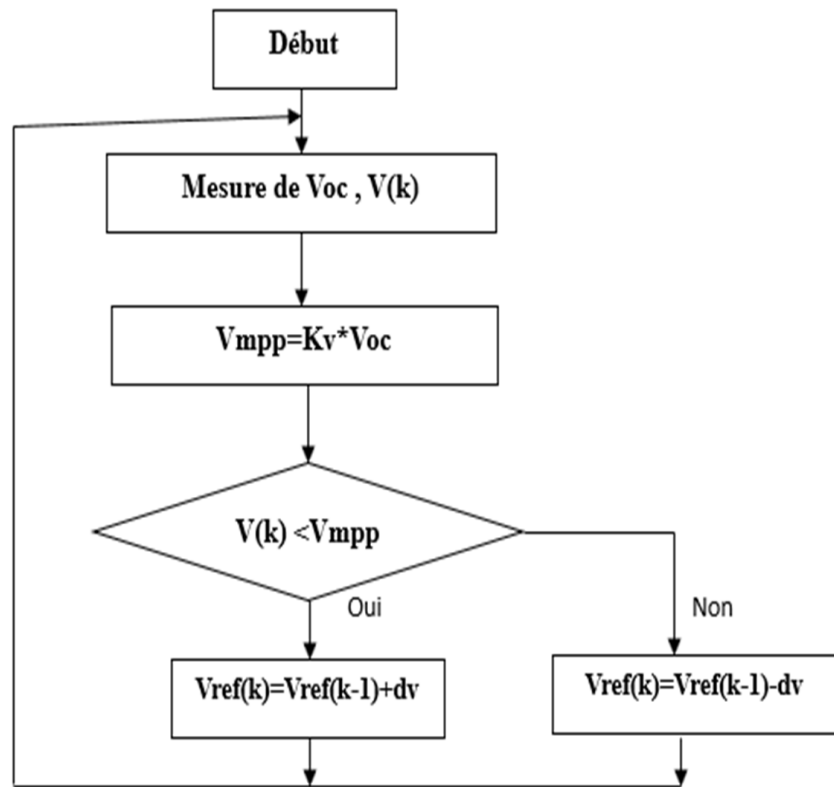


Figure II.15: Organigramme de la méthode de mesure du VCO.

II.10.4 Commande à base de la mesure du courant de court-circuit

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{opt} = k2 * I_{cc} \quad (II.23)$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92. [40]

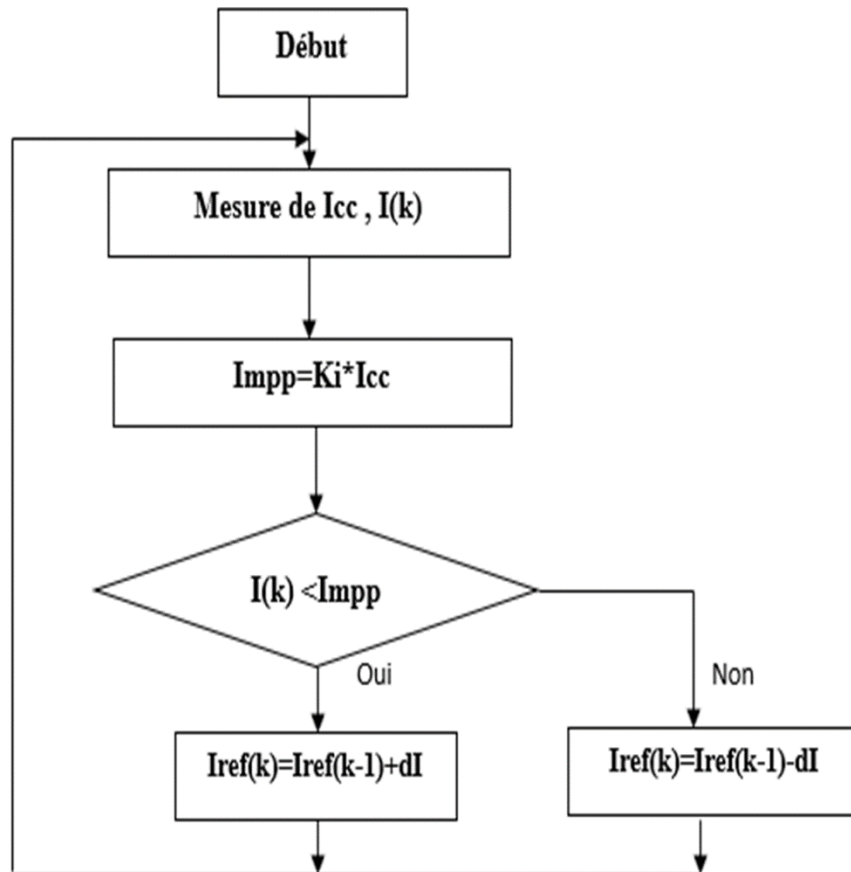


Figure II.16: Organigramme de la méthode de mesure su I_{cc} .

Le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal (figure II.10). Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale.

II.11 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'importance des convertisseurs DC-DC dans l'optimisation des performances des systèmes photovoltaïques. En particulier, le convertisseur Buck-Boost a été étudié pour sa capacité à adapter dynamiquement la tension en fonction des besoins du système, qu'il s'agisse de stockage ou d'alimentation de charges spécifiques. Sa modélisation a révélé un comportement non linéaire dépendant étroitement du rapport cyclique, justifiant la nécessité d'une commande intelligente.

La modélisation précise de la cellule photovoltaïque a ensuite fourni les bases nécessaires à l'intégration efficace de stratégies MPPT. Les techniques de suivi du point de puissance maximale les plus répandues, comme la méthode P&O et l'incrémentation de conductance, qui permettent d'extraire la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. Ces méthodes sont cruciales pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Bien que ces algorithmes soient fréquemment employés, l'une des principales problématiques rencontrées est le phénomène de "déviation". Ce dernier peut survenir dans des conditions variables, telles que l'irradiance, la température ou la charge, ce qui entraîne un éloignement progressif du point de puissance maximale et une diminution de l'efficacité du système photovoltaïque.

Chapitre III

Élimination de déviation du mode de recherche de la commande MPPT

III.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque se positionne aujourd'hui comme l'une des solutions les plus prometteuses pour relever les défis énergétiques et environnementaux. Cependant, les performances des systèmes photovoltaïques (PV) sont fortement influencées par les conditions d'exploitation, notamment l'irradiance et la température ambiante et la charge. Ces fluctuations impactent directement la puissance produite par les panneaux solaires, qui possèdent une courbe courant-tension (I-V) non linéaire, incluant un point de puissance maximale (MPP) qu'il est essentiel de suivre en temps réel pour garantir un fonctionnement optimal. [41].

Pour optimiser l'utilisation de l'énergie produite par un générateur photovoltaïque, on recourt généralement à des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT - Maximum Power Point Tracking). Parmi les diverses méthodes présentées dans la littérature, l'algorithme Perturb and Observe (P&O) se distingue par sa simplicité d'implémentation et son faible coût de calcul, ce qui en fait l'un des plus utilisés. [42].

Cependant, il montre une instabilité lors de changements météorologiques rapides et changement rapides du charge . Cette instabilité résulte d'une décision erronée de l'algorithme P&O traditionnel lors du premier ajustement du rapport cyclique en réponse à des variations rapides de l'irradiation, de la température et de la charge[43].

Un changement brusque de température est un phénomène extrêmement rare dans la nature et dans la plupart des environnements physiques. Pour qu'un corps voie sa température augmenter d'un degré ou plus en une fraction de seconde, il faudrait qu'une quantité d'énergie très importante lui soit transférée instantanément, ce qui est en contradiction avec les lois connues du transfert thermique. Que ce soit par conduction, convection ou rayonnement, le transfert de chaleur prend du temps, car les matériaux possèdent des propriétés thermiques telles que la capacité calorifique et l'inertie thermique, qui rendent leur réponse aux variations de température relativement lente.

C'est pourquoi un changement significatif de température sur un intervalle de temps très court – comme une milliseconde ou moins – est pratiquement impossible dans la réalité. Cette base scientifique constitue donc une justification suffisante pour écarter l'hypothèse d'un changement thermique soudain lors de l'analyse ou de l'interprétation des phénomènes liés à la température. Cela conduit également, de manière cohérente, à ne pas aborder les effets secondaires associés à une telle variation, comme la dérive thermique, qui perd toute pertinence lorsque le changement lui-même ne peut se produire dans des conditions réelles.

III.2 Utilisation de l'algorithme P&O classique sous variations environnementales et de charge

III.2.1 Utilisation de l'algorithme P&O classique

L'algorithme Perturbation et observation (P&O) est largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour assurer le suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Il est apprécié pour sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût computationnel, et sa compatibilité avec divers types de convertisseurs DC-DC. Dans sa forme classique, le P&O repose sur une perturbation périodique de la tension d'entrée du convertisseur, et sur l'observation de la variation de la puissance produite par le générateur PV. Si la puissance augmente, la perturbation continue dans le même sens ; sinon, elle est inversée [44].

III.2.2 Effets des variations d'irradiance et de la charge

Cependant, lorsque le système fait face à des variations rapides de l'irradiance solaire ou à un changement de la charge connectée, le fonctionnement de la méthode P&O classique peut poser des difficultés.

Changement d'irradiance : Une hausse soudaine de l'ensoleillement entraîne naturellement une augmentation de la puissance produite par le panneau, indépendamment de l'intervention de l'algorithme. Le P&O peut alors interpréter cette hausse comme le résultat de sa propre perturbation, même si celle-ci éloigne en réalité le système du point de puissance maximale (MPP). Cela conduit à une décision incorrecte et à une poursuite de la perturbation dans une direction inappropriée.

Variation de la charge : Lorsque la charge électrique du système est modifiée, par exemple en le reliant à un convertisseur ou à une batterie régulée, la position du point de puissance maximale (MPP) observée par le générateur photovoltaïque évolue. Dans ce contexte, l'algorithme P&O, qui n'a pas de connaissance précise du système dans son ensemble, peut continuer à provoquer des perturbations inappropriées.

III.2.3 Conséquence : La déviation

Ce comportement inapproprié en conditions dynamiques engendre un phénomène connu sous le nom de drift : le point de fonctionnement s'éloigne progressivement du MPP. Cela entraîne une

diminution de la capacité du système à extraire la puissance maximale disponible, ce qui se traduit par :

- réduction significative de l'efficacité énergétique.
- instabilité dans le fonctionnement du convertisseur DC-DC.
- dégradation des performances globales du système photovoltaïque, surtout dans des environnements instables ou partiellement nuageux. [45-46].

III.2.4 Illustration du problème

Imaginons que le système fonctionne à un certain point proche du MPP. Un nuage passe et l'irradiance chute brusquement. La puissance baisse naturellement, mais l'algorithme croit à tort que sa dernière perturbation est responsable de cette baisse. Il inverse donc la direction de la perturbation, alors qu'elle aurait pu être correcte. À la perturbation suivante, si l'ensoleillement remonte, la puissance augmente, mais encore une fois à cause du soleil, pas à cause de l'algorithme. Le P&O continue alors dans une direction inappropriée. Ce cycle se répète, provoquant une déviation continue du point de fonctionnement.

III.3 Simulation et synthèse du système global

Le système se compose de trois éléments distincts, le panneau photovoltaïque, le convertisseur de type hacheur Buck Boost (section de puissance) et son contrôle (section de contrôle), représentant le régulateur MPPT et la charge. Pour chaque pièce, un modèle simple est sélectionné pour la simulation. Cela nous permet de mieux comprendre l'influence des paramètres du système et de tirer des conclusions intéressantes.

III.3.1. Bloc de Simulation d'un system PV Sous MATLAB simulink

Cette simulation représente un système photovoltaïque (PV) modélisé sous Simulink. Elle commence par un bloc qui génère les conditions atmosphériques (comme la température et l'ensoleillement), lesquelles influencent le fonctionnement PV (Annexe I)

. Ce générateur produit alors de l'électricité sous forme de courant et de tension. Un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), ici de type "P&O", ajuste le système pour obtenir la puissance maximale possible à partir du panneau solaire. Les résultats (tension, courant, puissance) sont affichés et enregistrés pour analyse. En résumé, la simulation permet de voir comment un panneau solaire réagit à différentes conditions et comment optimiser sa production d'énergie.

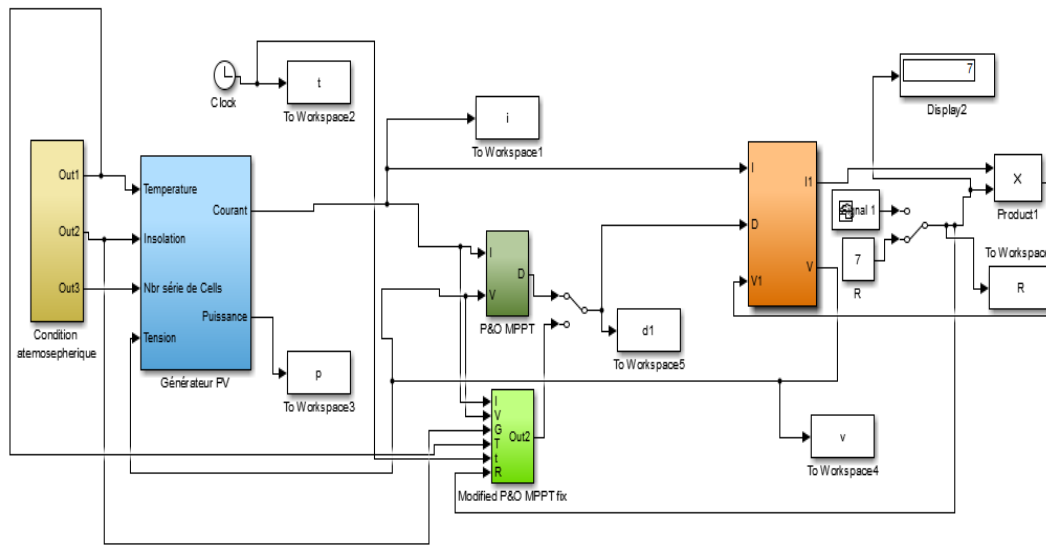


Figure III.1 : Implémentation Simulink-Model d'un système photovoltaïque autonome.

III.4. Analyse de la déviation du mode de recherche

III.4.1. Cas d'une Variation rapide de l'irradiation solaire

III.4.1.1 Cas d'une d'augmentation rapide de l'irradiation solaire

Pour étudier de manière approfondie et précise la déviation, nous avons exposé le panneau solaire à une variation rapide du rayonnement solaire, passant d'un niveau bas à un niveau élevé, comme l'illustre la figure ci-dessous.

La figure (III.2) permet de comprendre le déplacement par lequel se produit une déviation entraînant l'éloignement du point de puissance maximale.

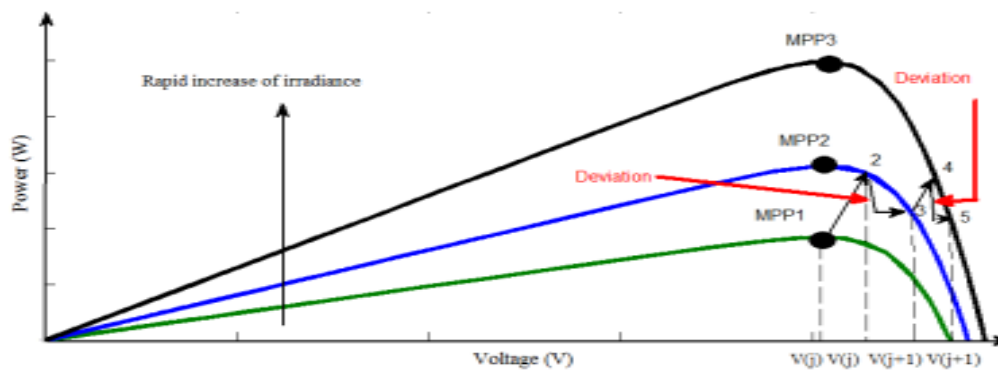


Figure III.2 : Analyse de la déviation du mode recherche cas d'augmentation rapide l'irradiation solaire. [2]

-Supposons qu'une augmentation de l'irradiance se produise alors que le système

photovoltaïque fonctionne au point MPP1 durant la perturbation j , comme le montre la figure (III.2). Le point de fonctionnement se déplacera vers un nouveau point 2 sur la courbe d'irradiance correspondante pendant cette même perturbation j , entraînant une augmentation de la puissance (ΔP) et de la tension (ΔV). Lors de la perturbation $d+1$, cette augmentation positive de la tension ne fera qu'accroître la perturbation, déplaçant ainsi le point de fonctionnement du point 2 au point 3, comme illustré à la figure III.2. Cette décision erronée éloigne le point de fonctionnement du système photovoltaïque du point de puissance maximale (MPP) en raison des variations successives de l'irradiance, comme le montre également la figure III.2.

III.4.1.2 Cas d'une diminution rapide de l'irradiation solaire :

Pour étudier de manière approfondie et précise la déviation, nous avons exposé le panneau solaire à une variation rapide du rayonnement solaire, passant d'un niveau élevé à un niveau bas, comme l'illustre la figure ci-dessous.

La figure (III.3) permet de comprendre le déplacement par lequel se produit une déviation entraînant l'éloignement du point de puissance maximale.

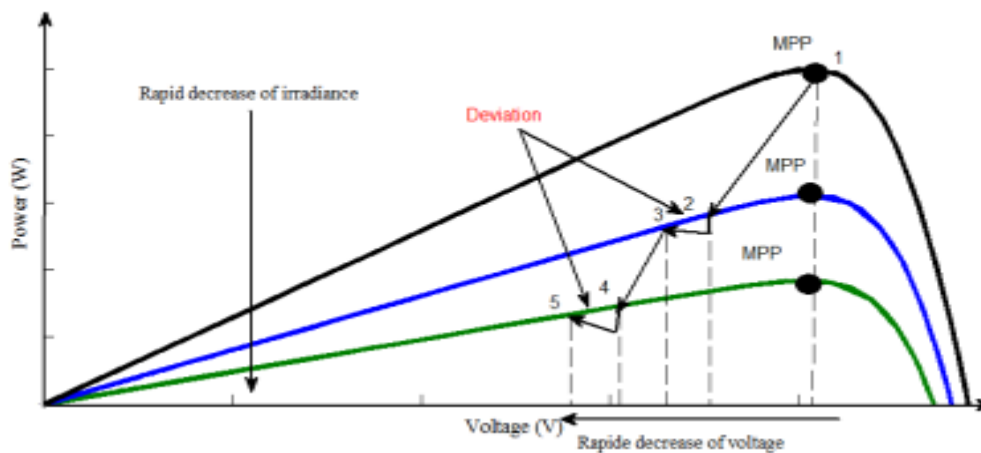


Figure III.3 : Analyse de la déviation du mode recherche cas diminution rapide de l'irradiation solaire. [2]

Cette image illustre le phénomène de déviation du point de fonctionnement dans un système photovoltaïque (PV) lors d'une baisse rapide de l'irradiation solaire, en particulier lorsqu'un algorithme MPPT de type perturbation et observation (P&O) est utilisé. Sur le graphique, plusieurs courbes Puissance-Tension (P-V) sont tracées, chacune représentant le comportement du générateur PV sous des niveaux d'irradiation différents. Lorsqu'une chute brutale d'irradiation survient (comme le passage soudain d'un nuage), la courbe caractéristique du panneau change instantanément (de la courbe noire à la bleue ou à la verte), alors que le système MPPT continue d'effectuer des perturbations en se basant sur l'ancienne courbe. Cela provoque une erreur de suivi,

où le point de fonctionnement (points 2, 3, 4, etc.) s'éloigne temporairement du nouveau point de puissance maximale (MPP) au lieu de s'en rapprocher. Ce décalage est appelé phénomène de dérivation. Il engendre une perte de puissance et une baisse de l'efficacité énergétique du système PV. Ce phénomène met en évidence les limites du P&O classique, notamment en cas de variations rapides des conditions climatiques, et souligne la nécessité d'algorithmes MPPT plus robustes et adaptatifs pour un suivi optimal du MPP en temps réel.

III.4.1.3 Résoudre le problème de déviation lors changement rapide de l'irradiation solaire :

Afin de résoudre le problème de déviation du point de fonctionnement rencontré dans la méthode classique P&O lors des variations rapides de l'irradiation solaire (augmentation ou diminution brutale), nous avons introduit plusieurs améliorations dans l'algorithme.

D'abord, on a ajouté une condition basée sur la variation du courant (ΔI), en complément de la puissance (ΔP) et de la tension (ΔV), afin de mieux détecter les changements climatiques soudains.

Par exemple, dans le cas où $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$, la méthode classique interprète cela comme un rapprochement du MPP, alors qu'il peut s'agir d'une augmentation soudaine de l'irradiation. En analysant $\Delta I > 0$, on confirme qu'il s'agit bien d'un changement climatique, ce qui permet d'adapter le comportement de l'algorithme pour éviter une perturbation erronée.

De même, si $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$, cela peut être dû à une diminution rapide de l'irradiation, et non à un éloignement du MPP. Dans ce cas, la détection de $\Delta I < 0$ permet d'identifier la cause réelle et de corriger la réponse du contrôleur.

Ensuite, on a introduit une perturbation adaptative (ΔD_n), plus grande que la perturbation classique (ΔD), ΔD_n est un pas variable exprimé par l'équation (III.1).

$$\Delta D_n = \pm M |\Delta G| \quad (III.1)$$

M est un paramètre constant et ΔG représente la variation de l'irradiance, pour permettre un repositionnement rapide du point de fonctionnement vers le nouveau MPP. Cette perturbation n'est appliquée que lorsqu'un changement climatique est confirmé par les trois dérivées (ΔP , ΔV , ΔI), ce qui permet de limiter les erreurs de suivi tout en maintenant la stabilité.

Grâce à ces modifications, l'algorithme devient plus intelligent et plus robuste face aux changements climatiques, assurant un meilleur suivi du MPP avec moins de pertes.

III.4.2. Cas d'une Variation rapide de la charge

III.4.2.1 Cas d'une d'augmentation rapide de la charge

Le problème de perte de puissance lors d'un changement rapide de charge résistive conduisant à une déviation, donc si la charge augmente brutalement, nous voyons un déséquilibre soudain la

puissance délivrée par le PV comme le montre la figure III.4.

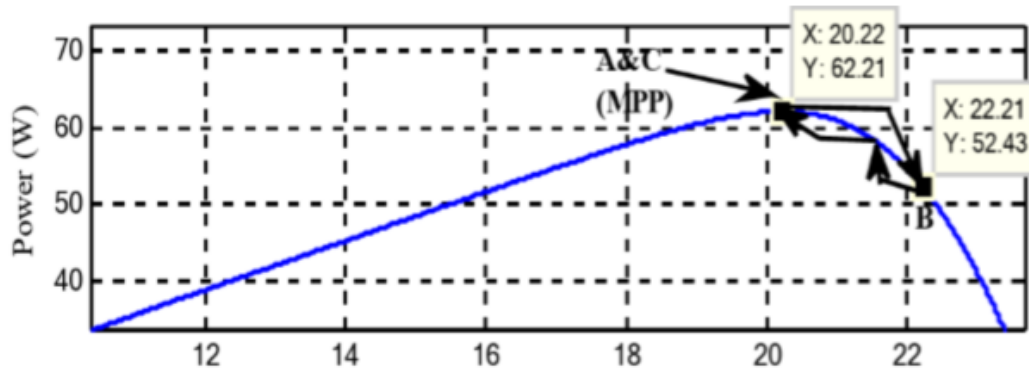


Figure III.4: Courbe PV lors d'une augmentation rapide de la charge résistive. [2]

Dans les conditions standards ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), la Figure III.4 illustre l'évolution de la forme d'onde lorsque la charge résistive subit une augmentation rapide. Ce changement brutal entraîne un déplacement du point de fonctionnement MPP de A vers B, tel qu'indiqué sur la figure. L'algorithme P&O parvient à identifier cette variation et tente de corriger la trajectoire du système en ajustant progressivement le rapport cyclique D vers sa valeur optimale.

Cependant, cette correction se fait par petits incréments, ce qui rend la recherche lente. Ainsi, le déplacement du point B vers le point C, correspondant au MPP, s'effectue avec retard. Ce délai introduit une période durant laquelle le système fonctionne loin du point de puissance maximale, engendrant ainsi des pertes d'énergie. Comme l'illustre la Figure III.4, au point B, l'algorithme détecte une diminution simultanée de la tension ($\Delta V < 0$) et de la puissance ($\Delta P < 0$), ce qui le pousse à réduire le rapport cyclique D par un petit pas. Cette stratégie de perturbation avec un pas réduit, bien qu'elle permette une précision fine, ralentit le retour au MPP et contribue directement au phénomène de perte énergétique observé.

III.4.2.2 Cas d'une diminution rapide de la charge

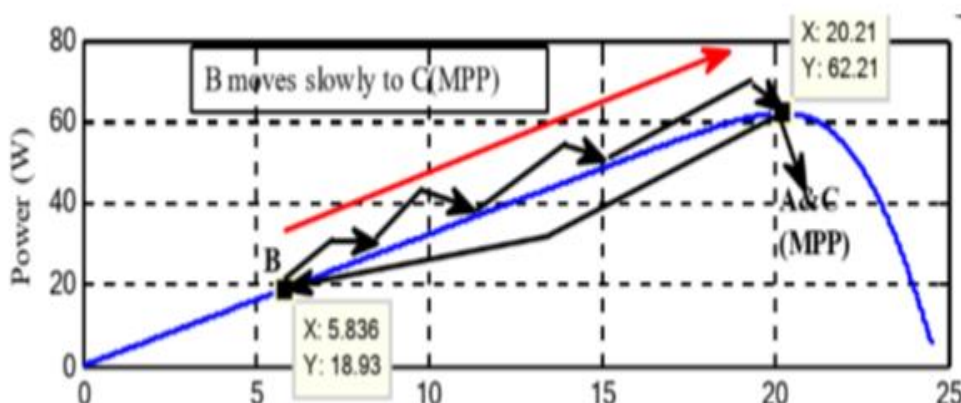


Figure III.5: Courbe PV lors d'une diminution rapide de la charge résistive. [2]

La figure III.5 illustre la réponse dynamique du système MPPT lorsque la résistance de charge diminue soudainement. Cette transition engendre un déplacement du point de fonctionnement initial (noté A ou C sur la courbe, au MPP) vers un point de puissance inférieure (noté B), caractérisé par une tension plus faible et une puissance réduite .

Ce changement brutal de la charge vers une résistance plus faible (donc une charge plus « lourde » pour la source) provoque une augmentation soudaine du courant. En conséquence, la tension chute, éloignant le système de son point de puissance maximale (MPP). L'algorithme P&O détecte cette variation négative de la tension et de la puissance ($\Delta V < 0$ et $\Delta P < 0$), et amorce une correction en augmentant progressivement le rapport cyclique D à l'aide de petits pas adaptatifs.

Cependant, comme le montre la trajectoire entre les points B et C, cette remontée vers le MPP est lente. La taille réduite des perturbations imposées par l'algorithme, bien qu'utile pour éviter les oscillations autour du MPP, entraîne un retard dans le retour au point optimal. Ce décalage temporel prolonge la période pendant laquelle le système fonctionne à un rendement réduit, ce qui se traduit par une perte significative d'énergie.

III.4.2.3 Résoudre le problème de déviation lors changement rapide de charge

Afin de résoudre le problème de déviation du point de fonctionnement rencontré dans la méthode classique P&O lors des variations rapides de la charge résistive (augmentation ou diminution brutale), nous avons introduit plusieurs améliorations dans l'algorithme.

Pour résoudre le problème de déviation du point de fonctionnement (déviation) provoqué par une variation rapide de la charge résistive, ici, les conditions environnementales sont supposées constantes ($\Delta G = 0$ et $\Delta T = 0$), ce qui permet d'isoler l'impact d'un changement de charge. Ainsi, lorsqu'une variation brutale de la résistance de charge est détectée, c'est-à-dire lorsque le taux de variation $|\Delta RL/\Delta t|$ dépasse un seuil prédéfini ε , l'algorithme adapte dynamiquement sa stratégie de perturbation.

Inspiré de la structure de décision illustrée dans l'organigramme, l'algorithme distingue les cas où $\Delta P \neq 0$. Si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), il évalue également le signe de la variation de la tension (ΔV). En fonction de cette double condition, on a introduit une perturbation adaptative (ΔD^L) plus grande que la perturbation classique (ΔD), ΔD^L est un pas fixé exprimé par l'équation (IV.2):

$$\Delta D^L = 0.02 \quad (\text{III.2})$$

Cette approche permet de compenser rapidement les décalages du point de fonctionnement engendrés par des sauts brusques de charge, tout en évitant les erreurs de suivi. En résumé, cette stratégie rend l'algorithme plus réactif face aux variations de charge non prévues, en assurant une meilleure suivi du MPP.

III.5. Organigramme de la commande P&O modifiée

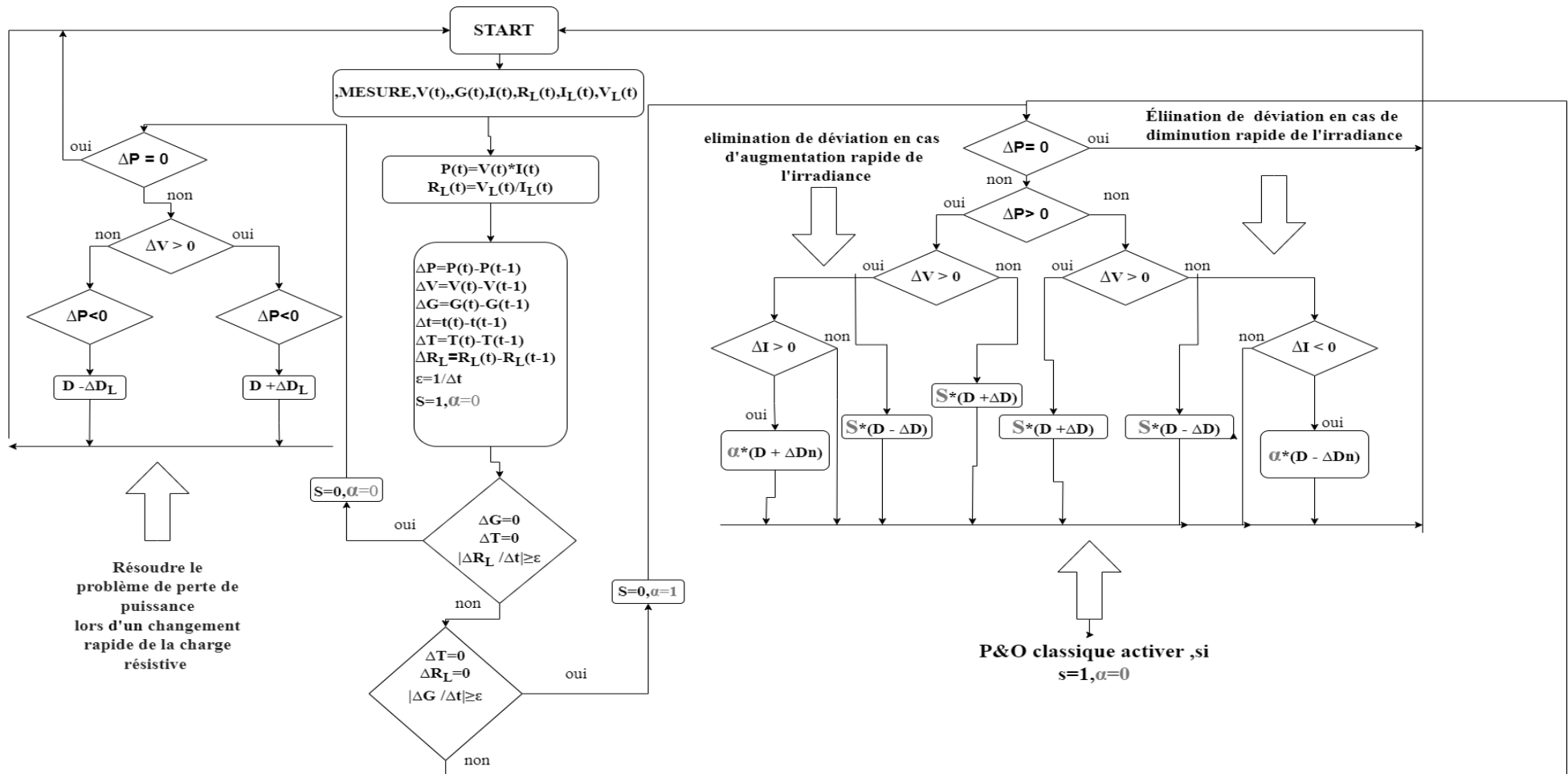


Figure III.6 : Organigramme de la commande P&O MPPT modifiée.

III.6. Bloc de la commande P&O modifiée sous MATLAB SIMULINK

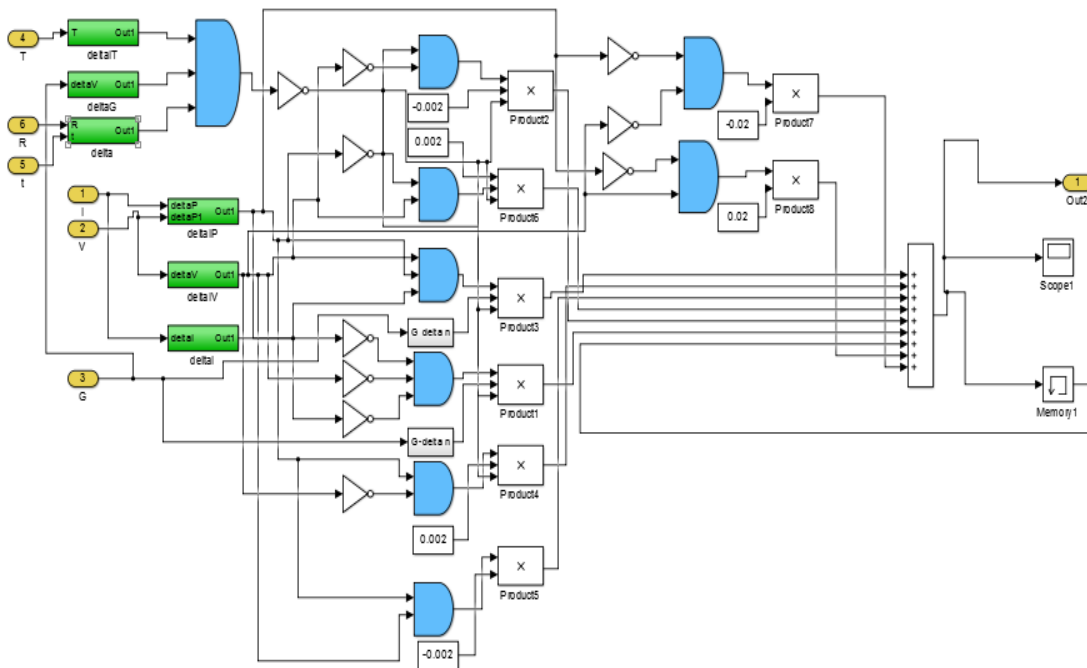


Figure III.7: Implémentation Simulink-Model d'un système photovoltaïque autonome.

III.7. Résultat de simulation

III.7.1. En cas de changement de l'irradiation solaire

L'algorithme MPPT proposé a été évalué en soumettant le niveau d'irradiance à une variation soudaine, passant de 300 à 500 W/m² en 1 seconde, puis de 500 à 300 W/m² en 2 secondes, comme le montre la Figure III.8. Les paramètres de perturbation sont fixés à un temps de perturbation (T) de 1 ms et à une taille de pas de perturbation (ΔD) de 2 ms.

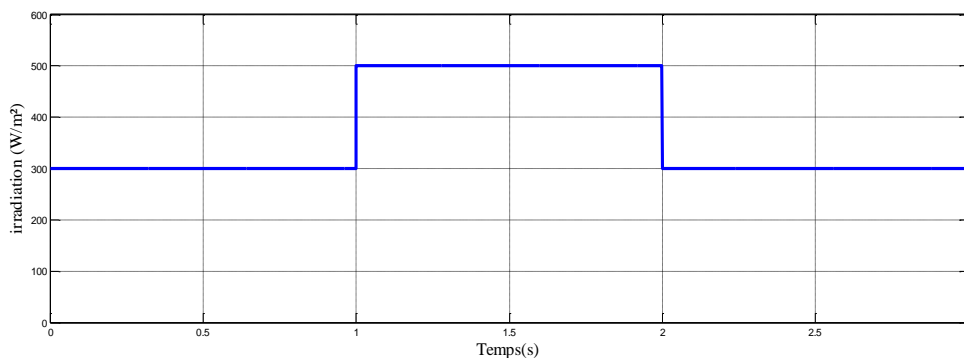


Figure III.8: Variation de l'irradiation solaire.

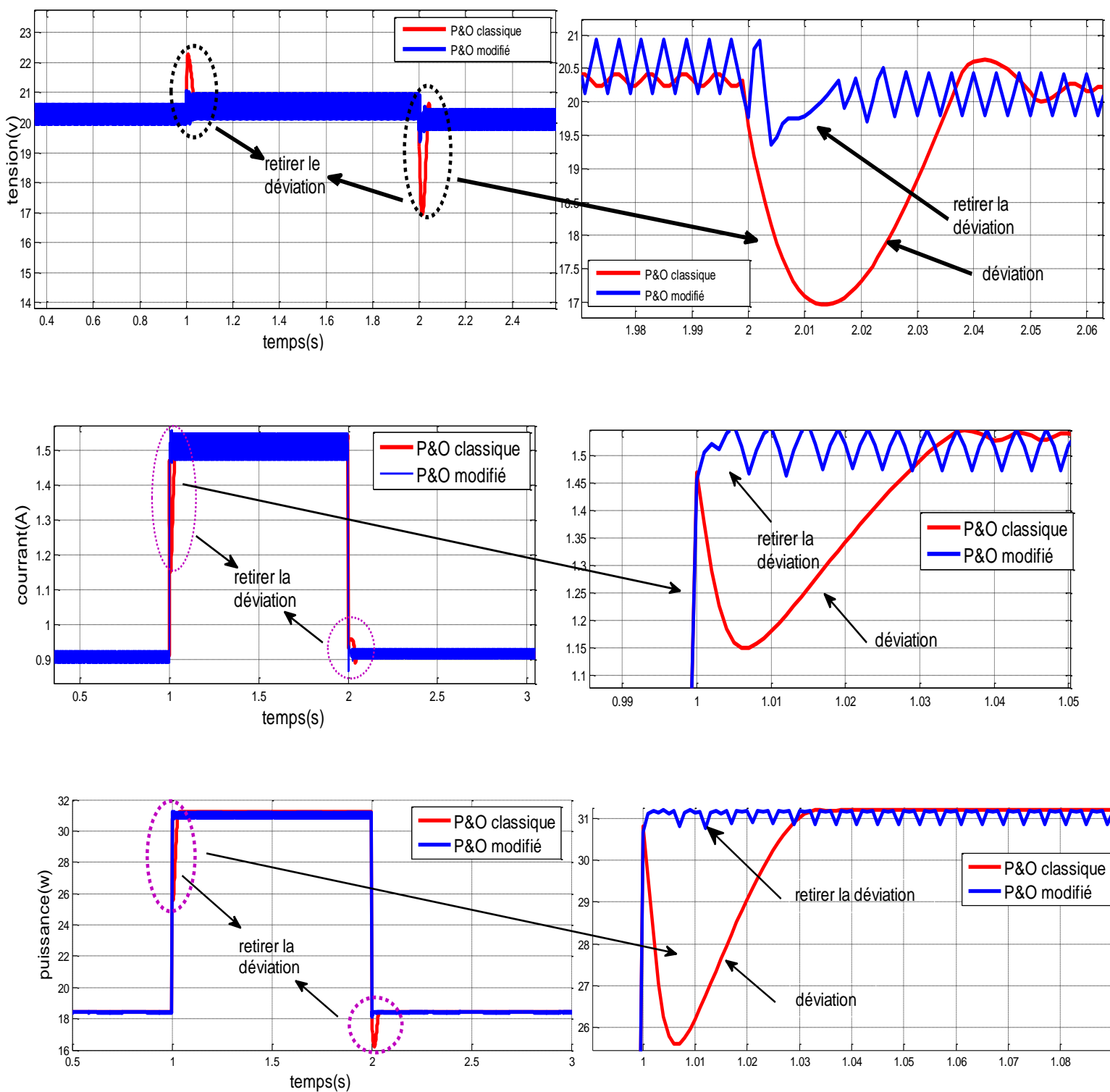


Figure III.9 : Comparaison entre P&O classique et P&O modifiée en cas de changement de l'irradiation solaire .

III.7.2. En cas de variation de la charge

L'algorithme MPPT proposé a été évalué en soumettant le niveau de la charge à une variation progressive, passant de 4 à 8 Ω en 2 seconde, puis de 8 à 4 Ω en 6 secondes, comme le montre la figure IV.10. Le pas de perturbation (ΔD) est choisi à 2 ms, respectivement.

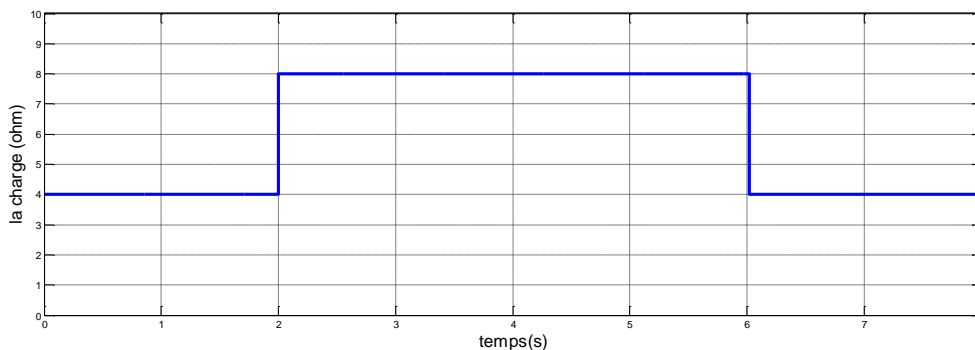
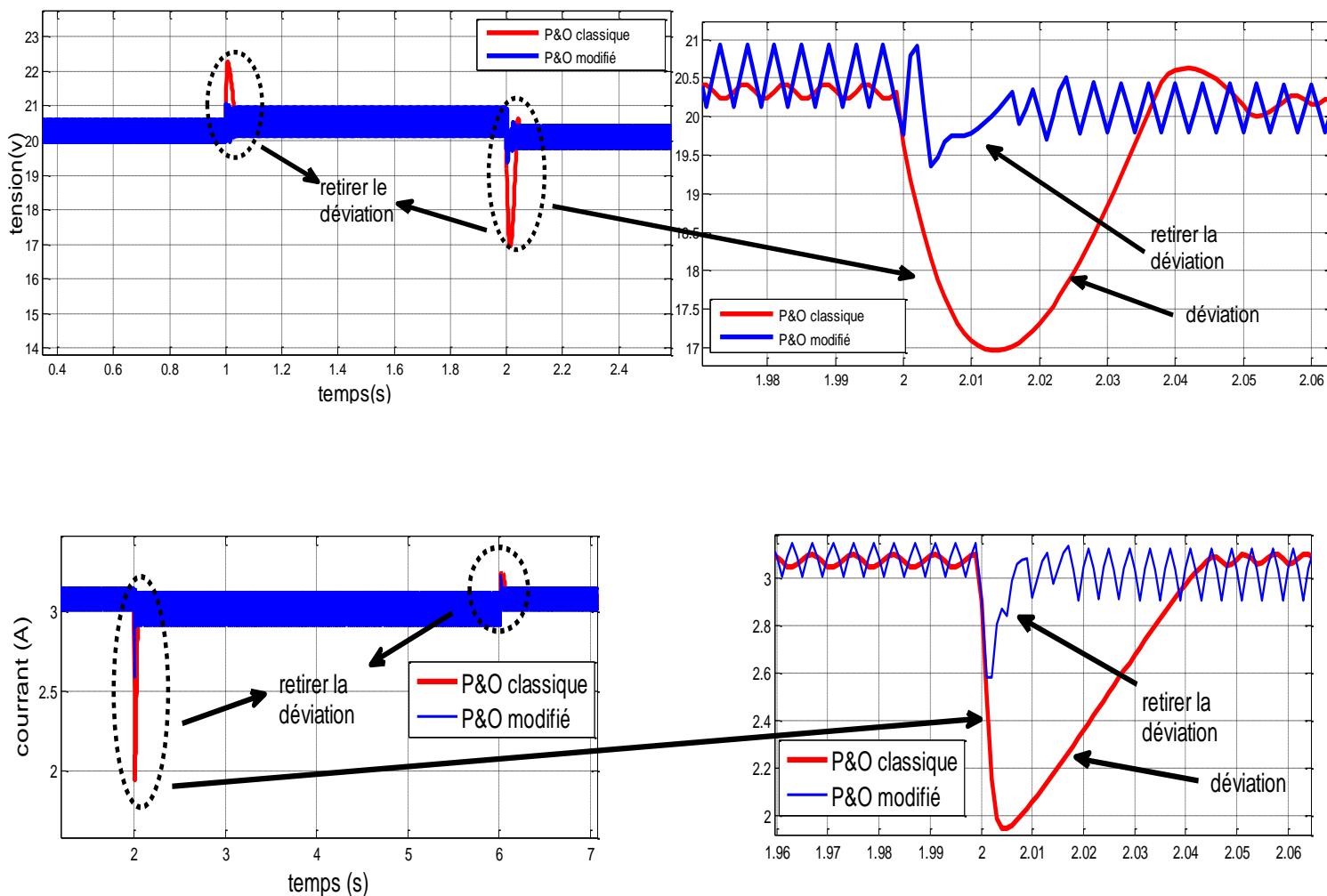


Figure III.10: Variation de la charge .



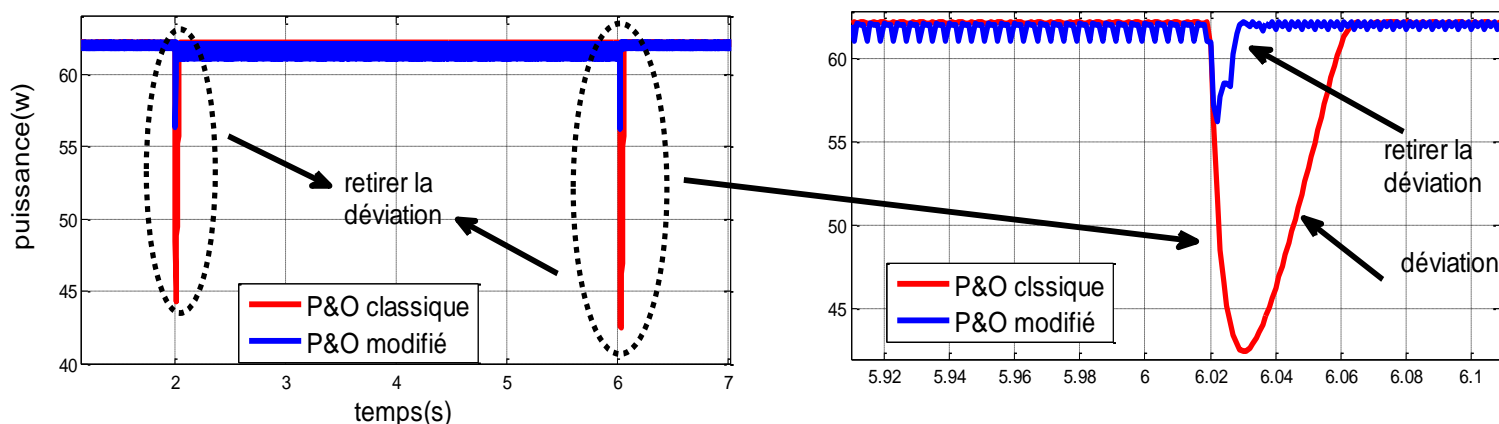


Figure III.11: Comparaison entre P&O classique et P&O modifiée en cas de changement de la charge .

III.7.3. Interprétation des résultats

III.7.3.1 variation de l'irradiance solaire

Les résultats présentés dans la figure Figure III.9 comparent le comportement de l'algorithme P&O classique et celui de la version modifiée lors de variations rapides de l'irradiation solaire. On observe que l'algorithme modifié parvient à éliminer efficacement les déviations du mode de recherche du point de puissance maximale (MPP) provoquées par les changements soudains d'ensoleillement. Contrairement à la méthode traditionnelle, qui engendre des oscillations et des pertes d'énergie lors de ces perturbations, la commande modifiée permet au système de réagir rapidement et d'émettre les commandes appropriées.

Grâce à cette amélioration, le panneau solaire maintient un fonctionnement optimal même en présence de variations brutales de l'irradiation, ce qui se traduit par une meilleure efficacité énergétique et une production accrue. L'algorithme modifié ajuste rapidement le rapport cyclique, ce qui réduit les pertes et maximise l'exploitation de l'énergie solaire disponible.

En résumé, l'algorithme P&O modifié a démontré sa capacité à surmonter les défis liés aux variations rapides des conditions climatiques, optimisant ainsi les performances des panneaux solaires et constituant une avancée notable dans le domaine de la gestion intelligente de l'énergie solaire.

III.7.3.2 variation de la charge

Les résultats illustrés dans la figure III.11 comparent les performances de l'algorithme P&O classique et de sa version modifiée lors d'un changement brusque de charge. On observe clairement que l'algorithme P&O classique (courbe rouge) réagit à cette variation par une importante déviation en mode recherche, entraînant des oscillations notables et une perte temporaire de puissance. Ces fluctuations traduisent une mauvaise adaptation du système aux nouvelles conditions de fonctionnement, ce qui nuit à

son rendement énergétique.

En revanche, l'algorithme P&O modifié (courbe bleue) parvient à éliminer rapidement ces déviations. Grâce à son mécanisme d'adaptation amélioré, il détecte efficacement le changement de charge et ajuste le point de fonctionnement sans engendrer de dérive significative. Ce comportement est clairement mis en évidence dans les zooms de la figure, où l'on voit que la version modifiée supprime les écarts de puissance dès le passage en mode recherche.

Ainsi, la méthode améliorée permet un suivi plus rapide et plus précis du point de puissance maximale (MPPT), assurant une meilleure stabilité et une exploitation optimale de l'énergie photovoltaïque.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude comparative entre la méthode P&O classique et la méthode P&O modifiée, en évaluant leur efficacité, leur rapidité et leur robustesse face à des variations rapides de l'irradiation solaire et de la charge. Les résultats des simulations ont montré que la méthode proposée assure un suivi efficace du point de puissance maximale et une convergence rapide lors de fluctuations rapides de l'irradiation et de la charge, surpassant ainsi la méthode P&O classique. De plus, les simulations indiquent que la méthode P&O modifiée est plus performante que la méthode classique en ce qui concerne l'élimination de la déviation dans la recherche du point de puissance maximale.

Conclusion générale

Conclusion générale

La conversion de l'énergie solaire par voie photovoltaïque constitue l'une des alternatives les plus prometteuses aux méthodes de production traditionnelles, en raison de sa grande souplesse et de sa capacité à fonctionner efficacement dans des environnements difficiles, comme l'ont démontré les premières missions spatiales. Pour exploiter au mieux le potentiel d'un générateur photovoltaïque, il est indispensable de maintenir son fonctionnement au point de puissance maximale (MPP), ce qui justifie l'usage des algorithmes de type MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Ces algorithmes visent à éliminer les déviations du point de fonctionnement provoquées, qui varie selon les conditions météorologiques (irradiation,) et les caractéristiques de la charge. Dans ce travail, nous avons d'abord utilisé la méthode classique "Perturber et Observer" (P&O), reconnue pour sa simplicité, son faible coût et son efficacité dans le suivi du MPP. Les résultats ont confirmé que cette technique permet un ajustement permanent entre la source photovoltaïque et la charge, garantissant ainsi un fonctionnement proche du MPP.

Pour renforcer le système face aux variations climatiques, nous avons ensuite proposé une version améliorée de l'algorithme P&O. Cette algorithme est capable non seulement de corriger les déviations dus à des changements brusques de l'irradiation solaire, mais aussi de réagir aux variations rapides de la charge résistive, souvent responsables de dérives et de pertes énergétiques transitoires.

Les résultats obtenus montrent que cette approche améliore de manière significative les performances globales du système de conversion photovoltaïque, en réduisant les pertes d'énergie et en accélérant la convergence vers le point de puissance maximale. Ces travaux ouvrent la voie à des recherches futures sur des algorithmes intelligents plus performants, capables de s'adapter en temps réel à des environnements et des charges électriques complexes.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] N.Drir, L.Barazane et M.Loudini, ‘‘Fuzzy Logic For Tracking Maximum Power Point of Photovoltaic Generator ‘’, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°1 (2013) 1 – 9.
- [2] : Belhadj Djilali, A., Bounadja, E., Yahdou, A., Benbouhenni, H., Elbarbary, Z. M. S., Colak, I., & Al-Gahtani, S. F. (2020). Enhanced variable step sizes perturb and observe MPPT control to reduce energy loss in photovoltaic systems. Scientific Reports.
- [3] : C. Bernard « station solaire autonome pour l’alimentation station pompage » l’archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006].
- [4] : A. Hammidat Hadj arab et M.T BOUKADOUM « performance et cout des systèmes de pompage PV en ALGERIE » (2005).
- [5]: K.Sobaihi, « Etude et réalisation d’un hacheur de tracking de MPP à contre réaction de tension », thèse magistère, ENP, 2008)
- [6]: <https://www.comesur.es/promociones>
- [7]:<https://viridiselec.com/installation-photovoltaque-rentable/fonctionnement-photovoltaique/>
- [8]:Service info Environnement, « Les systèmes photovoltaïques (ER5) », Bruxelles Environnement, Avril 2008.
- [9]: Philippe Guibert : «TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement.
- [10]: Philippe Guibert : «TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement
- [11]: M .BELHADJ ; Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome Mémoire de Magister ; Centre Universitaire De Bechar ; 2008.
- [12]: M. BENGHANEM. Etude de la performance des systèmes photovoltaïque autonomes Travaillant à poste fixe. Thèse de Doctorat, U.S.T.H.B, avril 1999.
- [13]: B. EQUER. Energie solaire photovoltaïque. Volume I – Physique et technologie de la conversion photovoltaïque. CNRS. Edition ellipses, 1993.
- [14]: M. BURESCH. Photovoltaic energy systems. McGraw-Hill U.S.A, 1983.
- [15]: F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing

Ltd.1980.ISBN 0-85274-311-4

[16]: B. EQUER. Energie solaire photovoltaïque. Volume I – Physique et technologie de la conversion photovoltaïque. CNRS. Edition ellipses, 1993.

[17]: E. BUCHET. Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide à la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire, Thèse de Doctorat, Faculté de Science et Technique de Saint-Jérôme, d'Aix Marseille, juillet 1988.

[18]: A. HADJ ARAB. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance, Thèse de magister, H.C.R, décembre 1989.

[19]: www.solarelectripower.org.

[20]: F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4

[21]: F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004necté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille

[22]: GOAR Nouredine, MAHMOUDI Abdelkader, " Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque ", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, Juin 2017. [

[23]: GUEDAOURIA H., " Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ", Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.

[24] :Bacha Marouane et Derradji Belloum Anes « Étude et réalisation des convertisseurs DCDC de type Boost et Buck», Mémoire de Master, Université de Biskra, 2022

[25] :M. Biswal, Master of Technology (Research), —control techniques for dc-dc buck converter with improved performancel, National Institute of Technology , Rourkela, March 2011.

[26] : Mohamed B. Debbat, Rochdi Bachir-Bouiadjra, Hafid A. Bouziane, Sliding mode control of two-level Boost DC-DC converter, 4th International Conference on Electrical Engineering IGEE, Boumerdes, December 13th -15th, 2015.

- [27] :Marcelo GRADELLA VILLALVA , Jonas Rafael GAZOLI , ERNEXTO RUOOERT FILHO : Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLABSIMULINK
- [28] :BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.
- [29] :http://www.electrosup.com/convertisseur_boost.php
- [30] <http://energie28.blogspot.com/2016/11/definition-et-explications-sur-le-mppt.html?m=0>
- [31] Chan, D. S., & Phang, J. C. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and double-diode model parameters from IV characteristics. *IEEE Transactions on Electron devices*, 34(2), 286-293.
- [32]] Araujo, G. L., & Sanchez, E. (1982). A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(10), 1511-1513
- [33]] B.Selsabil, Ch Soulef, " Synthèse d'une loi de commande du MPPT pour un système de conversion à un seul étage", Mémoire de Master, Université Tlemcen, 2022.
- [34] Mr.CHERKI MOHAMED, Mr.LABRAOUI MOHAMED,2013,Memoire Etude et comparaison des algorithmes MPPT dans les systèmes photovoltaïques
- [35] Amrani Mohamed Nader: «Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré». Thèse de doctorat l'université LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI 2017
- [36] Cabal, C. (2008). Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III)
- [37] CABAL Cédric, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque», thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [38] Sujatha, M. S., Lakshmi, B., Kumar, N. M. G., & Girish, N. (2020). MPPT Using P&O and IC Based PI Controller for Solar PV System with Charge Controller. *Helix-The Scientific Explorer| Peer Reviewed Bimonthly International Journal*, 10(02), 184-194.
- [39] GUEYE, S. (2014). Conception d'un régulateur solaire avec commande MPPT. *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, 1(2), 104-108.
- [40] Moussi, A., & Saadi, A. (2002). Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque. *LARHYSS Journal*, 158.
- [41] T. Esmar and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449,

2007.

[42] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.

[43] BELKACEMI Asma , DOUINA Imene "Application d'une commande MPPT modifiée pour éviter la dérivée du point de puissance maximale dans le system Photovoltaïque" mémoire de master, université HASSIBA BEN BOUALI - CHLEF 2023

[44] ESRAM, T., & CHAPMAN, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion,

[45] FEMIA, N., PETRONE, G., SPAGNUOLO, G., & VITELLI, M. (2005). Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transactions on Power Electronics,

[46] CHEN, Y., LIU, J., & WANG, C. (2019). A Drift-Free P&O Algorithm for Photovoltaic MPPT Applications. Energie.

Annexe I:

Photovoltaic parameters	
Parameter	Value
I_{SC} (Short circuit current at standard conditions)	3.25 A
R_s (Series-Resistance)	0.015 Ohm
A (Diode ideality factor)	1.2
I_0 (saturation current)	8.225×10^{-12} A
q (Electron charge)	1.6×10^{-19} C
K (Boltzmann constant)	1.38×10^{-23} J/K
T_{SC} (Temperature at standard conditions)	25 °C
V_{OC} (Open-Circuit Voltage)	24.8 V
R_{sh} (Parallel-Resistance)	30 Ohm
G (Solar irradiation at standard Conditions)	1000 W/m ²
N_s (Number of solar cells in series)/panel	36
N_p (Number of solar cells in parallel)/panel	1

Tableau : Parameters de simulation.