REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique et systèmes

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master

Commande Prédictive D'un Système Photovoltaïque

Préparé et présenté par :

-YAGOUB Nabil

-SALHI Fatima

Proposé et dirigé par :

Mr.KHERKHARE Abdelkarim

PROMOTION 2019

Remerciement

Nous remercions en premier lieu Dieu qui nous avons donnés ce bien là et pour que nous venons ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Monsieur KHERKHARE Abdelkarim qui a proposé et a dirigé ce travail.

Nous remercions monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département du génie électrique de Médéa pour les facilités qu'ils n'ont accordés pour terminer ce travail.

Le travail de mémoire que nous avons effectué doit beaucoup à certaines personnes que nous tenons à les remercier sincèrement. Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail

Dédicaces

Je dédie cette thèse

LA MEMOIRE DE MON GRAND-PERE
ET MA GRANDE MERE
J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde

A Mes chers parents.

A ma femme et mon fils

A mes frères et Mes sœurs

A toute ma famille

Et à tous mes amis.

À Tous ceux qui me sont chers.

Dédicaces

Je dédie cette thèse

A Mes chers parents.

A mes frères et Mes sœurs

A toute ma famille

Et à tous mes amis.

À Tous ceux qui me sont chers.

SOMMAIRE

Introduction générale 1

CHAPITRE I : MODELISATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

I.1 Introduction 3
I.2 L'énergie renouvelable 3
I.3 Historique du solaire photovoltaïque : 3
I.4 Principe de la conversion photovoltaïque 4
I.5 La cellule photovoltaïque : 4
I.6 Structure des panneaux photovoltaïques 4
I.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : 5
I.7.1 Les paramètres de simulation 7
I.7.2 Le schéma en Simulink: 7
I.7.3 Résultats de simulation : 8
I.8 Discussion des résultats : 10
I.8.1 Influence de température : 10
I.8.2 Influence de l'éclairement 10
I.8.3 Effet d'association des module P-V en parallèle et en série : 11
I.8.4 Influence de variation la résistance en série et nombre de cellule dans le module 13
I.9 La commande prédictive : 14
I.9.1 Principes de la commande prédictive : 14
I.9.2 Eléments d'une commande prédictive : 15
I.9.3 Les différents types d'algorithmes prédictifs : 16
I.9.3.1Cas linéaire : 16
I.10 Conclusion : 20

CHAPITRE II CONVERTISSEURS DE PUISSANCE AVEC LE SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

II.1. Introduction : 21
II.2. Types Convertisseurs DC-DC ou hacheurs : 21
II.2.1. Hacheur Buck (série/abaisseur) : 21
II.2.2. Convertisseurs Boost (élévateur) : 22
II.2.3. Hacheur buck-boost (abaisseur-élévateur) : 24
II.3. Poursuite Du Point De Puissance Maximal (MPPT) 25

II.3.1. Méthode de Perturbation et d'Observation (P&O) : 25
II.4. Implémentation sous Simulink du système complet : 27
II.4.1. Principe du MLI (PWM) [13] 28
II.4.2. Simulation le système PV avec les convertisseurs buck et boost : 29
II.4.2.1.le système PV avec convertisseur boost : 29
II.4.2.2.Résultats de simulation : 30
II.4.2.3.Cas température et éclairement fixe : 31
II.4.2.4.de changement d'éclairement : 33
II.4.2.5.Discutions des résultats de la simulation : 35
II.4.3. Simulation du système PV avec MPPT (P&O) utilisant convertisseur buck : 35
II.4.3.1.Résultats de simulation : 36
II.5. Conclusion : 40

CHAPITRE III COMMANDE PREDICTIVE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

III.1 Introduction 41
III.2 Modèle prédictif de convertisseur Boost standard à deux niveau : 41
III.3 Stratégie de contrôle des BTP 44
III.3.1 Contrôle prédictif du modèle 44
III.4 3.3. Simulation et résultats : 45
III.5 Conclusion : 51

Conclusion générale: 52

LISTES DES FIGURES

CHAPITRE I MODELISATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Figure I- 1-champ photovoltaïque composé de Nst strings en parallèle 5
Figure I- 2-Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque réelle. 6
Figure I- 3-Modèle de simulation d'un module constitué de 36 cellules connectées en série 7
Figure I- 4-Caractéristique I(V) d'un module pour différentes température 8
Figure I- 5-Caractéristique P(V) d'un module pour différentes température 8
Figure I- 6-Caractéristique I(V) d'un module pour différentes éclairement solaires 9
Figure I- 7-Caractéristique P(V) d'un module pour différentes éclairement solaires 9
Figure I- 8-Regroupement des modules en parallèle 11
Figure I- 9-Regroupement des modules en série 11
Figure I- 10-Regroupement des modules en parallèle 12
Figure I- 11-Regroupement des modules en série 12
Figure I- 12-influence de la résistance série 13
Figure I- 13-Influence des groupements des cellules Ns 13
Figure I- 14-Philosophie de la commande prédictive. [36] 14
Figure I- 15-Schéma de principe de la commande prédictive. [38] 15
Figure I- 16-Stratégie de commande prédictive. [37] 16
Figure I- 17-La méthodologie du MPC. [35] 17
Figure I- 18-Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC [35] 18

CHAPITRE II CONVERTISSEURS DE PUISSANCE
AVEC LE SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Figure-II- 1-Schéma électrique du hacheur buck 22
Figure-II- 2-Schéma électrique du convertisseur Boost proposé 23
Figure-II- 3-1Schéma électrique du hacheur buck-boost 24
Figure-II- 4-1Caractéristique P(V) d'un panneau solaire 25
Figure-II- 5-Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O) 27
Figure-II- 6-Modèle SIMULINK pour l'algorithme MPPT (P&O). 28
Figure-II- 7-Principe du MLI (DC/DC). 28
Figure-II- 8-Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM 29
Figure-II- 9-les impulsion de commande et référence (PWM) 29
Figure-II- 10-Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type BOOST 30
Figure-II- 11-Puissance généré par le panneau PV 30

Figure-II- 12-Puissance de sortie de convertisseur boost 31
Figure-II- 13-Tension générée par le panneau PV 32
Figure-II- 14-Tension de la sortie de convertisseur boost 32
Figure-II- 15-Variation de l'irradiation (W/m2). 33
Figure-II- 16-Effet de changement d'éclairement sur la tension générée par le panneau PV (V) 33
Figure-II- 17-Effet de changement d'éclairement sur la puissance générée par le panneau PV(W) ... 34
Figure-II- 18-Effet de changement d'éclairement sur la tension de la sortie du convertisseur Boost ... 34
Figure-II- 19-Effet de changement d'éclairement sur la puissance de la sortie du convertisseur boost 35
Figure-II- 20-Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type buck 36
Figure-II- 21-Tension générée par le panneau PV 36
Figure-II- 22-tension de la sortie du convertisseur buck 37
Figure-II- 23-Tension à la borne de la diode 37
Figure-II- 24-Tension générée par le panneau PV(V) 38
Figure-II- 25-Puissance de la sortie du convertisseur buck (W) 38

CHAPITRE III LA COMMANDE PREDICTIVE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Figure III- 1-Topologie du convertisseur TLB 41
Figure III- 2-Le circuit équivalent pour S1=S2=1 42
Figure III- 3-Le circuit équivalent pour S1=1et S2=0 42
Figure III- 4-Le circuit équivalent pour S1=0et S2=1 42
Figure III- 5-Le circuit équivalent pour S1=S2=0 42
Figure III- 6-la Boucle de régulation pour MPC 44
Figure III- 7-modèle TLB 47
Figure III- 8-Puissance de sortie du générateur photovoltaïque 48
Figure III- 9-Balance de tension de condensateur 48
Figure III- 10-Tension du bus DC 49
Figure III- 11-Courant photovoltaïque 49
Figure III- 12-Tension du générateur photovoltaïque 50

ملخص:

توفر الأنظمة الكهروضوئية(PV) مصدرًا نظيفًا لتوليد الكهرباء ، وهو أمر مكلف اليوم. نظرًا للتغير والسلوك العشوائي لمورد الطاقة الشمسية ، فإن تتبع أقصى نقطة للاستطاعة (أقصى نقطة تتبع للاستطاعة (MPPT)) للأنظمة الكهروضوئية مطلوب لضمان التشغيل المستمر عند أقصى نقطة لتوليد الطاقة الكهربائية. يعرض هذه العمل استخدام وحدة تحكم تنبؤية (MPC) تدرس قيود التشغيل الآمن من أجل زيادة خروج الطاقة من نظام لوحة الضوئية وتناقش تحليل ومحاكاة النظام المقترح. تظهر نتائج المحاكاة أن وحدة التحكم المصممة يمكنها تتبع أقصى نقطة قوة تتبع بسرعة ودقة وفعالية.

كلمات مفتاحية: أنظمة كهروضوئية (PV)،وحدة تحكم تنبؤية (MPC) , أقصى نقطة تتبع للاستطاعة (MPPT).

Résumé :

Les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une source propre pour la production d'électricité, qui est cependant coûteuse aujourd'hui. En raison du comportement variable et stochastique de la ressource d'énergie solaire, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) des systèmes photovoltaïques est nécessaire pour assurer un fonctionnement continu au point de puissance maximum afin de produire le maximum d'énergie électrique. Ce travail présente l'utilisation d'un contrôleur prédictif (MPC) prenant en compte les contraintes pour un fonctionnement sûr afin de maximiser la puissance de sortie d'un système PV. L'analyse et la simulation du système proposé sont examinées en détail dans le présent document. Les résultats de la simulation montrent que le contrôleur conçu peut suivre le point de puissance maximale rapidement, précisément et efficacement.

Mots-clés : Système Photovoltaïque(PV), Commande Prédictive(MPC), Poursuite Du Point De Puissance Maximal (MPPT),

Abstract:

Photovoltaic (PV) systems offers clean source for the generation of electricity, which is however costly today. Due to the variable and stochastic behavior of the solar energy resource, Maximum Power Point Tracking (MPPT) of photovoltaic systems is required to ensure continuous operation at the maximum power point to generate the most electrical energy. This job presents the use of a model predictive controller (MPC) considering constraints for safe operation in order to maximize the power output from a PV system. Analysis and simulation of the proposed system is discussed in details through the paper. The simulation results show that the designed controller can track Maximum Power Point quickly, accurately and effectively.

Key words: Photovoltaic System (PV), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Model command Predictive (MPC).

Introduction générale

L'énergie est une composante vitale du développement économique et de la croissance humaine. Avec l'augmentation de la population, la demande énergétique des personnes augmente également. Les réserves en énergie fossile s'épuisent et ne pourront plus répondre aux besoins du développement social. De plus, l'utilisation intensive de combustibles fossiles a endommagé notre environnement de vie. En conséquence, le monde a tourné son attention vers les sources d'énergie renouvelables. Parmi ceux-ci, l'énergie solaire a attiré l'attention des gens car elle a une énergie de haute qualité, est sûre et fiable et n'entraîne pas d'émissions polluantes. De plus, l'énergie solaire peut être trouvée presque partout, et ne se limite pas à des zones géographiques spécifiques. En raison de leurs coûts décroissants et de leurs configurations flexibles, les systèmes photovoltaïques deviendront sans aucun doute une technologie d'énergie verte prometteuse pour parvenir à un développement durable.

Les systèmes photovoltaïques transforment directement la lumière du soleil en électricité, peuvent ainsi alimenter de petits équipements portables (montres, calculatrices, …), des applications en site isolé (habitations éloignées du réseau électrique, équipements de télécommunication, électrification rurale), ou être raccordées au réseau électrique.

Le comportement des systèmes photovoltaïques étant non linéaire, un fonctionnement optimisé de ces systèmes dans des conditions de température et d'irradiance variables est d'une importance vitale. Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, il est nécessaire d'améliorer leurs algorithmes de suivi de la puissance maximale (MPPT). De nombreuses méthodes ont été proposées pour MPPT, telles que la méthode de suivi de tension constante (CVT) [16], la méthode de conductance incrémentielle (INC) [17] - [19] et la méthode de perturbation et d'observation (P & O) [20] - [17]. La méthode P & O est relativement simple et a une bonne approche de suivi. Dans ce travail , une méthode MPC (Model Predictive Control) combinée à P & O a été proposée, dans laquelle la stratégie de contrôle MPPT suit le point de puissance maximale en modifiant la référence du courant d'inductance dans le convertisseur TLB (Three-Level)., commençant par la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, étudier son fonctionnement et la présentation des méthodes commandes les plus utilisé permettent d'extraire de ce système le maximum de sa puissance, appelé méthodes de recherche du point de puissance maximal (MPPT).

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, qui résume notre étude, le présent travail est subdivisé en trois chapitres organisés comme suit :

Au **premier chapitre**, nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 46 cellules connectées en série) dans les conditions standard (G=1000 W/m² T=25°C). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi que l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Dans le **deuxième chapitre** nous avons repris le modèle établi au chapitre précédent du système photovoltaïque, que nous lui avons appliqué la technique MPPT pour un meilleur rendement du système utilisant différents éléments de l'hacheur (boost et buck), puis nous allons intéresser à l'application de l'algorithme de perturbe and observe.

Dans le **troisième chapitre**, nous proposons une stratégie de contrôle à trois niveaux de suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un convertisseur Convertisseur boost à trois niveaux (TLB) pour un système photovoltaïque (PV) à deux étages basé sur un contrôle prédictif de modèle (MPC).

I.1 Introduction

La demande croissante en énergie et l'appauvrissement des énergies fossiles impliquent de trouver de nouvelles sources d'énergie propres et durables .Les énergies renouvelables notamment d'origine solaire et éolienne pourraient répondre à cette attente. Des systèmes permettant la conversion de l'énergie solaire ou éolienne en énergie électrique utilisable prennent une part de plus en plus grande même si elle reste mineure par rapport à l'électricité produite par les centrales thermiques et nucléaires. Les systèmes de conversion sont divers, ils peuvent être reliés au réseau, ou bien alimenter un dispositif sur un site isolé. Les sources d'énergies renouvelables ont l'avantage d'être gratuites et inépuisables mais présentent une intermittence qu'il est nécessaire de pallier avec un dispositif de stockage de l'énergie électrique, qui doit également être adapté à la restitution de l'énergie électrique à travers la charge utilisée [1].

I.2 L'énergie renouvelable

Selon la définition, les Energies Renouvelables (ENR) correspondent aux énergies exploitées par l'homme, de telle sorte que les réserves ne s'épuisent pas, et que leur vitesse de formation soit plus grande que la vitesse d'utilisation. Parmi les plus classiques, on peut lister :

- L'énergie solaire,
- L'énergie photovoltaïque,
- L'énergie éolienne,
- L'énergie hydraulique,
- la biomasse,
- la géothermie [2].

I.3 Historique du solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839 : il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. *Albert Einstein* expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5% [3]. Les Trois chercheurs américains, *Chapin, Pearson* et *Prince,* mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites[4]

I.4 Principe de la conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque, aujourd'hui largement utilisée, peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique [5].

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique (incluant la chauffe du matériau par les rayons solaires), récupérer toute ou une partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules ou de générateurs. Cela est possible grâce par exemple à des cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P [6].

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraine une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque [6].

I.5 La cellule photovoltaïque :

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte deux couches Sublimes d'un semi-conducteur. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. [6].

Les matériaux photovoltaïques se scindent en deux grandes familles, les matériaux solides cristallisés et les couches sublimes. Ces couches sublimes sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible (de l'ordre du micron et en deçà) et déposées sur un support, alors que les photopiles cristallines sont massives et épaisses de *0.15 - 0.4 mm* les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de *0,6 V*). Il existe deux grands types de silicium qui sont le silicium cristallin et le silicium amorphe. [6].

I.6 Structure des panneaux photovoltaïques

Généralement les cellules photovoltaïques sont associées pour constituer un panneau. Ces derniers sont regroupés en série ou bien en parallèle selon la puissance demandée pour protéger les modules

PV contre le point chaud (hot-spot) à cause d'un déséquilibre d'éclairement il faut monter une diode au silicium "diode de by-pass" en parallèle tête-bêche (Figure II.1) sur une branche en général de dix-huit cellules en série, cette diode sera conductrice dans le cas de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche et bloquée dans le cas normal. [6].

On dénomme sous module ou bien branche l'ensemble de cellules en séries connectées en parallèle avec une diode de protection. Le module est constitué d'un groupe de sous modules connectés en série pour avoir une tension plus ou moins élevée [6].

Suivant la puissance du panneau, le string est constitué de plusieurs modules connectés généralement en série. Ces strings sont connectés en parallèle pour former un champ photovoltaïque. Pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres strings connectés en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes en série (diode anti retour) [6].

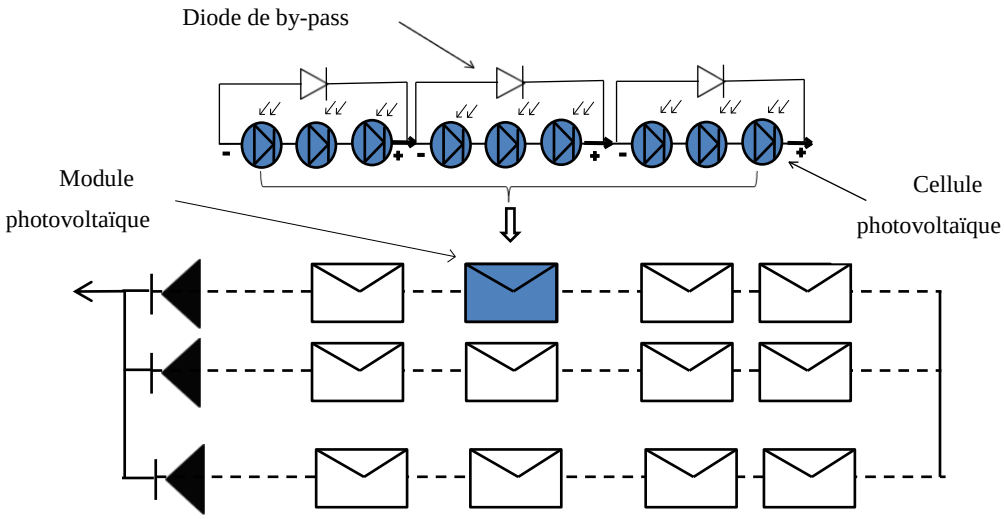


Figure I- 1-champ photovoltaïque composé de Nst strings en parallèle

I.7 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Lorsque la jonction est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur, en produisant un courant de court-circuit proportionnel à l'.éclairement Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} + I_D - I_{shu} \quad \text{(I .1)}$$

$$I_{ph} = [I_{cc} - K_I\,(T - 298)] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad \text{(I .2)}$$

$$I_{sat} = I_{rs}\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \times \exp\left[\frac{\left(q\,.\,E_g - (1/T_{ref} - 1/T)\right)}{n.K}\right] \quad \text{(I .3)}$$

$$I_{rs} = I_{cc} / \left(\left(\exp \frac{q . V_{voc}}{n.N_s.K.T} \right) - 1 \right) \quad \text{(I .4)}$$

$$I_{shu} = \frac{V_{PV} + (I_{PV} . R_{ser})}{R_{shu}} \quad \text{(I .5)}$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} . R_{ser})}{n . V_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} . R_{ser})}{R_{shu}} \right) \quad \text{(I .6)}$$

$$I_{PV} = I_{ph} . N_{pp} - I_{sat} . N_{pp} \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + \left(I_{PV} . R_{ser} . \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) \right)}{n.V_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{PV} + \left(I_{PV} . R_{ser} . \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) \right)}{R_{shu} . \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \right) \quad \text{[7] (I .7)}$$

Avec :

- $V_T = N_s$.q.T. K. représentant le potentiel thermodynamique,
- I_{sat} : Le courant de saturation (A)
- I_{rs} : Le courant inverse de saturation de la diode
- K : La constante de Boltzman (1,38110-23 J/K),
- T : La température effective des cellules (OK),
- q : 1, 6.10−19 C : Charge de l'électron (C)
- n : Le facteur de non idéalité de la jonction
- E/E_G : l'éclairement réels et à la condition de référence (W/m2)
- I_{PV} : Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur (A),
- V_{PV} : La tension aux bornes de cette même cellule (V),
- I_{ph} : le photocourant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température
- I_{cc} : courant de court-circuit) (A),
- R_{shu}La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction (n),
- R_{ser}la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions (n).
- N_s, N_{ss}, N_{pp} : nombre de cellules connecté en série, nombre de modules connectés en série et parallèle

Le modèle électrique correspondant à l'équation (I.6) est décrit ci -dessous [7].

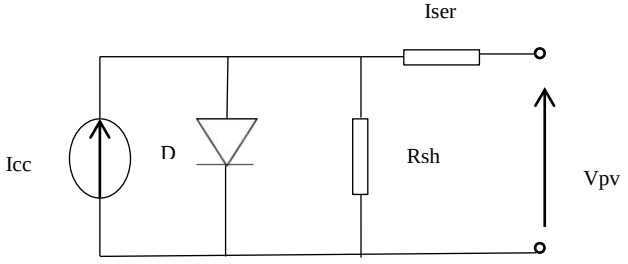


Figure I- 2-Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque réelle.

I.7.1 Les paramètres de simulation

q=1.6e-19	*Voc=32.9*
K=1.38e-23	*Tn=298*
Ki=.0032	*Isc=8.21*
Rsh=415.405	*Eg0=1.1*
Rs=.221	*Ns=36*
n=1.3	*Nss=1 , Npp=1*

I.7.2 Le schéma en Simulink:

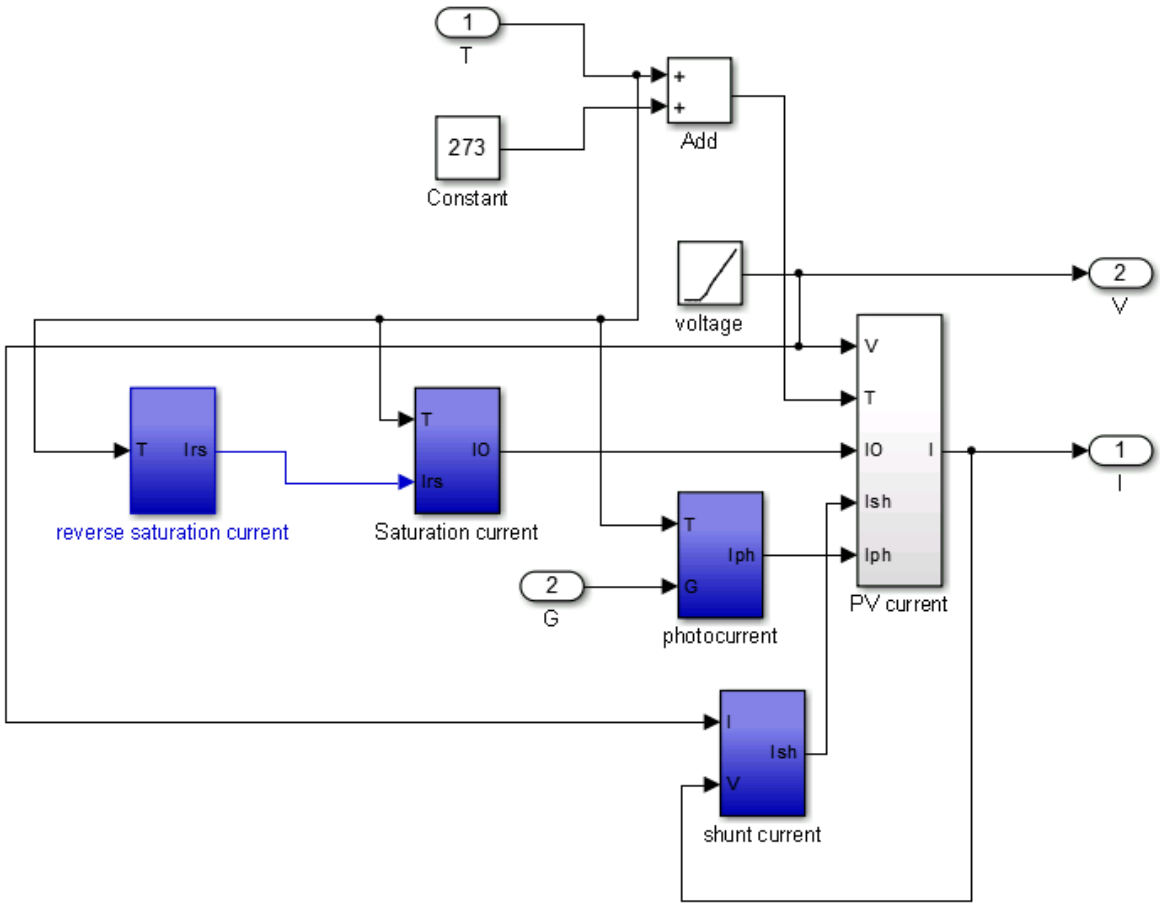


Figure I- 3-Modèle de simulation d'un module constitué de 36 cellules connectées en série

I.7.3 Résultats de simulation :

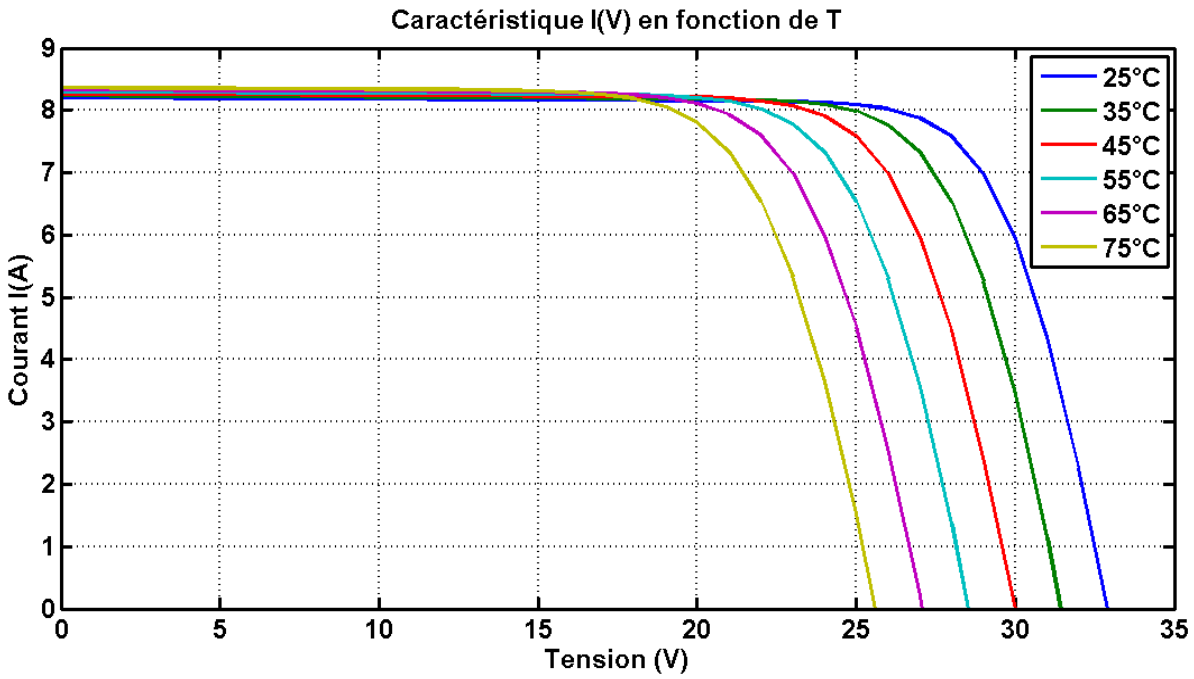


Figure I- 4-Caractéristique I(V) d'un module pour différentes température

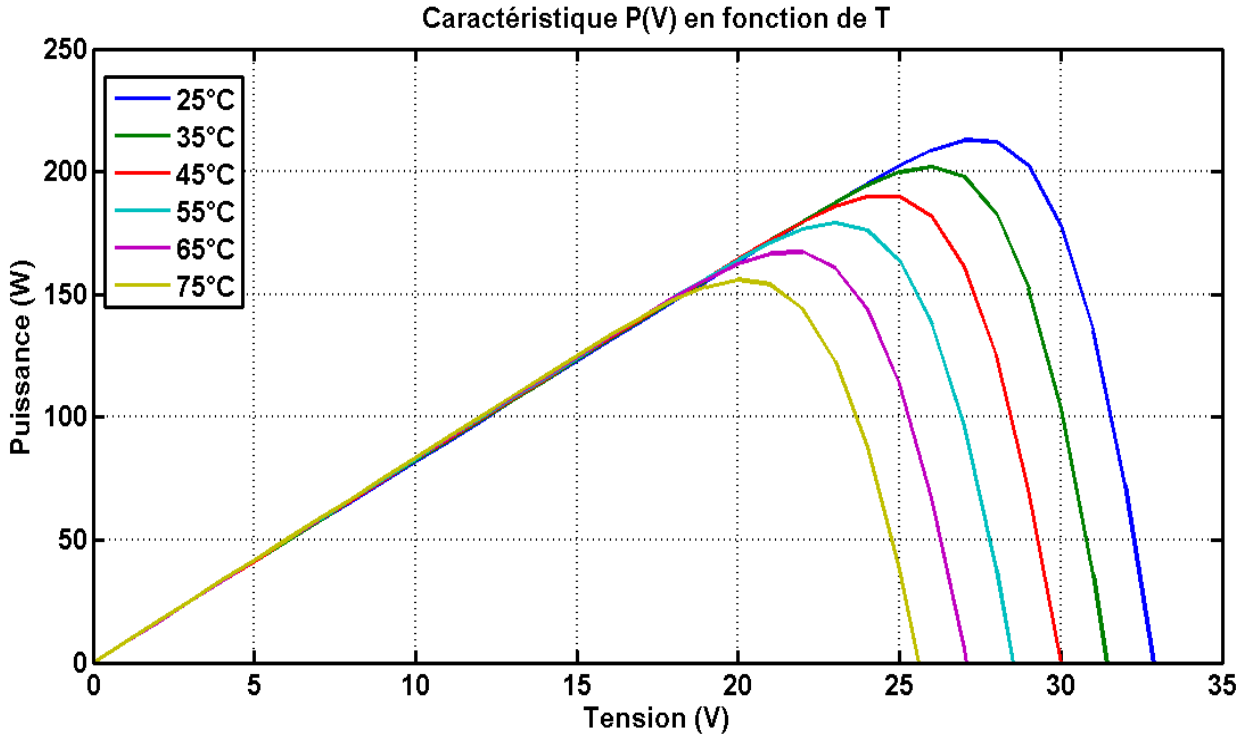


Figure I- 5-Caractéristique P(V) d'un module pour différentes température

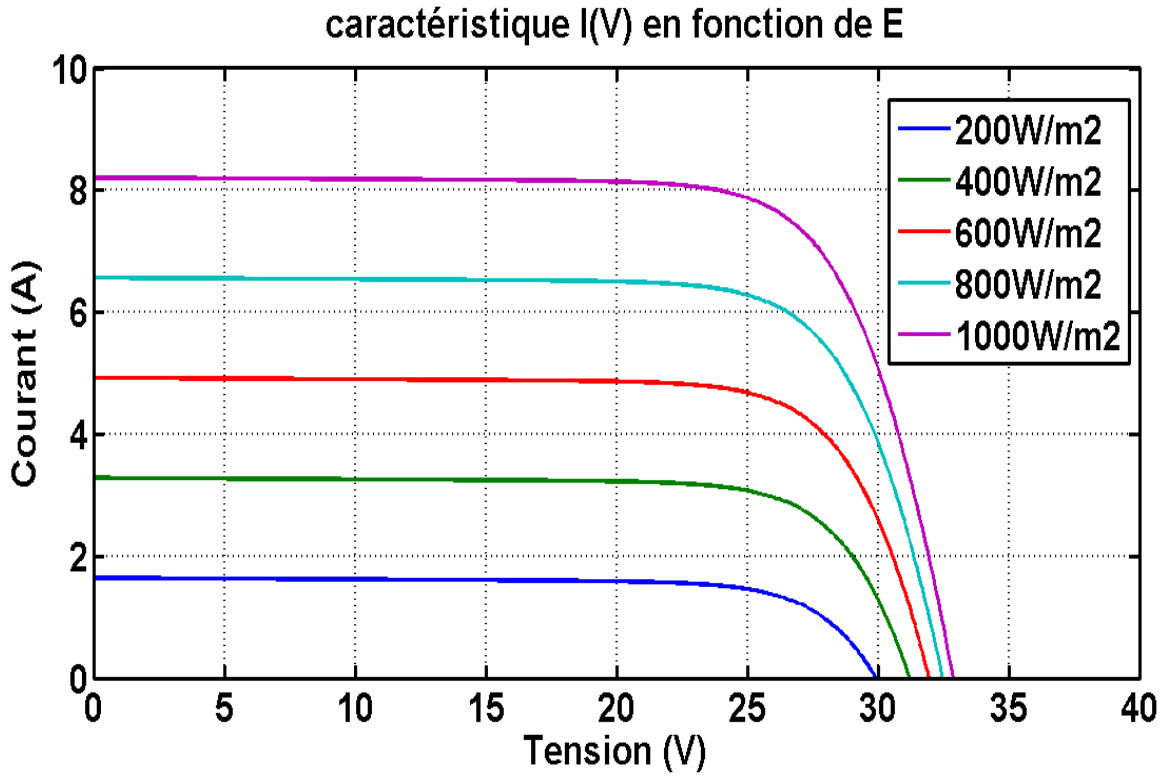


Figure I- 6-Caractéristique I(V) d'un module pour différentes éclairement solaires

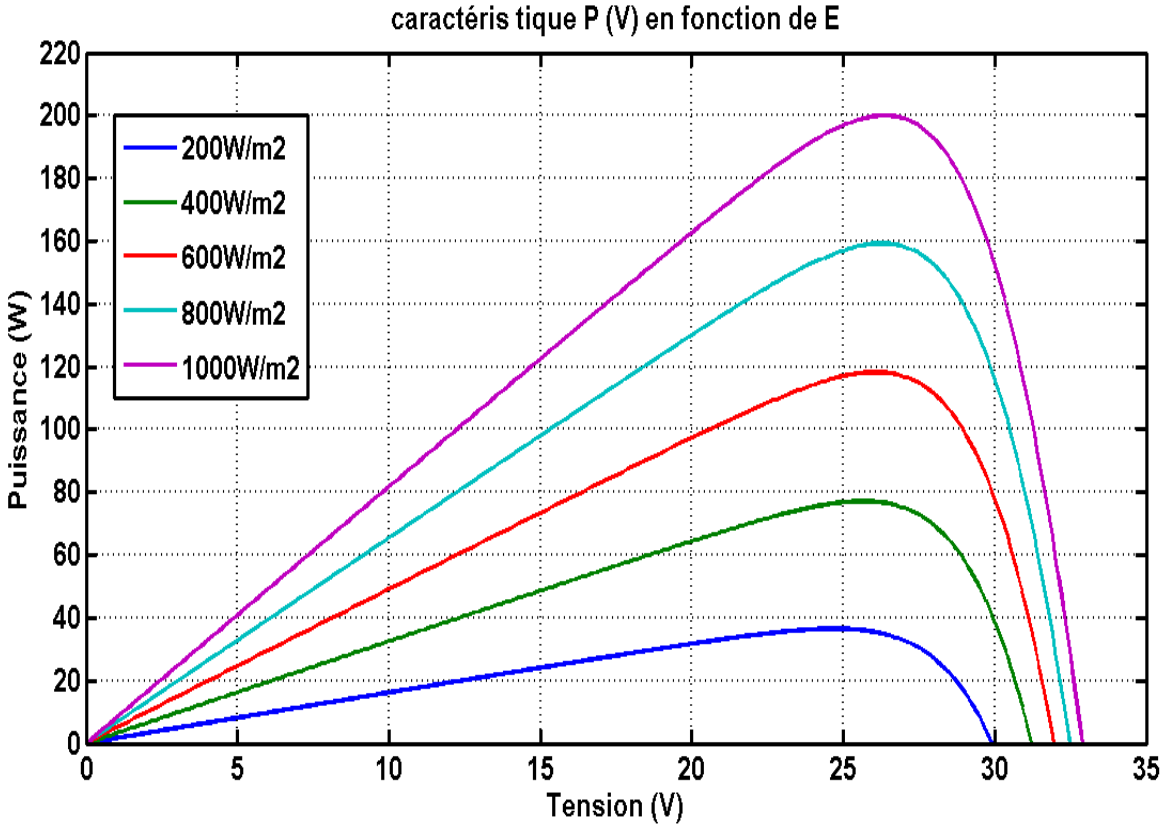


Figure I- 7-Caractéristique P(V) d'un module pour différentes éclairement solaires

I.8 Discussion des résultats :

L'équation (**I.7**) peut être résolue afin de nous permettre déterminer la courbe I-V,P-V d'un circuit électrique équivalent avec une seule diode. Nous avons utilisé un modèle mathématique simulé avec Matlab / Simulink. Les résultats obtenus sont ceux de l'intensité I et de la tension V pour un instant t, donc les courbes I-V et P-V peuvent être simulées pour des périodes voulues.

Nous avons effectué des simulations pour obtenir des évolutions de la caractéristique I-V ,P-V aux conditions standards de test (STC). Nous rappelons que les conditions STC correspondent à une irradiance solaire $G_0 = 1000\ W.m_{-2,}$ une température de cellule $T_c = 25°C$

La figure I-4 et I-5 ci-dessous montre que la caractéristique courant-tension et puissance –tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV.

La figure I-6 et I-7 ci-dessous montre que la caractéristique courant-tension et puissance –tension pour différentes irradiations sur la cellule PV

I.8.1 Influence de température :

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte.

I.8.2 Influence de l'éclairement

Sur les figures I-4 et I-6 on remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m2 et une température de 25 °C

Pour avoir plus de détaille on peut jouer sur plusieurs paramètres dont le nombre de module en série et en parallèle, résistance en série et le regroupement de cellule dans une module.

I.8.3 Effet d'association des module P-V en parallèle et en série :

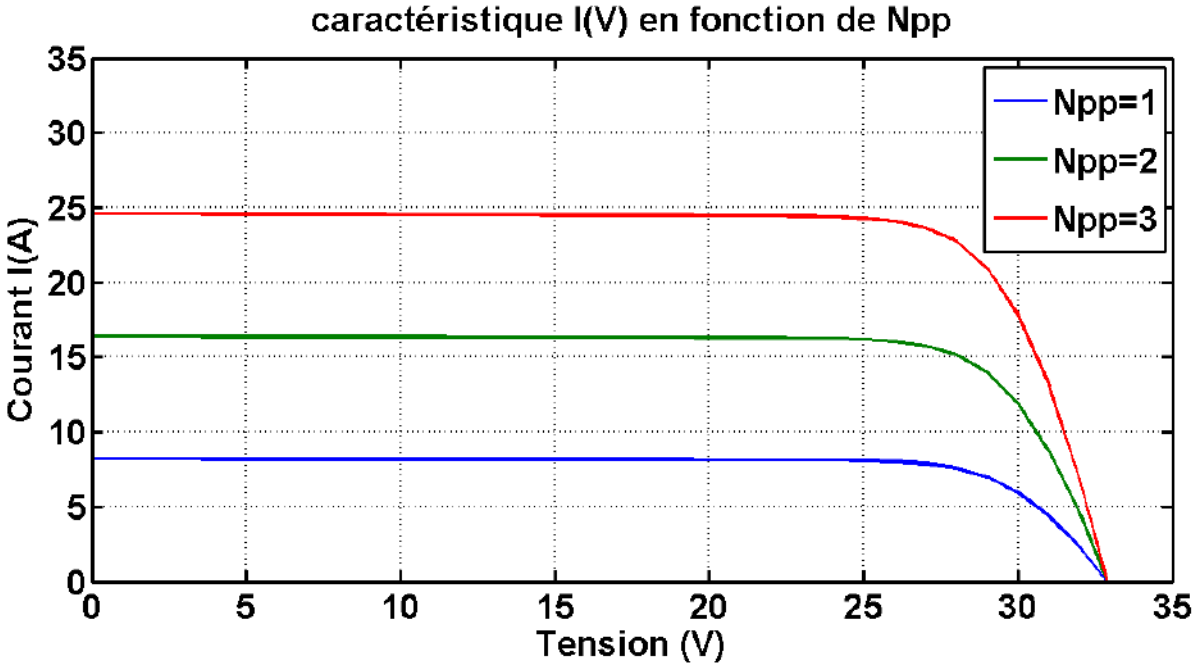


Figure I- 8-Regroupement des modules en parallèle

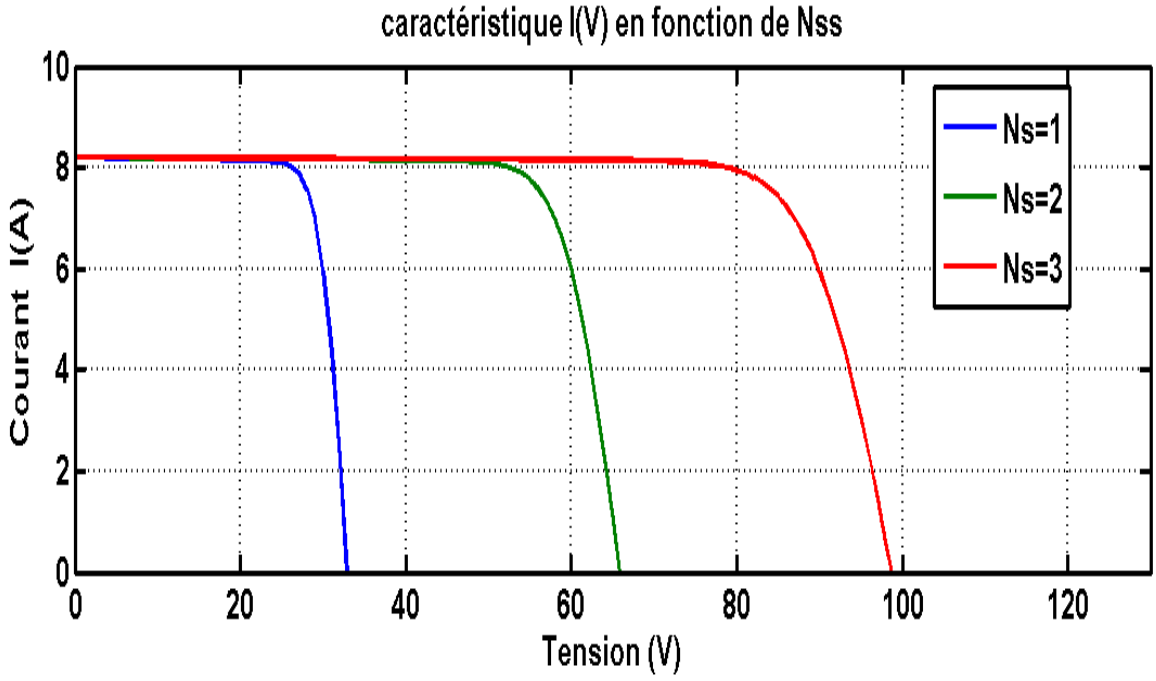


Figure I- 9-Regroupement des modules en série

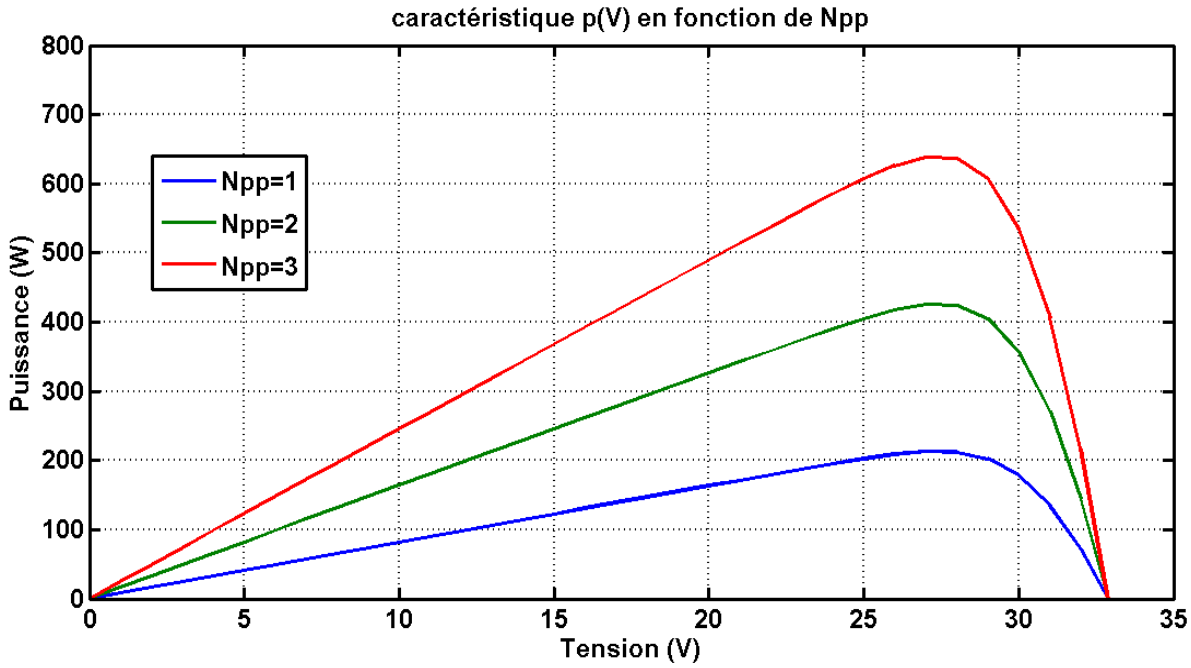


Figure I- 10-Regroupement des modules en parallèle

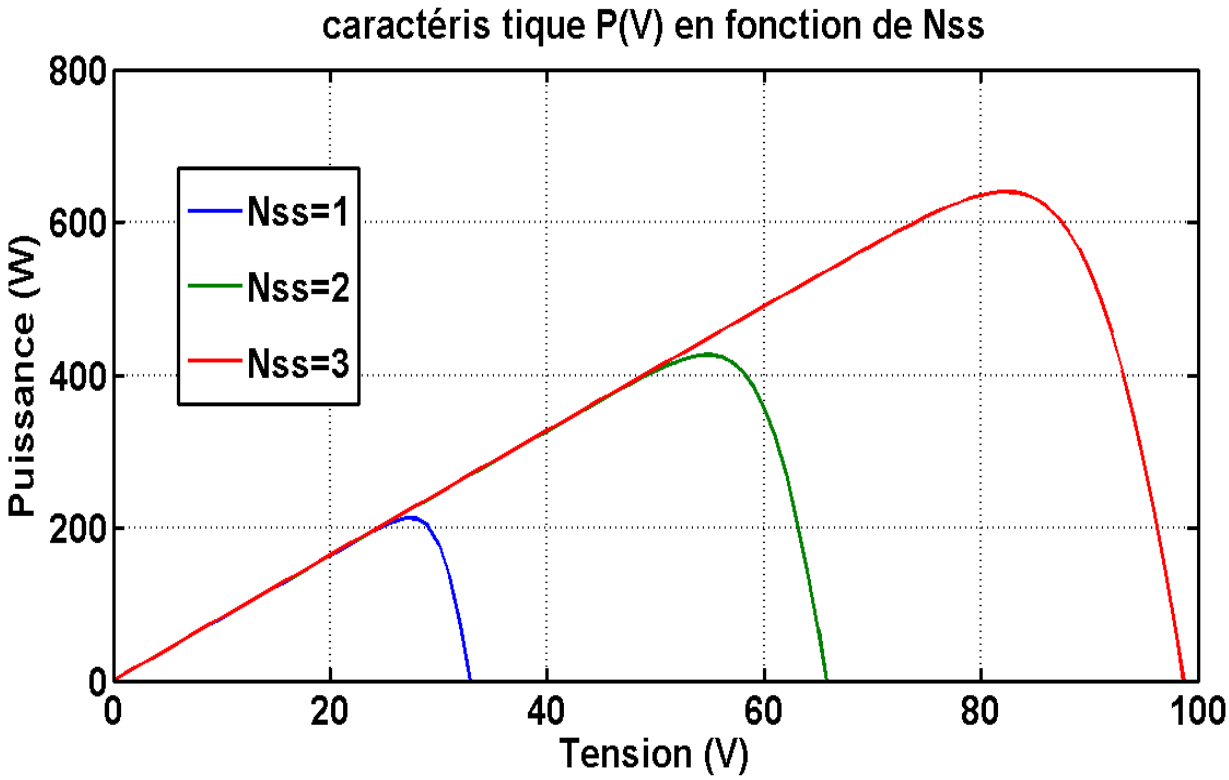


Figure I- 11-Regroupement des modules en série

I.8.4 Influence de variation la résistance en série et nombre de cellule dans le module

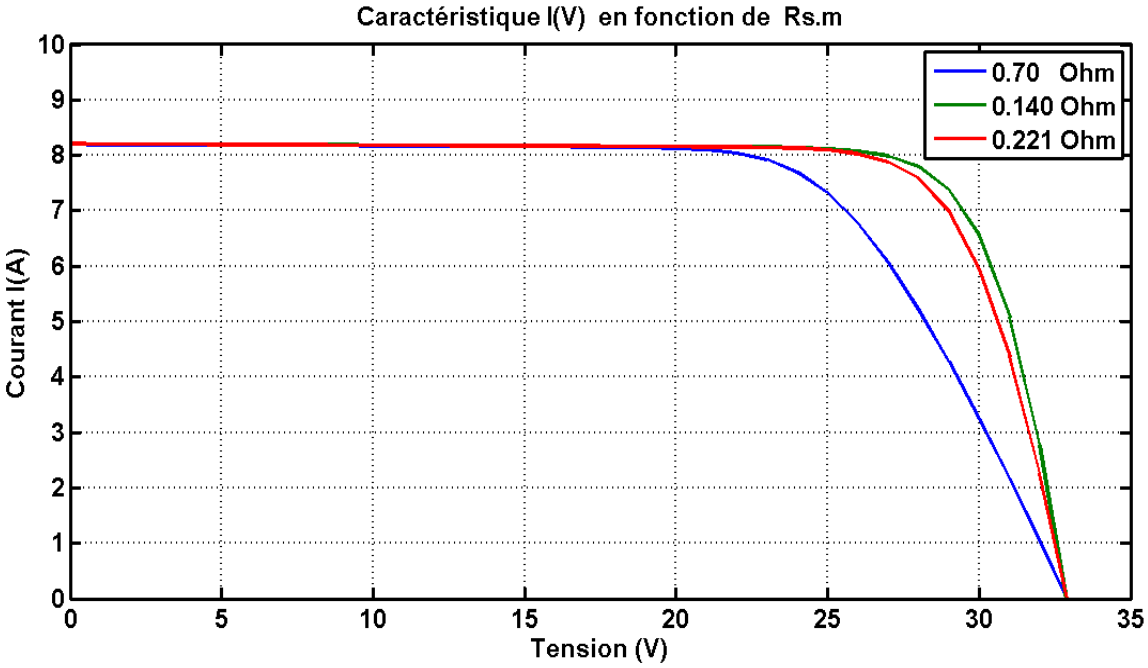


Figure I- 12-influence de la résistance série

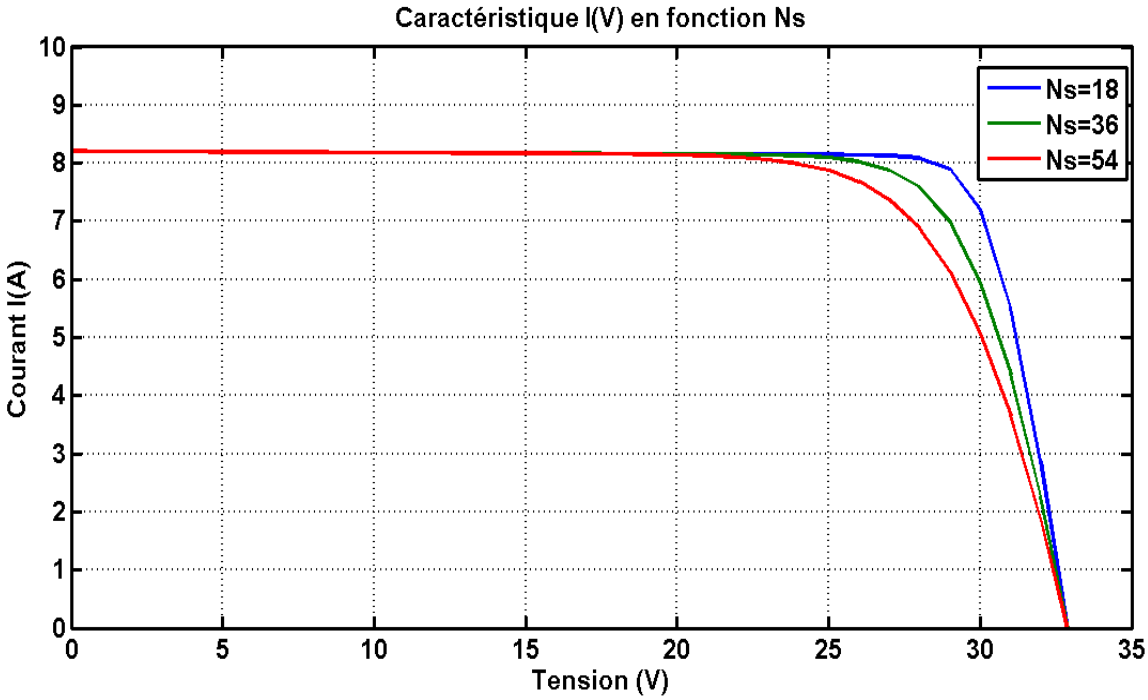


Figure I- 13-Influence des groupements des cellules Ns

I.9 La commande prédictive :

I.9.1 Principes de la commande prédictive :

Fondamentalement, l'algorithme de commande prédictive prend en compte le comportement futur du système afin d'élaborer une commande permettant le meilleur suivi d'une trajectoire connue [31].

Le principe de la commande prédictive consiste à créer pour le système à commander un effet anticipatif par rapport à une trajectoire à suivre connue à l'avance, en se basant sur la prédiction du comportement futur du système et en minimisant l'écart de ces prédictions par rapport à la trajectoire au sens d'une certaine fonction coût, tout en respectant des contraintes de fonctionnement. Cette idée est simple et pratiquée de façon assez systématique dans la vie quotidienne. Par exemple, le conducteur d'un véhicule connaît la trajectoire de référence désirée à l'avance (la route) sur un horizon de commande fini (son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions. [32]

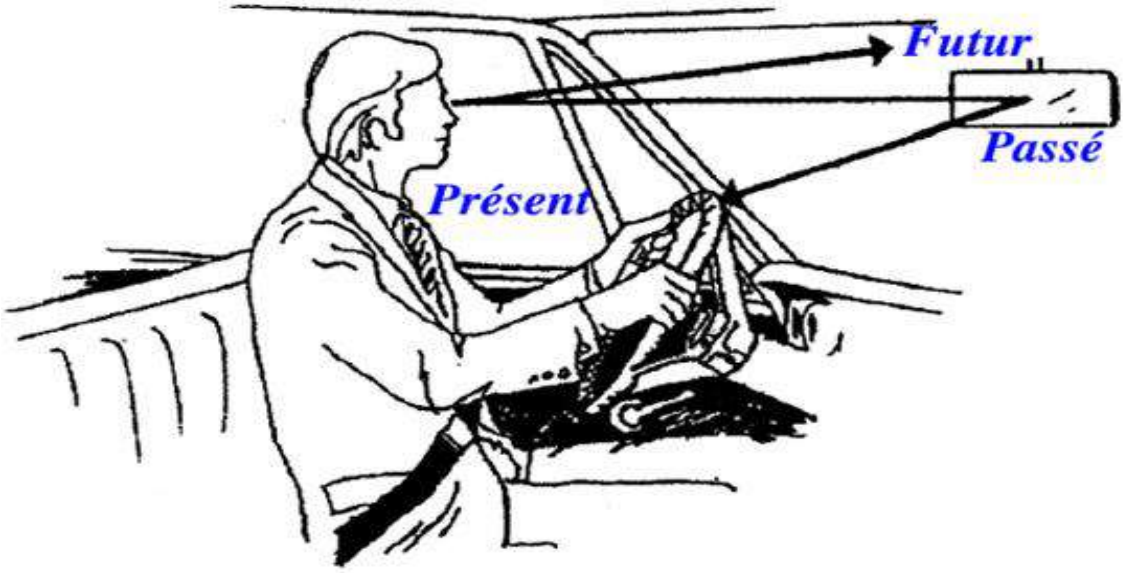


Figure I- 14-Philosophie de la commande prédictive. [36]

Figure I-15 résume le principe de la commande prédictive dans le cas général d'un problème de commande optimale sous contraintes sur un horizon glissant

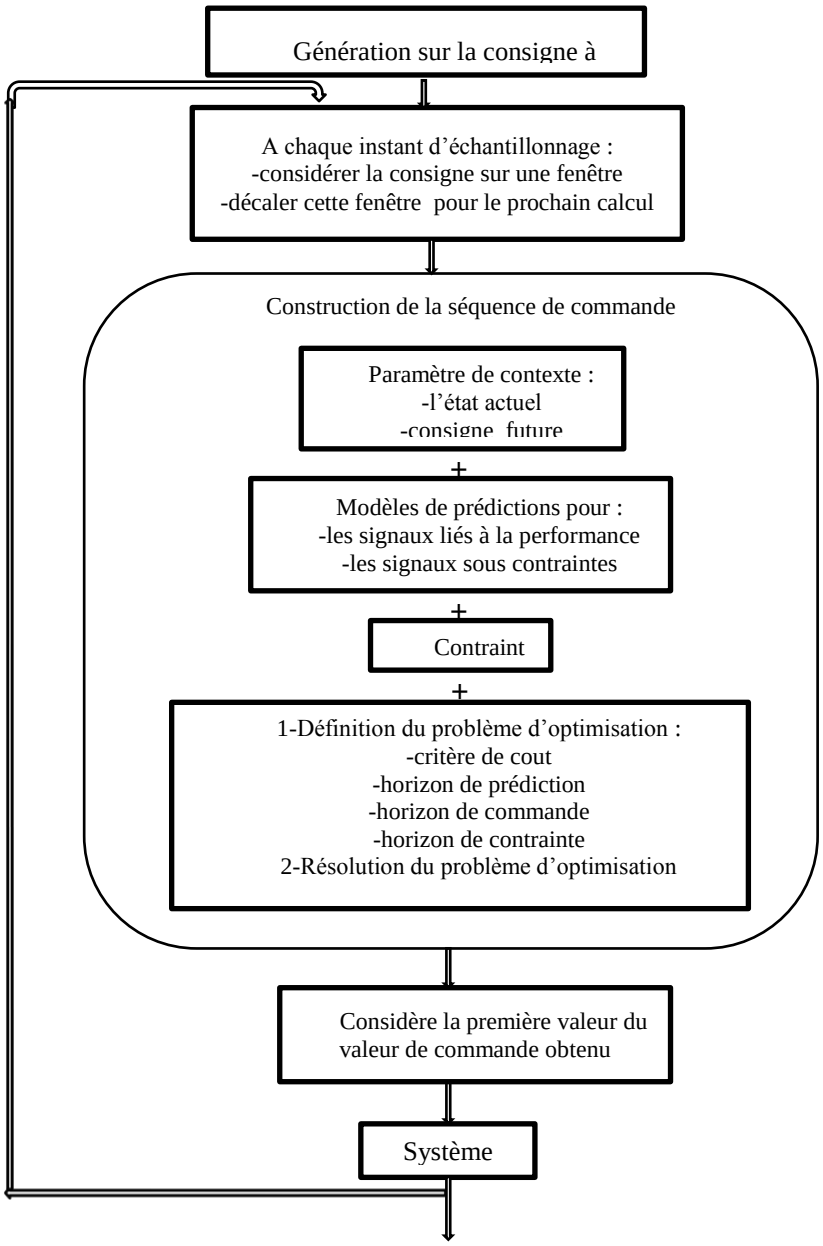


Figure I- 15Schéma de principe de la commande prédictive. [38]

I.9.2 Eléments d'une commande prédictive :

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments Figure I- 16, et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

- 1- Le modèle du système (pour la prédiction),

- 2- Le critère de performances (la prédiction)
- 3- L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande)

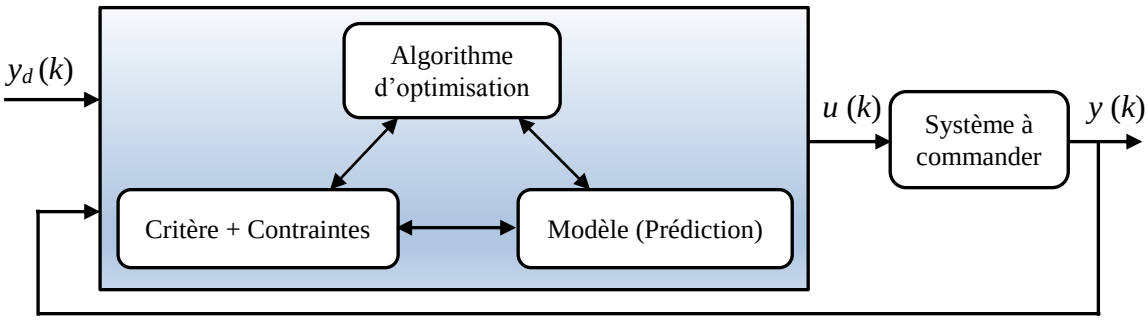


Figure I- 16-Stratégie de commande prédictive. [37]

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure (I.3) est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, Le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures. [32]

I.9.3 Les différents types d'algorithmes prédictifs :

I.9.3.1 Cas linéaire :

I.9.3.1.1 La Commande Prédictive à base de modèle (MPC) :

Bien que chacun des algorithmes présente des spécificités, la commande prédictive, connue sous le nom de MPC (Model Prédictive Control) ou MBPC (Model-Based Prédictive Control), regroupe l'ensemble de ces stratégies. Concrètement, la formulation MPC du problème de la commande prédictive fait appel à une représentation d'état du système et permet donc l'application des outils classiques d'analyse de la stabilité et de la robustesse. Si cette notion de prédiction du comportement futur du système peut être considérée comme la principale spécificité de la commande MPC, on peut rappeler qu'il est habituel, dans la théorie de commande, de faire appel à la prédiction. Le prédicteur de Smith ou le prédicteur d'état traitant les systèmes à retard sur l'entrée peuvent être cités comme exemples. [33]

La philosophie de la commande prédictive se résume à utiliser un modèle interne pour prédire le comportement du système et choisir la meilleure décision au sens d'un certain coût tout en respectant les contraintes. [34]

I.9.3.1.2 Stratégie générale de la commande prédictive MPC :

De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

1- Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote $(t + k|t)$, avec (k = 0...N), les sorties prédites et par N l'horizon de prédiction. Ces sorties sont dépendantes des valeurs de sorties et d'entrées du processus à commander connues jusqu'au temps t.

2- Calculer la séquence de signaux de commande, dénotée par $(t + k|t)$, k = 0...N - 1, en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence dénotée par $(t + k|t)$, k = 0...N. D'habitude le critère de performances à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre $(t + k|t)$ et $(t + k|t)$ et un coût de l'effort de commande. Par ailleurs, la minimisation d'une telle fonction peut être soumise à des contraintes sur l'état et plus généralement à des contraintes sur la commande.

3- Le signal de commande u(t/t) est envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps t + 1 on acquiert la sortie réelle y(t + 1) et on recommence au premier.

La figure I- 17 illustre cette méthodologie et sa mise en œuvre utilise la structure de base montrée dans la figure I- 20 Les deux boucles fondamentales à remarquer sur cette figure sont le modèle et l'optimiseur. Le modèle doit être capable de capturer la dynamique du processus, de prédire les sorties futures de manière précise et sa mise en œuvre doit être facile, l'optimiseur fournit les actions de commande. En présence de contrainte la solution est obtenue via des algorithmes itératifs, avec plus de temps de calcul, évidemment. [35]

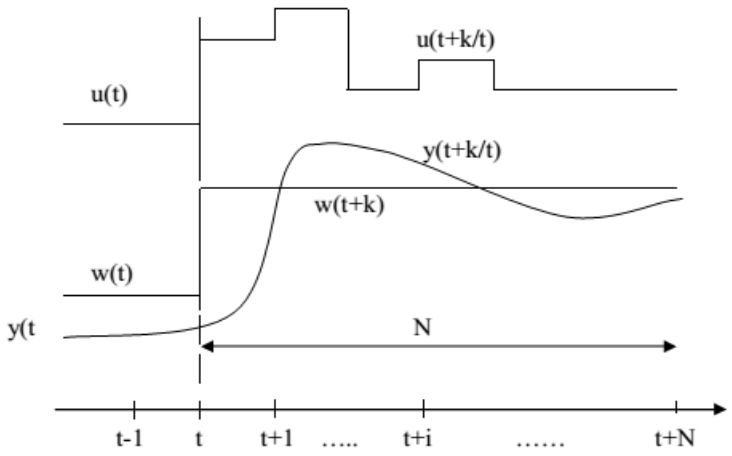


Figure I- 17-La méthodologie du MPC. [35]

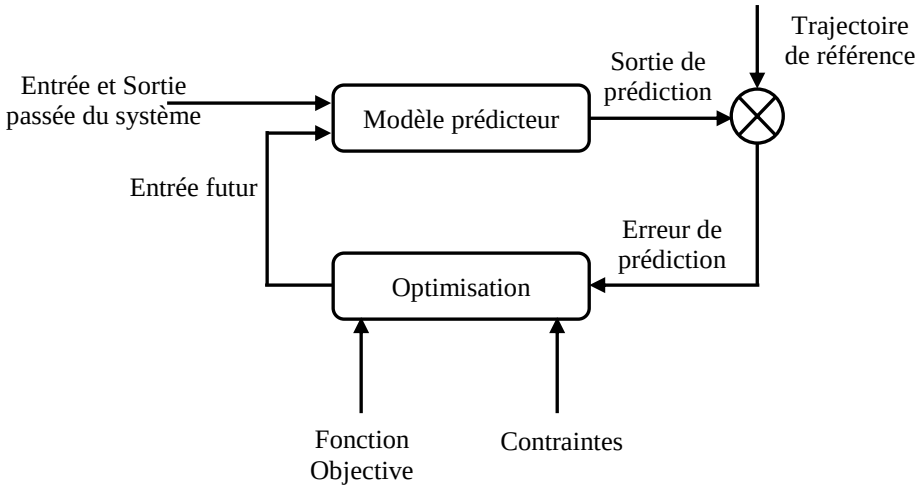


Figure I- 18-Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC [35]

I.9.3.1.3 Modèle du système :

Le modèle joue un rôle décisif dans le calcul de la commande. Il doit reproduire avec une exactitude suffisante les caractéristiques dynamiques du processus à des futurs moments du temps {*y(k+i/k)*} en se servant des valeur passées de la commande, de la sortie et des valeurs optimales de la commande future {*u(k+i/k)*}.

Les différentes stratégies du MPC emploient différents modèles pour représenter la relation entre la sortie et l'entrée du système. Parmi les signaux d'entrée on a les variables manipulées (ou commande), les perturbations mesurables qui peuvent être "traitées" par compensation par «anticipation» ("*feedforward*"). De plus, doivent être prise en considération les composantes non considérées par le modèle du système, ce qui inclut l'effet des entrées non mesurables, des bruits et des erreurs de modélisation. Ainsi, le modèle peut être divisé en deux parties : le modèle du processus et le modèle des perturbations (exogènes ou endogènes). Les prédictions de la sortie seront fonction des deux [11],et parmi ces modèle nous allons étudier le modèle de suivi le trajectoire de référence .

I.9.3.1.4 Trajectoire de référence :

Un des grands avantages des commandes prédictives est que, si l'on connaît l'évolution future de la trajectoire de référence, le système peut commencer à répondre avant que le changement ne soit détecté.

L'évolution future de la référence est bien connue dans beaucoup d'applications, comme en robotique, ou les processus batch. Dans la plupart des méthodes habituelles, on utilise souvent une trajectoire de référence qui n'est pas nécessairement égale à la vraie référence. Par exemple, on peut approcher celle-ci au moyen d'un système du premier ordre :

$$(k+i) = \alpha\,(k+i-1) + (1-\alpha)\,(\ +i)\ i = 1, 2, \dots, N \qquad \text{(I-8)}$$

Où α est un paramètre contenu entre 0 et 1 qui constitue une valeur réglable qui influencera la réponse dynamique du système (ainsi, α proche de *1* conduira à une réponse “douce”).

I.10 Conclusion :

.Dans ce chapitre, on utilise un modèle mathématique d'une cellule PV à une seule diode en étudiant son comportement simulé à l'aide de Matlab / Simulink

D'après les résultats que nous avons obtenus en constatons que Les performances d'un module PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement solaire et la température et par des caractéristiques donné par le fabricant dont le nombre de cellule ou module en série et en parallèles.

Et en faisant un rappel sur les généralités, concept et le principe de fonctionnement de la commande prédictive.

II.1. Introduction :

Le générateur photovoltaïque présente une caractéristique non linéaire en terme de la puissance produite en fonction de l'éclairement et la température, dans ce cas, la connexion directe entre la source et la charge indique un écart très important entre la puissance potentielle par rapport à la puissance transférée en consommation [8] [10].. Afin d'extraire une puissance optimale à tout instant, un étage d'adaptation doit être introduit, jouant un rôle d'interface entre les deux éléments, ce quadripôle est un convertisseur DC-DC contrôlé par une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) [9] [10]. Dans ce chapitre nous avons faire l'étude et la simulation par MATLAB-SIMULINK du convertisseur BOOST et son commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale. en utilisant la méthode de P&O (perturbation et observation)

II.2. Types Convertisseurs DC-DC ou hacheurs :

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés, dans le cadre d'un système photovoltaïque pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV (source continue) avec différentes charges pour effectuer le transfert de la puissance maximale.

La source et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).

Leur rôle dans ce cas, consiste à maintenir le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Pour les applications photovoltaïques, on distingue 3 types de convertisseurs non-isolés les plus répandus :

- Hacheur abaisseur (ou Buck),
- Hacheur élévateur (ou Boost),
- Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost).

Le convertisseur est choisi en fonction de la charge à alimenter.

II.2.1. Hacheur Buck (série/abaisseur) :

Ce hacheur commande le débit d'une source de tension dans une charge de courant

Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie inférieure

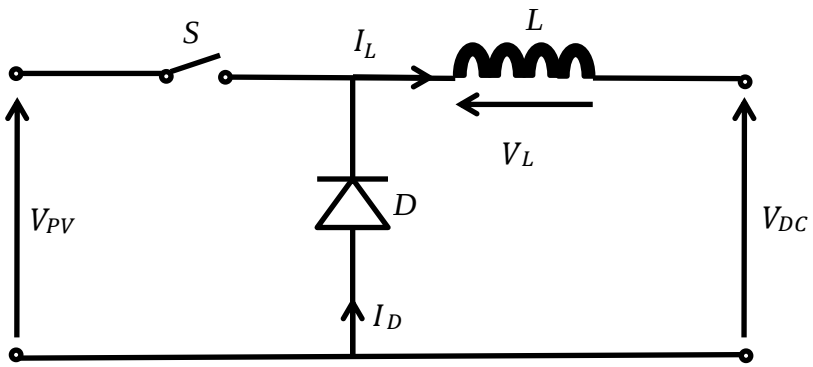


Figure-II- 1-Schéma électrique du hacheur buck

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes :

Lors de la première, on ferme l'interrupteur et la diode polarisée en inverse, est bloquée. La source V_{PV} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Cette phase dure de 0 à αT, avec α compris entre 0 et 1 (aussi appelé rapport cyclique).

Lors de la seconde, on ouvre l'interrupteur. La diode devient passante car l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. Cette phase dure de αT à T.

La relation entre la tension d'entrée et celle de sortie est la suivante :

$$V_{DC} = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} v_{DC}\, dt = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha t} V_{PV}\, dt = \alpha V_{PV} \qquad (\text{II .1})$$

A pertes minimales on a :

$$P_{PV} = P_{DC} \Leftrightarrow V_{PV} I_{PV} = V_{DC} I_{DC} \Leftrightarrow I_{PV} = \frac{V_{DC}}{V_{PV}} I_{DC} \Leftrightarrow I_{PV} = \alpha I_{DC} \Leftrightarrow \alpha = \frac{V_{DC}}{V_{PV}} = \frac{I_{PV}}{I_{DC}} \quad (\text{II.2})$$

II.2.2. Convertisseurs Boost (élévateur) :

Le convertisseur Boost est également connu sous le nom de convertisseur step-up. Il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute. Il se compose d'une source de tension d'entrée continue V_e, d'une inductance L, d'un interrupteur S, d'une diode, et deux condensateurs C_1 et C_2.

La Figure 2 montre le schéma électrique du convertisseur Boost .

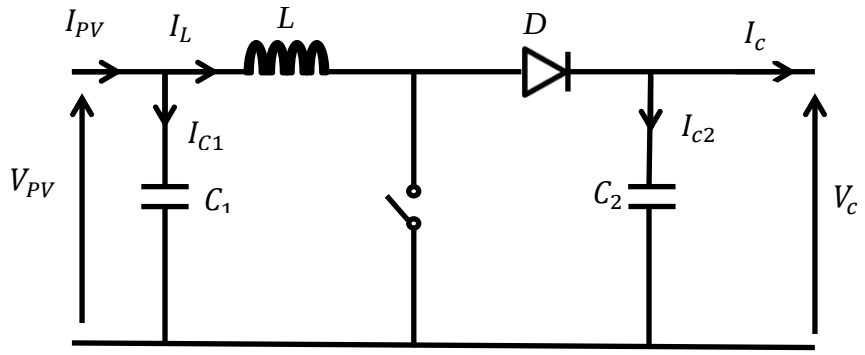


Figure-II- 2-Schéma électrique du convertisseur Boost proposé

Dans la phase dure de 0 à αT, l'interrupteur commandé est fermé, la tension à ses bornes est nulle. La source est la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée et le courant dans l'inductance croît linéairement.

Pour la seconde phase, de αT à T, on ouvre l'interrupteur commandé et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode qui devient passante.

$$V_{PV} = \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{T} v_{PV}\, dt = \frac{1}{T}\int_{\alpha T}^{t} V_{DC}\, dt = (1-\alpha)V_{DC} \Leftrightarrow V_{DC} = \frac{V_{DC}}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.3})$$

A pertes minimales on a :

$$P_{PV} = P_{DC} \Leftrightarrow V_{PV}I_{PV} = V_{DC}I_{DC} \Leftrightarrow I_{DC} = \frac{V_{PV}}{V_{DC}}I_{PV} \Leftrightarrow I_{PV} = (1-\alpha)I_{DC} \Leftrightarrow (1-\alpha) = \frac{V_{PV}}{V_{DC}} = \frac{I_{DC}}{I_{PV}} \quad (\text{II.4})$$

Les équations d'états régissant le bon fonctionnement du Boost sont [10][11]:

- Interrupteur k fermé :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1}[I_e - I_L]\,,\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e}{L}\,,\ \frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{I_S}{C_2} \quad (\text{II.5})$$

- Interrupteur k ouvert :

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1}[I_e - I_L]\,,\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L}[V_e - V_S]\,,\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2}[I_L - I_S] \quad (\text{II.6})$$

Prenons : $X_1 = \frac{dV_{C1}}{dt}\,; X_2 = \frac{dI_L}{dt}\,; X_3 = \frac{dV_{C2}}{dt}\,; V_{C2} = V_S$ (II.7)

Le système d'équations d'état continu en fonctionnement est représenté sous la forme[10][11]: :

$$\begin{cases} X_1 = \frac{-1}{C_1} * X_2 + \frac{1}{C_1} * I_e \\ X_2 = \frac{D-1}{L} * X_3 + \frac{1}{L} * V_e \\ X_3 = \frac{1-D}{C_2} * X_2 - \frac{1}{R*C_2} * X_3 \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

Pour l'application de boost :

$$I_e = I_{PV} \; ; V_e = V_{PV} \quad \text{(II.9)}$$

Contrairement à la plupart des convertisseurs dans la littérature, le convertisseur proposé comporte deux capacités Cin et Cout qui ont pour rôle respectif de diminuer l'ondulation de la tension d'entrée et de sortie du convertisseur (ou de lisser).

Egalement la fréquence du mosfet utilisée dans la littérature est généralement 50 kHz, pour notre travail nous avons choisi 100 kHz car nous obtenons ainsi des capacités et une inductance faible qui contribuent à la qualité de la tension et du courant de sortie

II.2.3. Hacheur buck-boost (abaisseur-élévateur) :

Ce convertisseur statique permet d'avoir une tension continue variable supérieure ou inférieure à la tension d'entrée qui est fixe.

Lors de la première phase de conduction, de 0 à αT, l'interrupteur commandé est fermé. La diode n'est pas passante et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

Lors de la seconde phase, de αT à T, on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

En conduction continue et sachant que la valeur moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, on a : $V_{PV}\alpha T = V_{dc}(1-\alpha)T$ (II.10)

Donc : $V_{DC} = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{PV}$ (II.11)

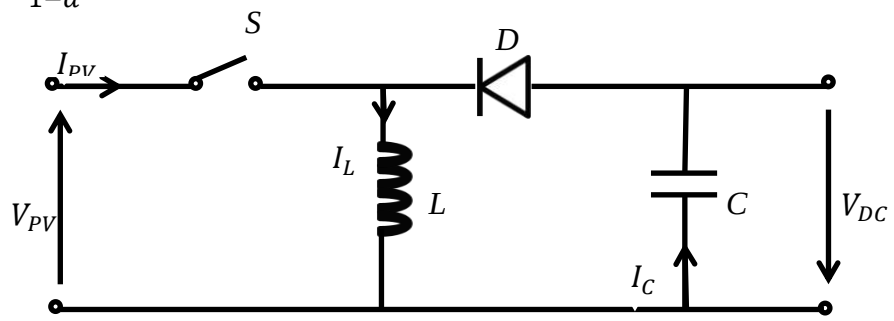


Figure-II- 3-1Schéma électrique du hacheur buck-boost

Suivant la valeur du rapport cyclique α, la tension moyenne de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée :

- lorsque $\alpha > 0.5$, le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost (élévateur).
- Lorsque $\alpha < 0.5$, le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck (abaisseur).

II.3. Poursuite Du Point De Puissance Maximal (MPPT)

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température.[12]

On utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin de fournir une tension adéquate de sortie du hacheur selon la charge placé

A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire[14][12] Plusieurs méthodes de poursuite du PPM ont été proposées, mais la plus en vue est le fameux algorithme P&O qui prédomine [12].

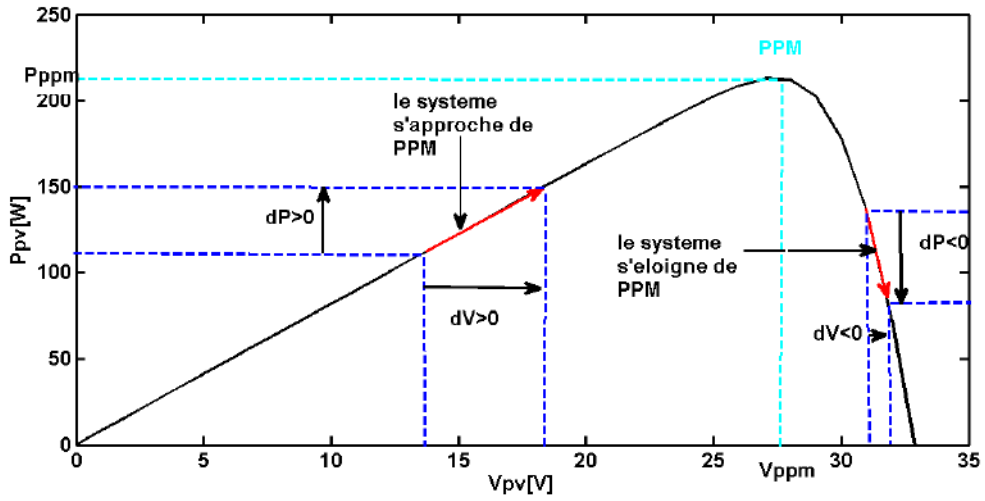


Figure-II- 4-1Caractéristique P(V) d'un panneau solaire

II.3.1. Méthode de Perturbation et d'Observation (P&O) :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du champ photovoltaïque V et I respectivement. Cette méthode opère en perturbant périodiquement la tension du champ PV, et en comparant la puissance précédemment fournie avec la nouvelle après perturbation.

Cette méthode permet de retrouver le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température.

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissanceP_k . Cette valeur P_k est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesureP_{k-1} .

Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou décrémentations du rapport cyclique *d* continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur ΔV.

Si $\Delta V > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $D_{k+1} = D_k + \Delta D$ Si $\Delta V < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $D_{k+1} = D_k - \Delta D$.

Donc on termine dans le chemin ou P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la décrémentations du rapport cyclique *d* sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur ΔV.

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour du point de fonctionnement idéal V_{MP}. Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation ΔD.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation.

La valeur pour la largeur idéale du pas du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement où par simulation, est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables [12].

La Figure II-5 représente l'algorithme de la méthode P&O

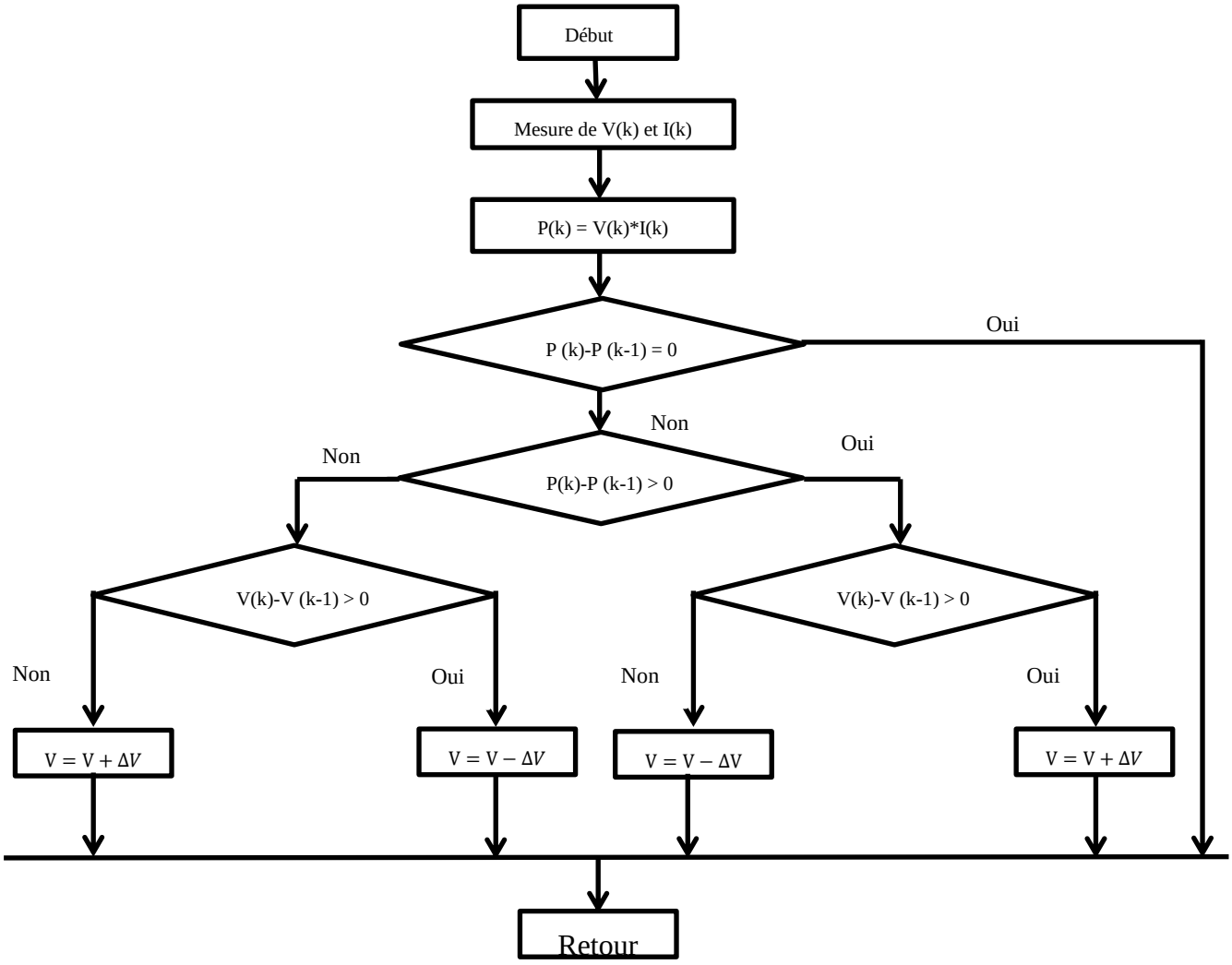


Figure-II- 5-Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)

II.4. Implémentation sous Simulink du système complet :

Nous rappelons que l'interrupteur est un mosfet commandé par un bloc de modulation à largeur d'impulsion PWM (Pulse Width Modulation) qui compare à son entrée le rapport de cycle (duty cycle) à un signal périodique triangulaire afin de situer les différents états du MOSFET. Ensuite pour trouver de façon automatique le rapport de cycle qui correspondrait à la puissance maximale pour différentes irradiances solaires, la commande MPPT de Perturbation et Observation (P&O) sera utilisée, la Figure 10 représente le schéma de la commande P&O.

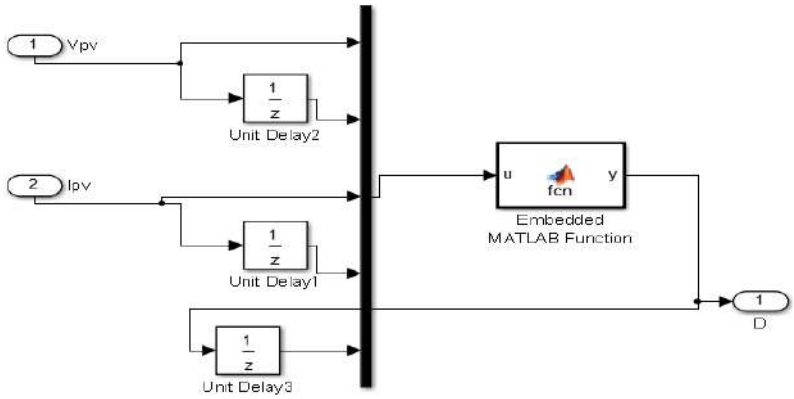


Figure-II- 6-Modèle SIMULINK pour l'algorithme MPPT (P&O).

II.4.1. Principe du MLI (PWM) [13]

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation *V* et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Une méthode pour réguler la tension de sortie $V_0(t)$ afin d'obtenir une tension moyenne V_{0moy} fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur $\alpha = T_{on}/T$ sans modifier *T*.

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM (Pulse Width Modulation).

Le signal de contrôle de l'interrupteur *S* devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique α et une tension en dents de scie V_{DS} comme suit :

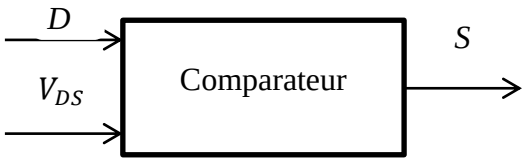


Figure-II- 7-Principe du MLI (DC/DC).

- Lorsque α > *VDS* : S = 1, l'interrupteur *S* est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque α < *VDS* : S = 0, l'interrupteur *S* est commandé à l'ouverture (état OFF).

.

La Figure 9 représente le schéma du PWM

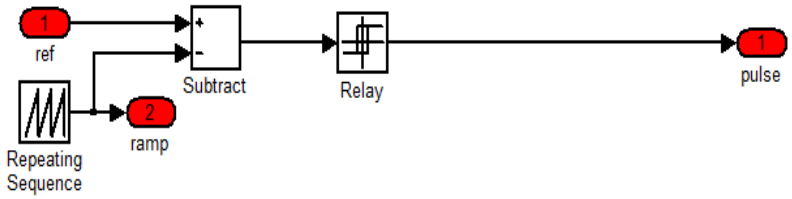


Figure-II- 8-Modèle SIMULINK pour la génération du signal PWM

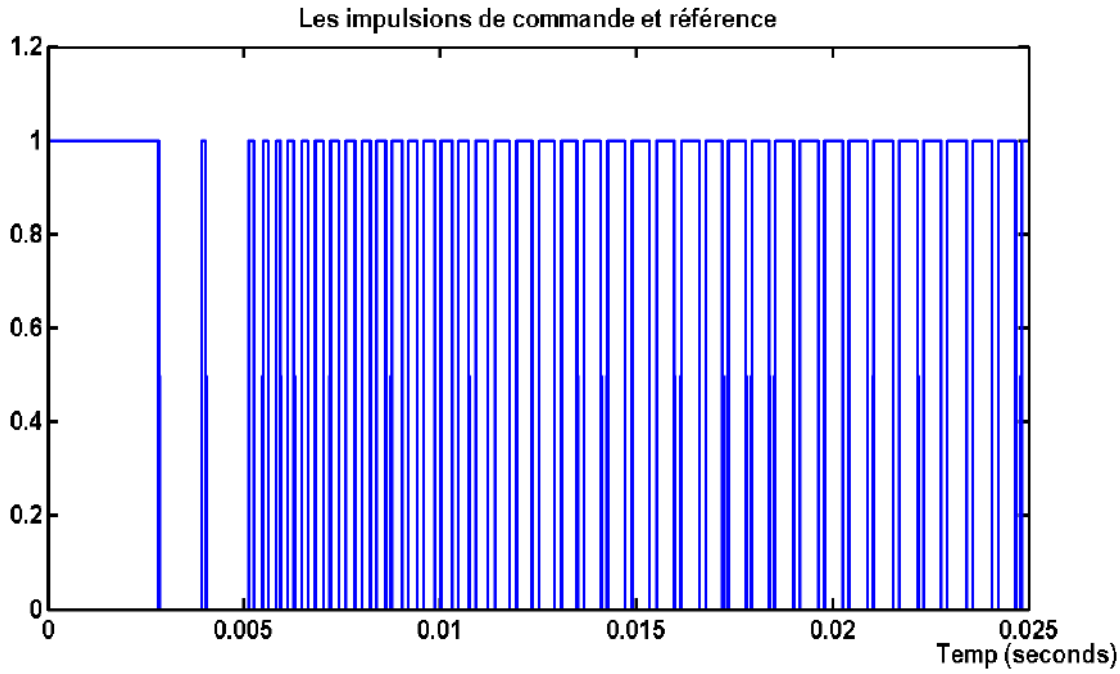


Figure-II- 9-les impulsion de commande et référence (PWM)

II.4.2. Simulation le système PV avec les convertisseurs buck et boost :

II.4.2.1. Simulation le système PV avec convertisseur boost :

La figure(II-10) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec convertisseur Boost commandé en MPPT de type P&O.

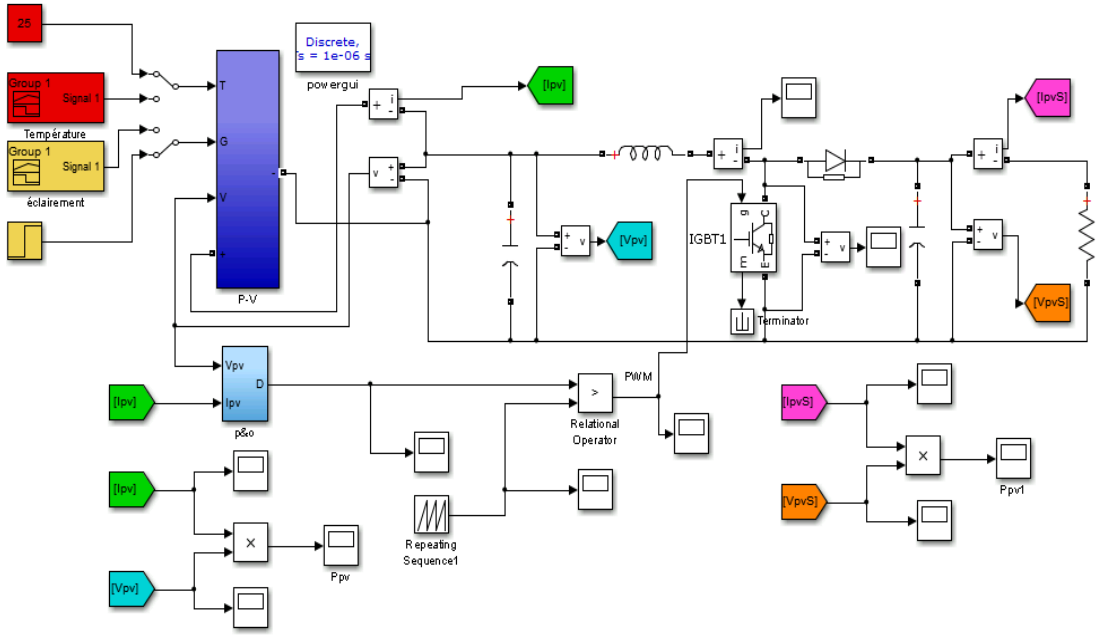


Figure-II- 10-Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type BOOST

II.4.2.2. Résultats de simulation :

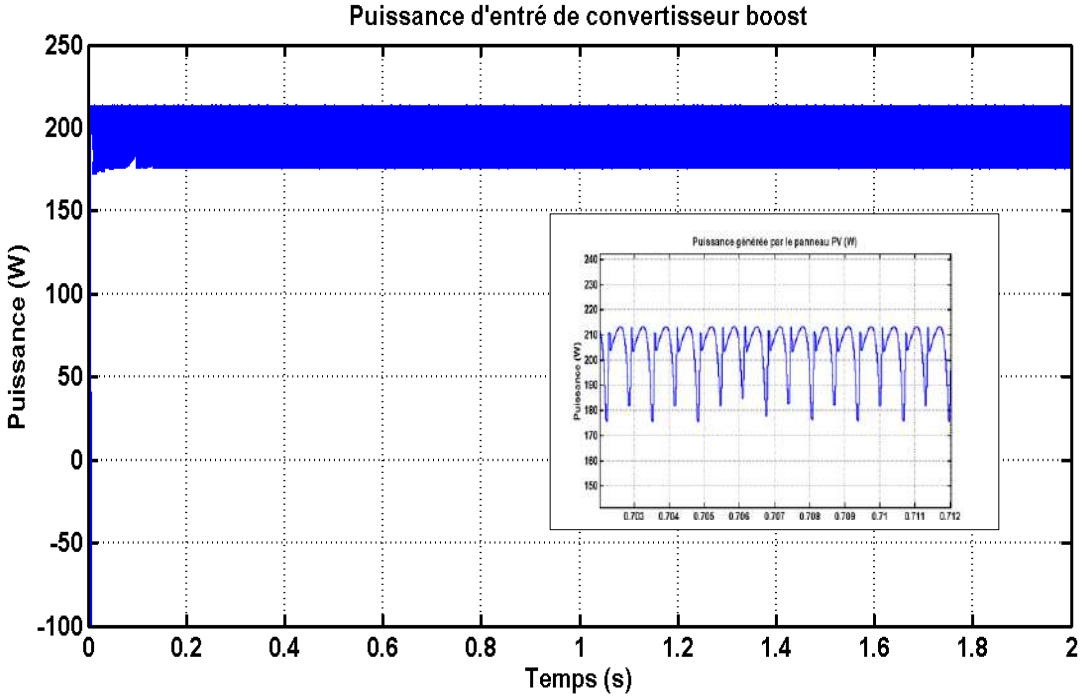


Figure-II- 11-Puissance généré par le panneau PV

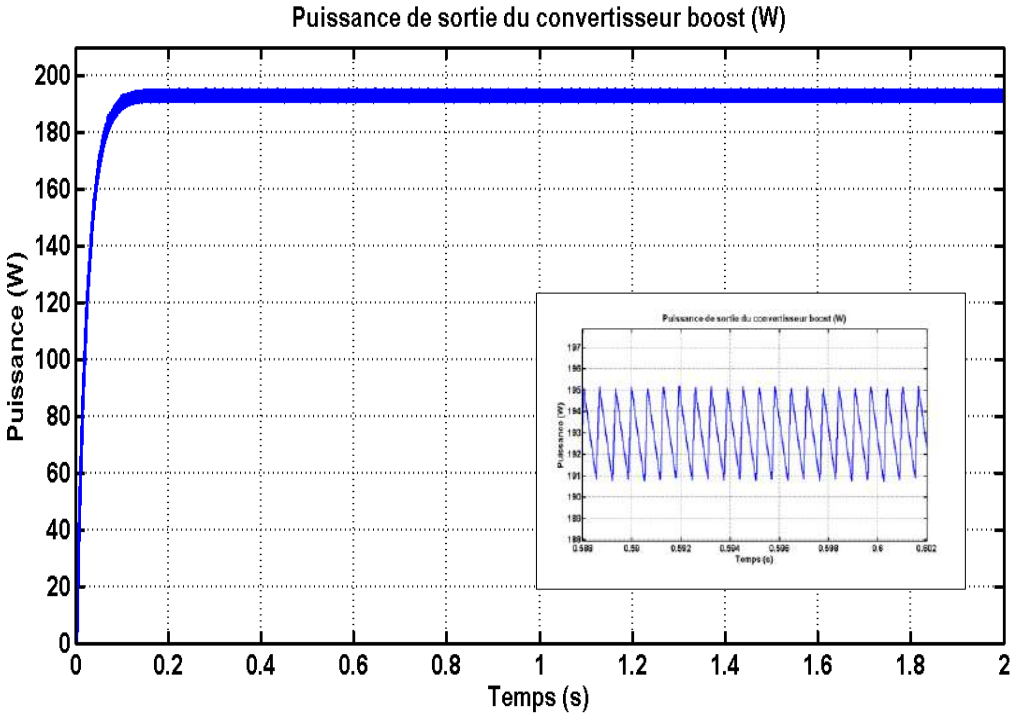


Figure-II- 12-Puissance de sortie de convertisseur boost

II.4.2.3. Cas température et éclairement fixe :

La figure (II.12) montre l'évolution de la puissance consommée par la charge. On note qu'elle est légèrement inférieure à celle générée par le panneau PV, aussi elle présente de faible oscillation et elle est constante au régime permanent

La figure(II.13) montre un établissement de la tension faiblement oscillant qui devient constant au régime permanent

Ces résultats de simulation de l'hacheur élévateur (boost) sont présentés sur les figures (II.12) et (II.14). Ces figures représentent la tension et la puissance de sortie de l'hacheur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur élévateur (boost) est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur élévateur (boost) effectue correctement son rôle. La puissance et la tension de sortie subie d'un régime transitoire oscillant puis se stabilise en régime permanent

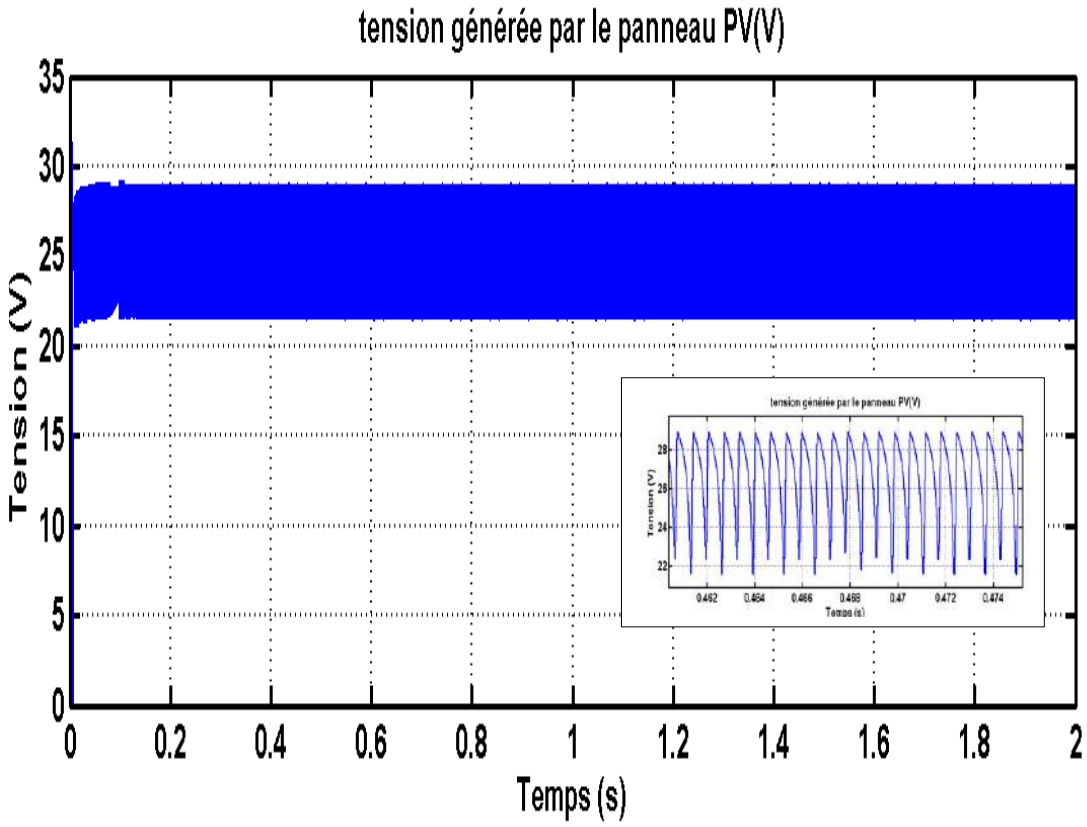


Figure-II- 13-Tension générée par le panneau PV

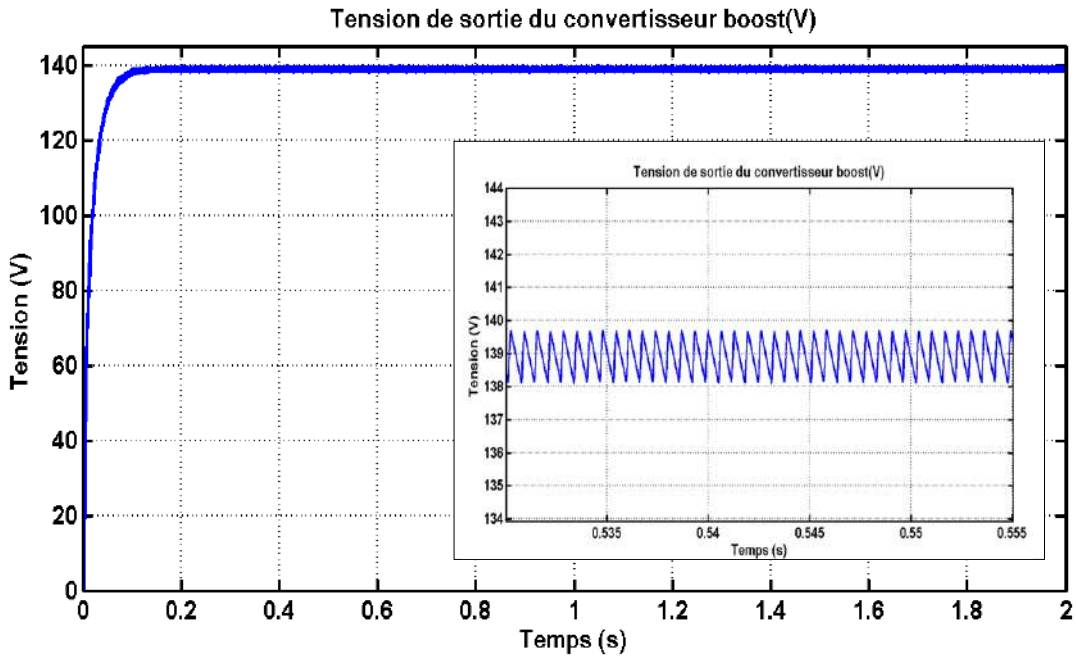


Figure-II- 14-Tension de la sortie de convertisseur boost

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que les courbes de la puissance, de la tension, présentent des oscillations dans le régime permanant. En plus, le temps de réponse très rapide.

II.4.2.4. Effet de changement d'éclairement :

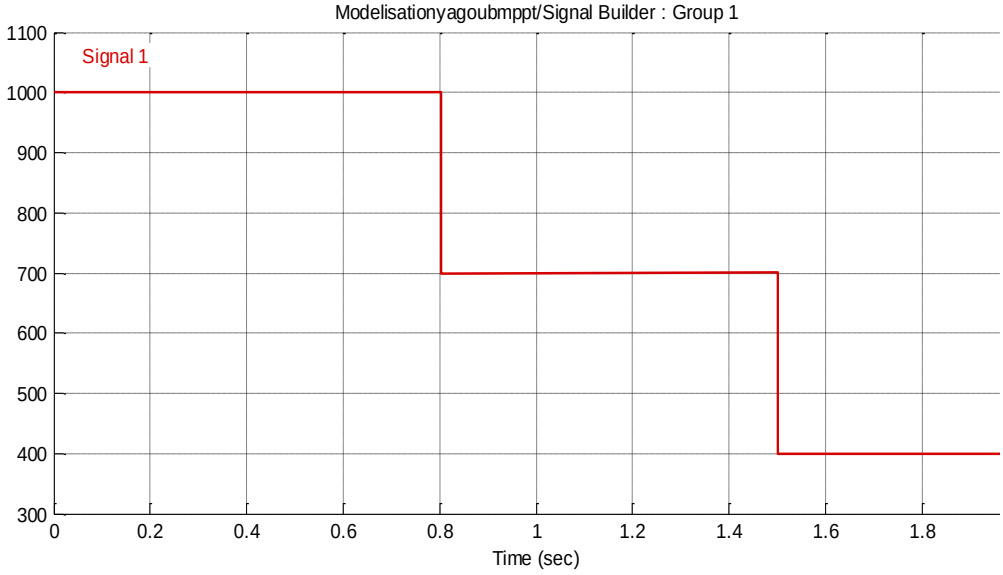


Figure-II- 15-Variation de l'irradiation (W/m2).

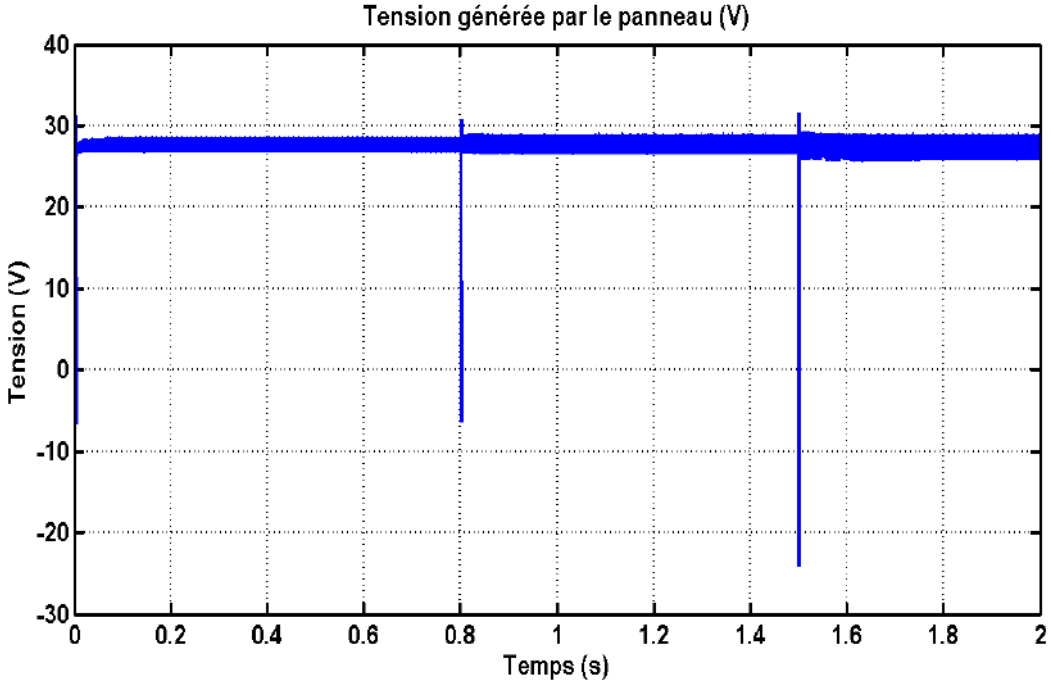


Figure-II- 16-Effet de changement d'éclairement sur la tension générée par le panneau PV (V)

st

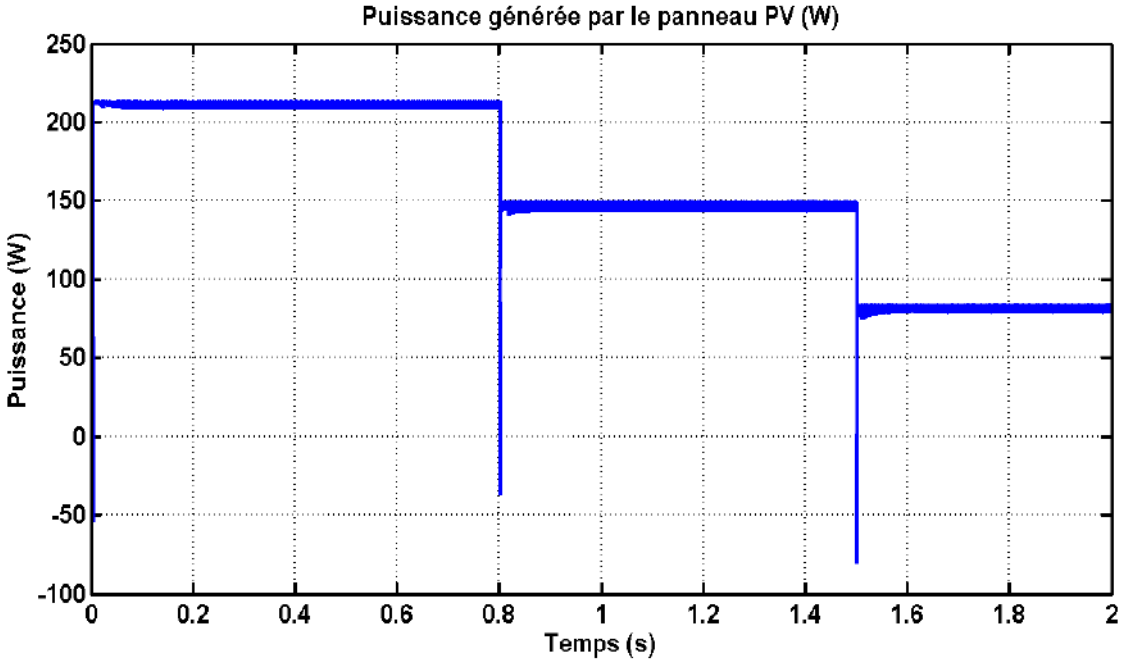


Figure-II- 17-Effet de changement d'éclairement sur la puissance générée par le panneau PV(W)

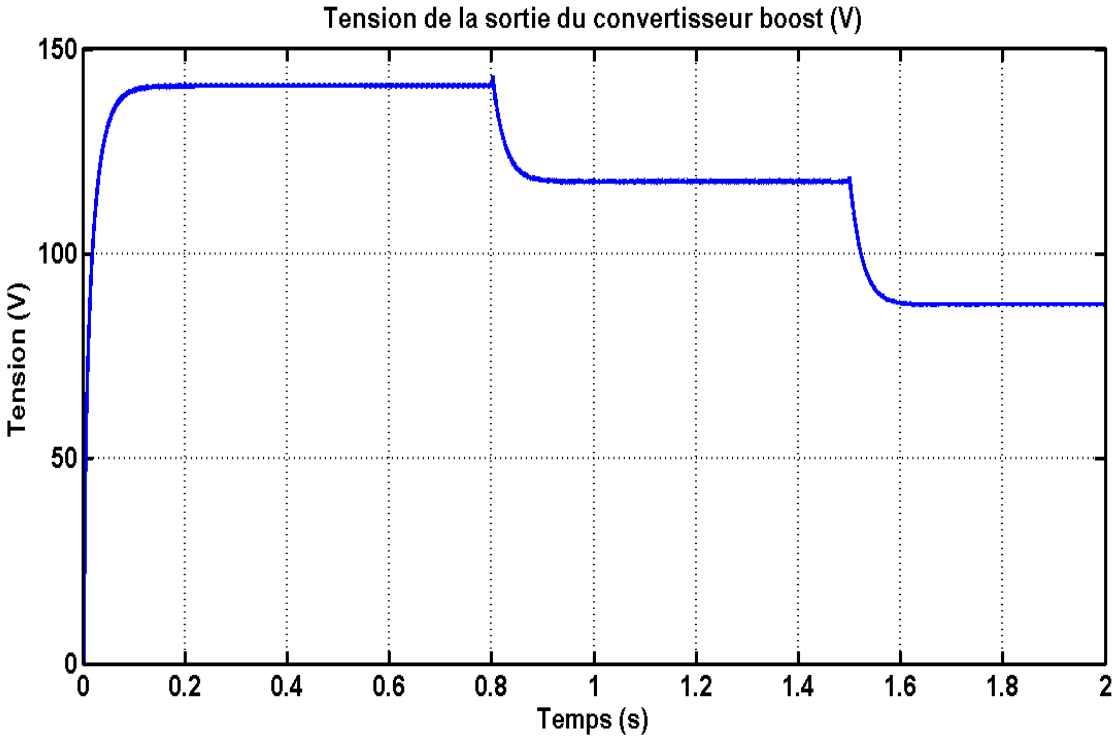


Figure-II- 18-Effet de changement d'éclairement sur la tension de la sortie du convertisseur Boost

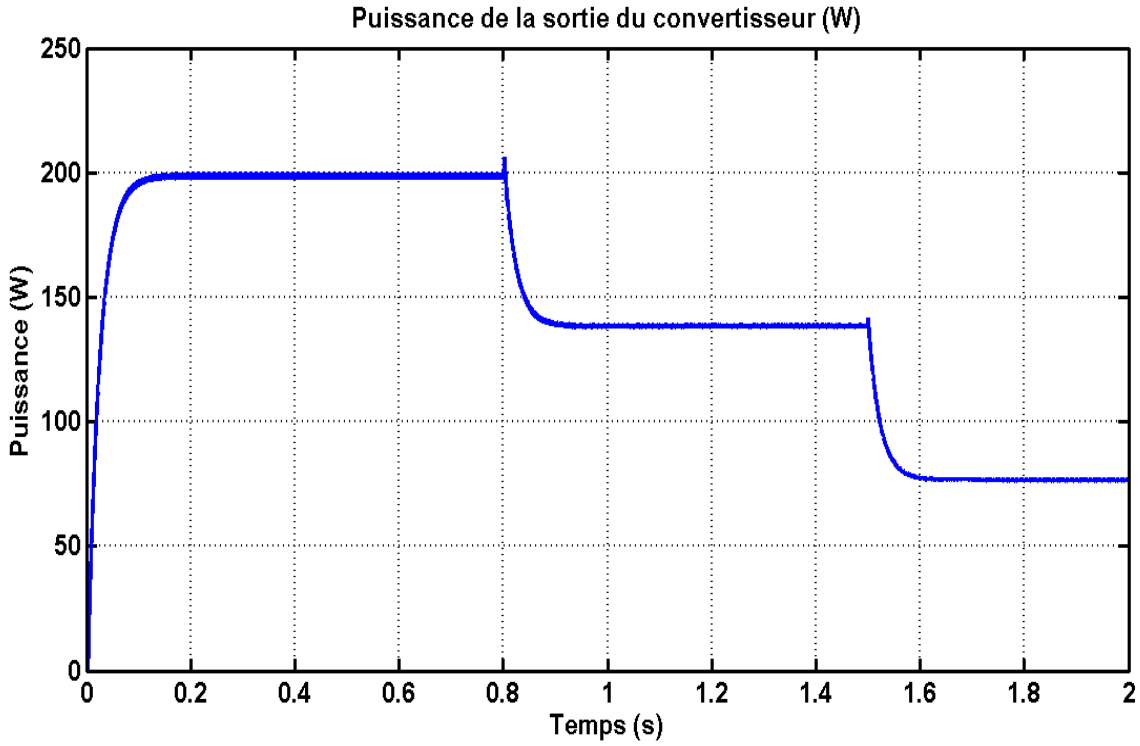


Figure-II- 19-Effet de changement d'éclairement sur la puissance de la sortie du convertisseur boost

II.4.2.5. Discutions des résultats de la simulation :

Dans Les figure (II.16), (II.17), (II.18) et (II.19), nous avons soumis le système à une variation de l'éclairement (1000,700,400) W/m² et on a relevé les résultats pour un pas variable (0.1), on voit clairement que la puissance réagit correctement avec la variation de l'éclairement pour se stabiliser au point de puissance max par la commande MPPT et on remarque que on atteint le point de fonctionnement MPP plus rapide

II.4.3. Simulation du système PV avec MPPT (P&O) utilisant convertisseur buck :

La figure (II-20) Représente le schéma global d'un système photovoltaïque composé d'un module PV avec convertisseur Buck commandé en MPPT de type P&O.

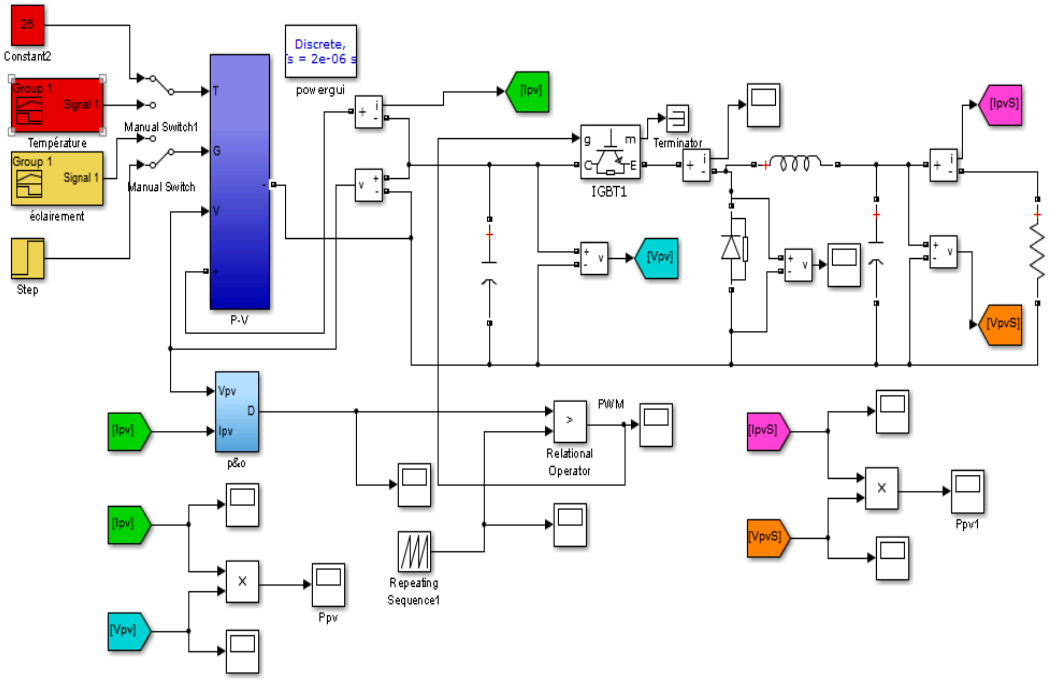


Figure-II- 20-Schéma MATLAB-SIMULINK d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT (P&O) et un convertisseur (DC/DC) type buck

II.4.3.1. Résultats de simulation :

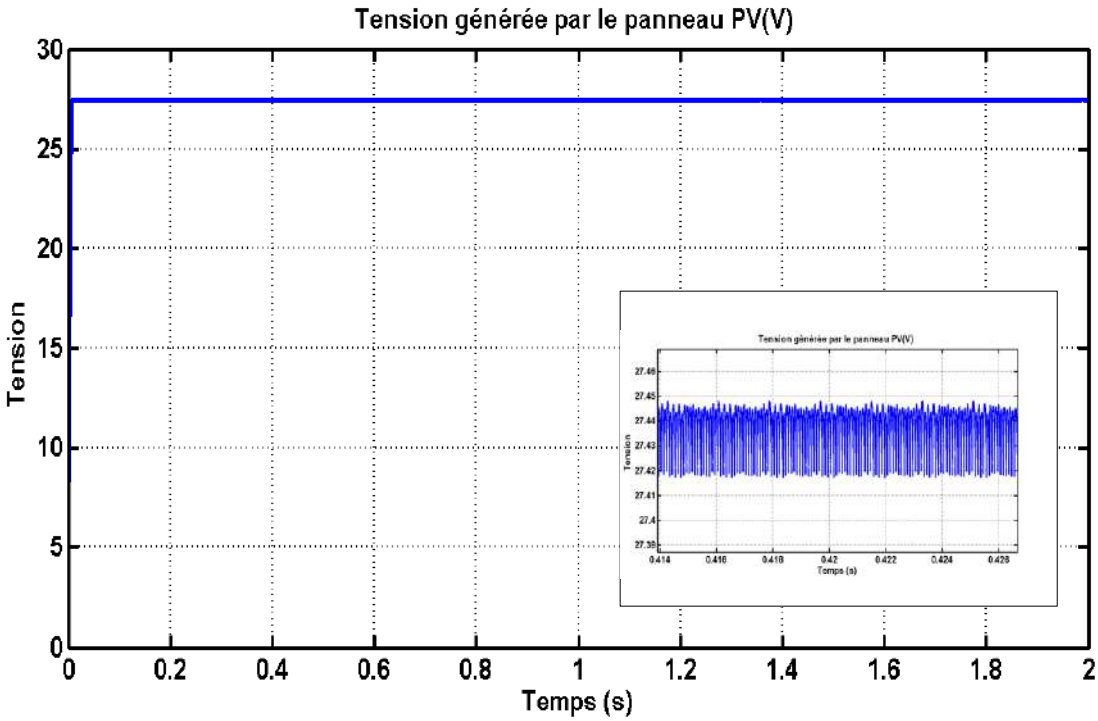


Figure-II- 21-Tension générée par le panneau PV

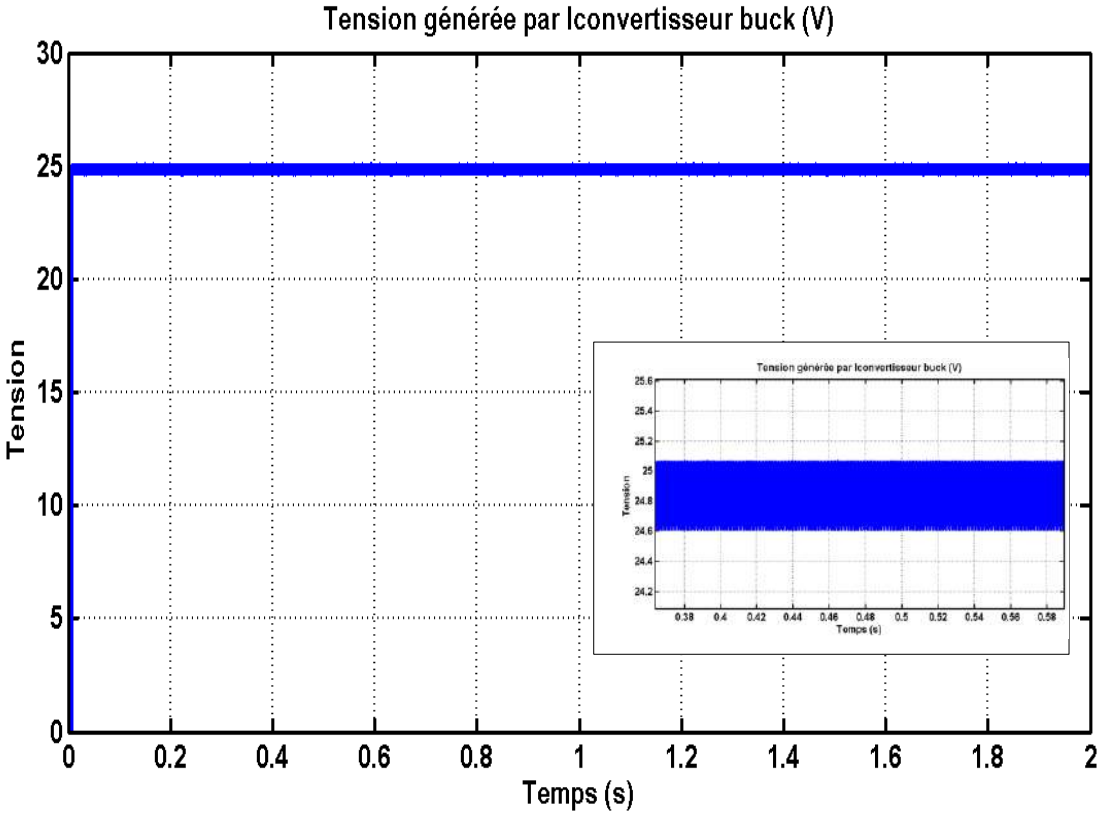


Figure-II- 22-tension de la sortie du convertisseur buck

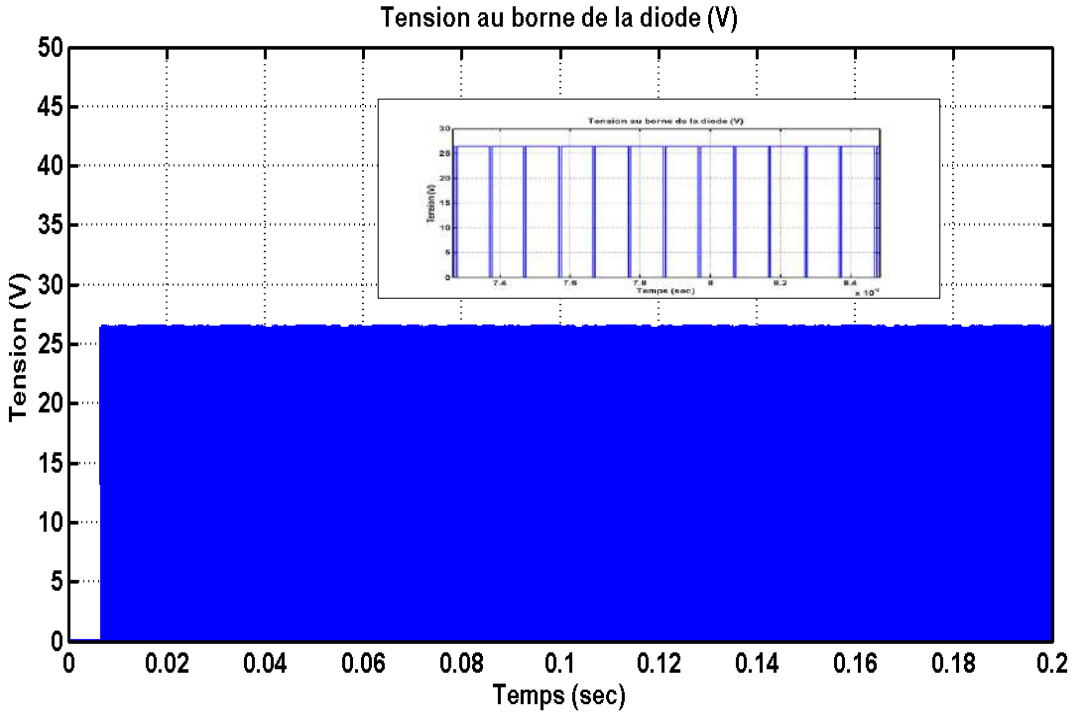


Figure-II- 23-Tension à la borne de la diode

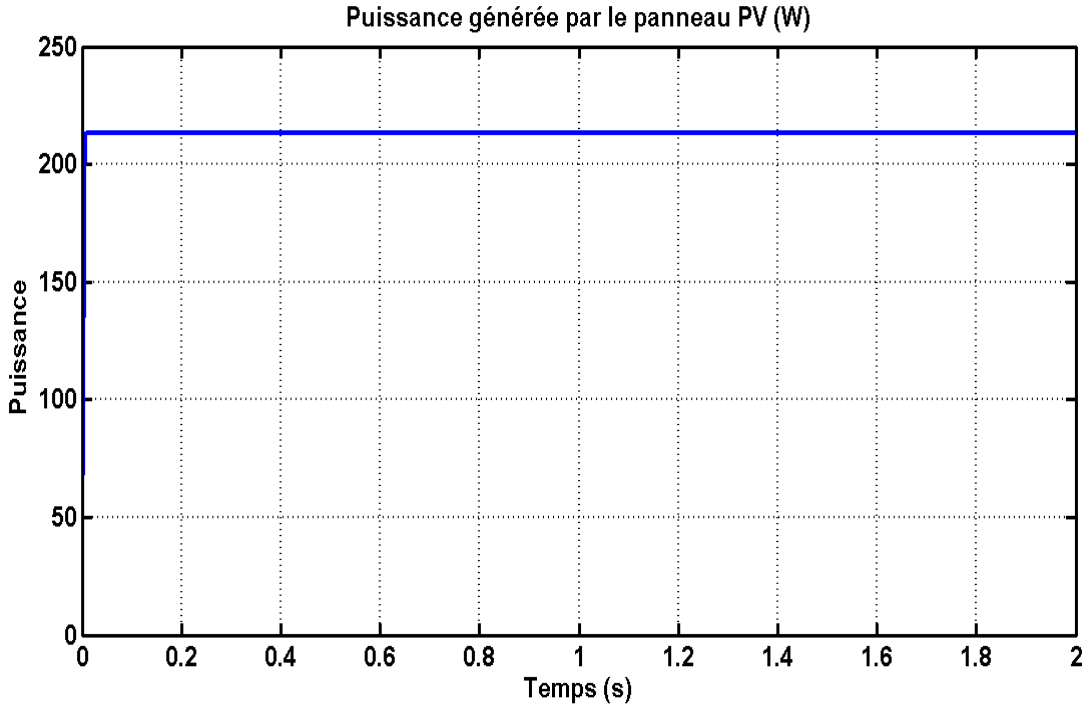


Figure-II- 24-Tension générée par le panneau PV(V)

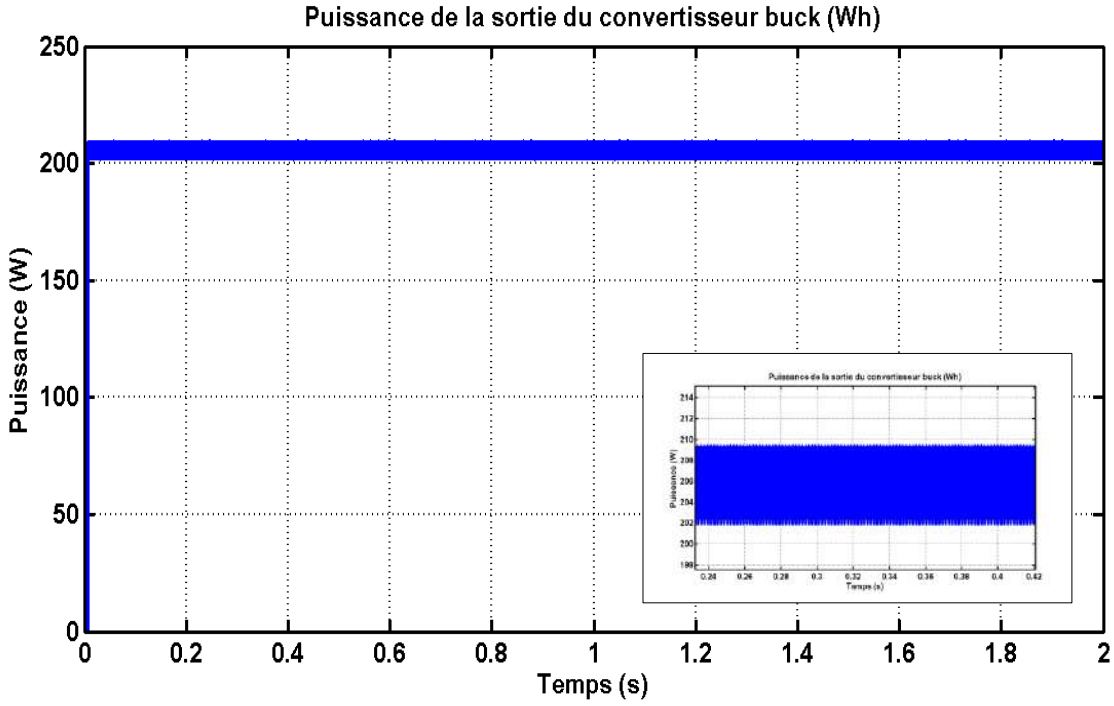


Figure-II- 25-Puissance de la sortie du convertisseur buck (W)

Les figures (II.21), (II.22), (II.24) et(II.25) représentent la tension, et la puissance d'entré et de sortie du convertisseur Buck.

Ces résultats montrent que l'hacheur Buck et la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Le convertisseur Buck fournie une tension à sa sortie inferieur à celle fournie par le générateur photovoltaïque et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le fonctionnement des convertisseurs Boost et Buck commandé par la commande MPPT avec méthode de P&O, ces convertisseurs est simulés en utilisant la boîte outil Sim Power System du Matlab/Simulink Version 2013. D'après les résultats obtenus, on remarque que le convertisseur DC-DC (Boost) et (Buck) et la commande MPPT effectuent correctement ses rôles d'atteindre le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une stratégie de contrôle à trois niveaux de suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un convertisseur Boost à trois niveaux (TLB) pour un système photovoltaïque (PV) à deux étages basé sur un contrôle prédictif de modèle (MPC). Cette méthode permet un contrôle rapide et précis grâce à l'établissement d'un modèle de prédiction et à la minimisation d'une fonction de coût. Dans ce travail, on extrait d'abord un modèle prédictif à trois niveaux pour le convertisseur Boost, puis on propose un algorithme de contrôle prédictif utilisant la méthode Perturbation et Observation (P&O), et ensuite on ajoute à la boucle de contrôle l'équilibre de tension du point neutre du convertisseur. Selon la méthode proposée, puisque l'onduleur n'est pas obligé de contrôler la tension du point neutre de la liaison du circuit intermédiaire, sa modulation peut être utilisée pour réaliser d'autres contrôles du côté alternatif pour améliorer le fonctionnement du réseau. Les résultats du plan de contrôle ont été vérifiés par Matlab / Simulink, et les résultats ont été conformes aux attentes [15].

III.2 Modèle prédictif de convertisseur Boost standard à deux niveau :

Le convertisseur Boost standard à deux niveaux a été modélisé et contrôlé en temps discret dans [29].La modélisation en temps discret d'un convertisseur Boost à trois niveaux pour les systèmes éoliens a été proposée dans [30]. En utilisant une topologie similaire, le convertisseur TLB(convertisseur Boost à trois niveaux) à utiliser dans un système photovoltaïque est illustré à la figure III-1.

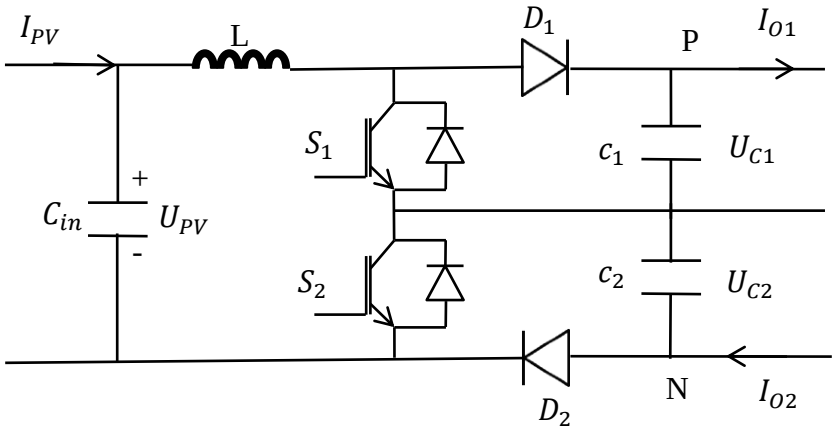


Figure III- 1-Topologie du convertisseur TLB

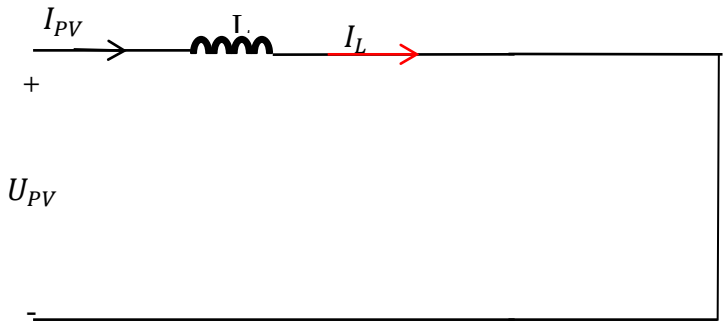


Figure III- 2-Le circuit équivalent pour S1=S2=1

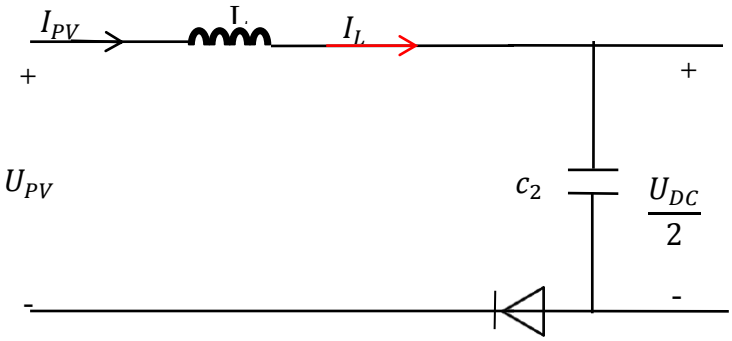


Figure III- 3-Le circuit équivalent pour S1=1et S2=0

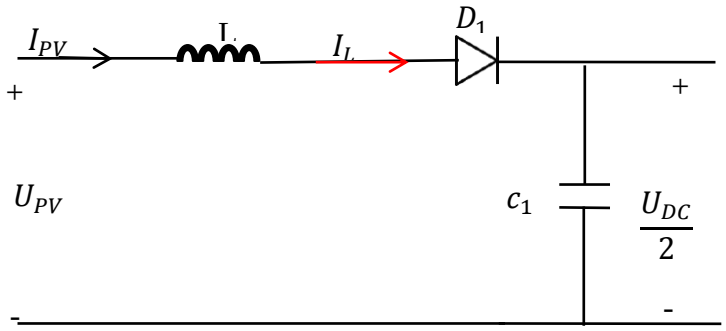


Figure III- 4-Le circuit équivalent pour S1=0et S2=1

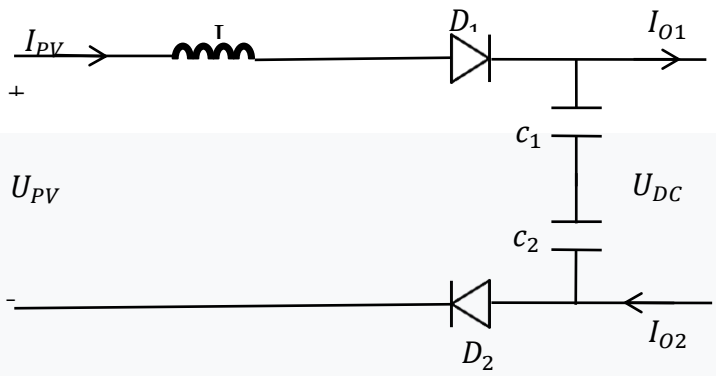


Figure III- 5-Le circuit équivalent pour S1=S2=0

Le convertisseur TLB a un total de quatre états de commutation correspondant aux deux interrupteurs: état A ($S1 = 1, S2 = 1$), état B ($S1 = 1, 2 = 0$), état C ($S1 = 0, S2 = 0$) , état D ($S1 = 1, S2 = 1$). Le circuit équivalent du convertisseur auquel 4 états de commutation différents correspondant sont représentés est présenté aux figures précédentes. En appliquant les lois KVL (*Kirchhoff's Voltage Law*) et KCL *(Kirchhoff's Current Law)*,la fonction système suivante, qui décrit la dynamique du courant de l'inductance du convertisseur et des tensions du condensateur du circuit intermédiaire, peut être obtenue:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_L \\ U_{c1} \\ U_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{(1-S_1)}{L} & -\frac{(1-S_2)}{L} \\ \frac{(1-S_1)}{C_1} & 1 & 0 \\ \frac{(1-S_1)}{C_2} & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_L \\ U_{c1} \\ U_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_{PV} \\ I_{o1} \\ I_{o2} \end{bmatrix} \qquad \text{III-1}$$

L'équation discrète du système peut être obtenue par les équations avancées d'Euler (III-2), (III-3) (III-4) .Ts est l'instant d'échantillonnage.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{I_L(K+1) - I_L(K)}{T_S} \qquad \text{III-2}$$

$$\frac{dU_{c1}}{dt} = \frac{U_{c1}(K+1) - U_{c1}(K)}{T_S} \qquad \text{III-3}$$

$$\frac{dU_{c2}}{dt} = \frac{U_{c2}(K+1) - U_{c2}(K)}{T_S} \qquad \text{III-4}$$

Le modèle prédictif discret peut être obtenu en introduisant (III-2), (III-3) (III-4) dans (III-1).L'équation (III-5) est le modèle de prédiction pour le système et elle est utilisée pour prédire la valeur du courant du conducteur et des tensions de condensateur dans chaque état de commutation possible à la prochaine période d'échantillonnage. Les résultats de prévision des quatre états de commutation possibles pour la période d'échantillonnage suivante sont évalués par la fonction de coût g. Les états des commutateurs seront comparés et celui qui minimise la fonction de coût est sélectionné et appliqué lors du prochain instant d'échantillonnage.

$$\begin{bmatrix} I_L(K+1) \\ V_{c1}(K+1) \\ V_{c2}(K+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T_S(1-S_1)}{L} & -\frac{T_S(1-S_2)}{L} \\ \frac{T_S(1-S_1)}{C_1} & 1 & 0 \\ \frac{T_S(1-S_1)}{C_2} & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_L(K) \\ V_{c1}(K) \\ V_{c2}(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_S}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T_S}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{T_S}{C_2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{in}(K) \\ I_{o1}(K) \\ I_{o2}(K) \end{bmatrix} \qquad \text{III-5}$$

III.3 Stratégie de contrôle des TLB :

III.3.1 Contrôle prédictif du modèle

A partir de (III-5),c'est évidemment que $I_l(K+1)$,$U_{C1}(K+1)$ et $U_{C2}(K+1)$ peuvent être prédites,et la référence actuelle Ir peut être obtenue.Pour TLB, il y a quatre états de commutation. Par la prédiction des 4 états de commutation et la comparaison pour obtenir la solution optimale, TLB est contrôlée.Basé sur le fait que la fonction de coût est obtenue:

$$g = w_1(I_r - I_l(K+1))^2 + w_2(V_{C1}(K+1) - V_{C2}(K+1))^2 \quad \text{III-6}$$

La fonction de coûts se compose de deux parties, qui ont des coefficients de pondération différents. Selon [30], le facteur de pondération est très important pour la fonction de coût g. Pour la stratégie de commande Boost, l'objectif de commande principal est MPPT, et donc le facteur de pondération $\omega 1$ est 1. L'objectif secondaire est d'équilibrer la tension des condensateurs de liaison DC. Le facteur de pondération $\omega 2$ est défini comme étant l'importance des facteurs suivants le deuxième objectif de contrôle par rapport au premier. Si $\omega 2$=1, l'objectif secondaire aura la même importance par rapport à l'objectif primaire, de sorte qu'un très bon équilibre de la tension du condensateur de la liaison DC peut être obtenu, mais au détriment d'une plus grande erreur MPPT. Lorsque $\omega 2$=0, la tension des condensateurs de la liaison DC sera incontrôlée, mais le MPPT affichera un excellent suivi de référence. Malheureusement, dans l'étude de contrôle prédictif actuelle, aucune donnée mathématique ne peut être utilisée pour calculer les valeurs des facteurs de pondération afin d'obtenir les meilleurs résultats. Après plusieurs expériences de simulation, $\omega 2$ a été fixé à 0,3 dans ce travail. La figure III-6 montre le schéma bloc de contrôle global pour les PPM.

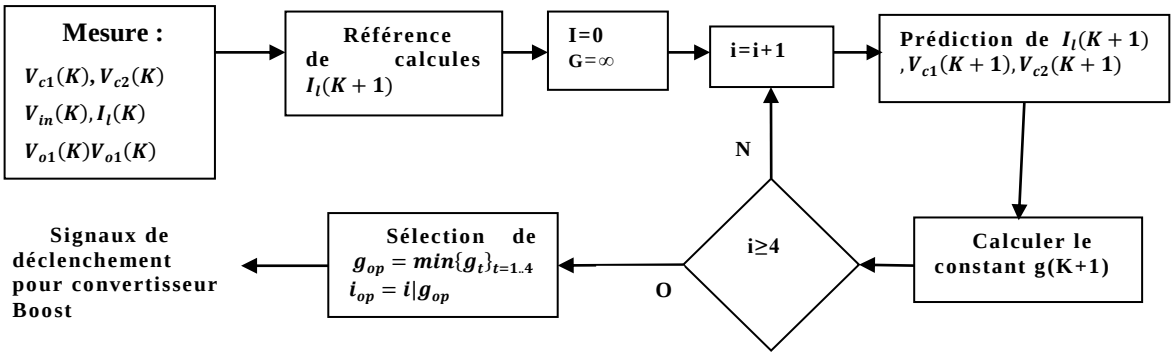


Figure III- 6-la Boucle de régulation pour MPC

III.4 3.3. Simulation et résultats :

Afin de vérifier l'efficacité de la stratégie de contrôle sur les postes de travail haute tension, un modèle de simulation a été construit dans Matlab / Simulink. Le type de module PV utilisé dans la simulation est 1Soltech 1STH-215-P. La chaîne parallèle est de 5 et les modules connectés en série sont de 20 par chaîne pour simuler des applications haute tension. Les paramètres du module sont indiqués dans le tableau 1. Les paramètres du système sont indiqués dans le tableau 2. La température a été réglée sur 25℃. Au départ, l'intensité lumineuse est de 300 W/$m2$, à t=0.8s change instantanément à 600 W/$m2$, et change à 1000 W/$m2$ à t=1.6s. Afin de vérifier que le point neutre est équilibré en fonction de la stratégie de commande, la tension du condensateur a été réglée déséquilibrée lors de la phase initiale. Et une perturbation de courant a été ajoutée au C1 à 1.0s.

Le modèle TLB intégré à Simulink est illustré à la Figure III-7, le MPPT et l'algorithme de contrôle prédictif sont illustrés à le tableau III-3. Les résultats de la simulation sont présentés à la figure III-8 et III-10.

Paramètres du module	Valeur
Puissance maximale (W)	213,15
Cellules par module (Ncellules)	60
Tension à vide Voc (V)	36,3
Courant de court-circuit Isc (A)	7,84
Tension à la puissance maximale Vmp (V)	29
Courant au point de puissance maximum Imp (A)	7,35
Coefficient de température de Voc (%/deg.C)	-0,36099
Coefficient de température Isc (%/deg.C)	0.102

Tableau III- 1-Paramètres du module PV

Paramètres du système	**Valeur**
Période d'échantillonnage	$\boldsymbol{Ts}$=$\mathbf{100}\boldsymbol{\mu s}$
Augmentation de la valeur de référence actuelle	$\Delta\boldsymbol{I}$=$\mathbf{1}\boldsymbol{mA}$
Fréquence de commutation des commutateurs	$\boldsymbol{fs}$=$\mathbf{10}\boldsymbol{KHz}$
Condensateur du filtre d'entrée	$\boldsymbol{Cf}$=$\mathbf{6000}\boldsymbol{\mu F}$
Inducteur de filtre d'entrée	$\boldsymbol{Lf}$=$\mathbf{50}\boldsymbol{mH}$
Dc condensateur de liaison	$\boldsymbol{C}\mathbf{1}$,=$\mathbf{5000}\boldsymbol{\mu F}$
Dc tension de référence de la liaison	$\boldsymbol{Vdc}*$=$\mathbf{1500}\boldsymbol{V}$

Tableau III- 2-Paramètres du système TLB

La Figure III-8 montre que la stratégie de contrôle a une vitesse de poursuite élevée et une grande précision, que le temps de poursuite n'est pas supérieur à 0,02s, que l'erreur de poursuite de puissance maximale est inférieure à 0,2% et que la stratégie de contrôle peut s'adapter aux changements rapides de l'environnement. Comme le montre la Figure II-17, bien qu'il y ait une perturbation au début et à t=1.0s, la tension du condensateur sera bientôt équilibrée en 0.1s. L'erreur de balance de tension est inférieure à 0,01%. Les résultats de la simulation montrent que la stratégie de contrôle peut assurer l'équilibre entre le point neutre du côté de la liaison DC et le point de puissance maximale du générateur PV.

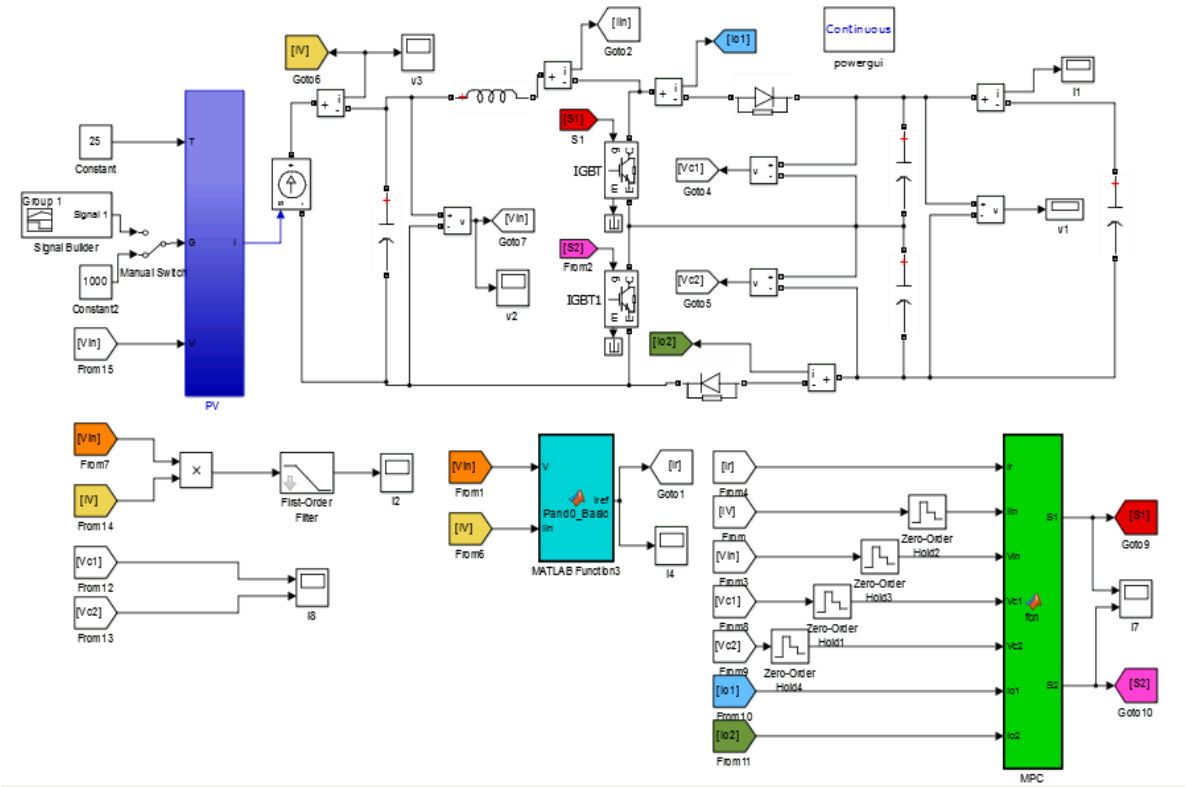


Figure III- 7-modèle TLB

```
function Iref = Pand0_Basic(V,Iin)
deltaI=0.009;
persistent Vold Pold Iold;
datatype = 'double';
if isempty (Vold)
    Vold =0;Pold =0;Iold=Iin;
end
P=V*Iin;% P=V*Iold
dV=V - Vold;dP=P - Pold;
    if dP < 0
        if dV < 0
            Iref=Iold - deltaI;
        else
            Iref=Iold + deltaI;
        end
    else
        if dV < 0
            Iref=Iold + deltaI;
        else
            Iref=Iold - deltaI;
        end
    end

end
Iold=Iref;Vold=V;Pold=P;
```

Tableau III- 3-Algorithme de commande.

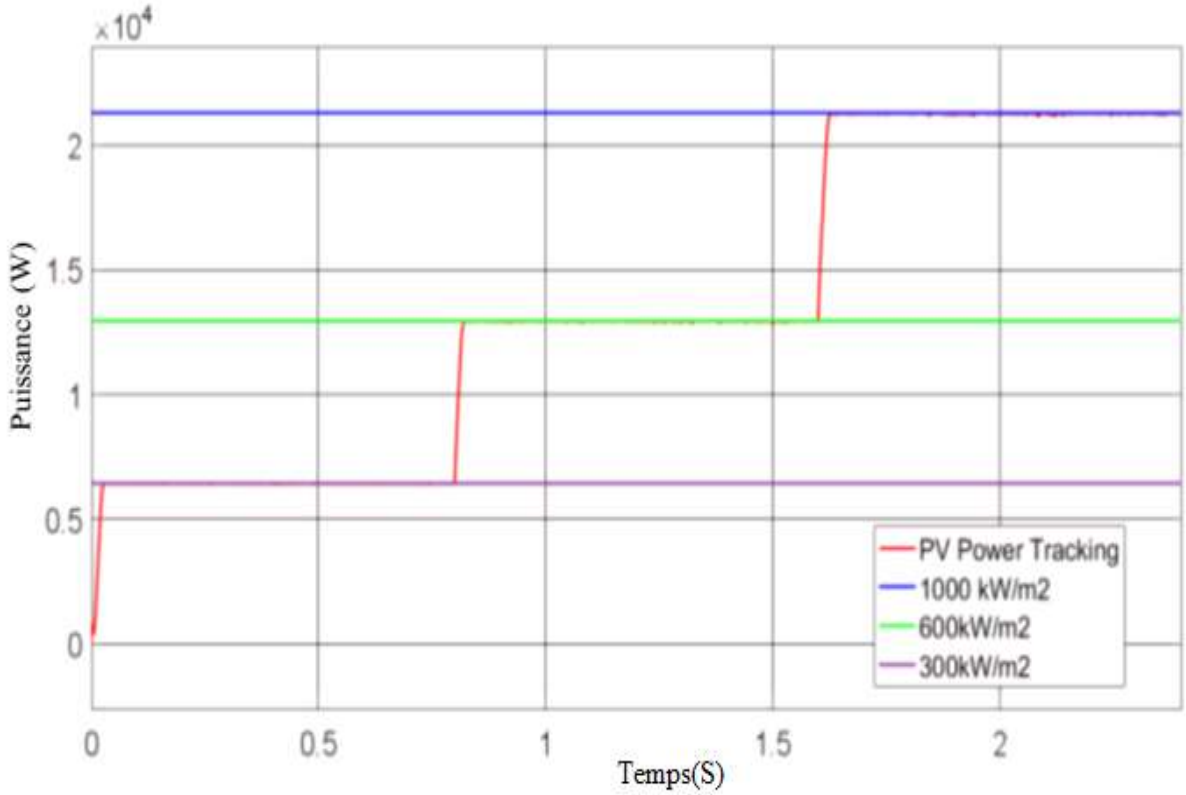


Figure III- 8-Puissance de sortie du générateur photovoltaïque

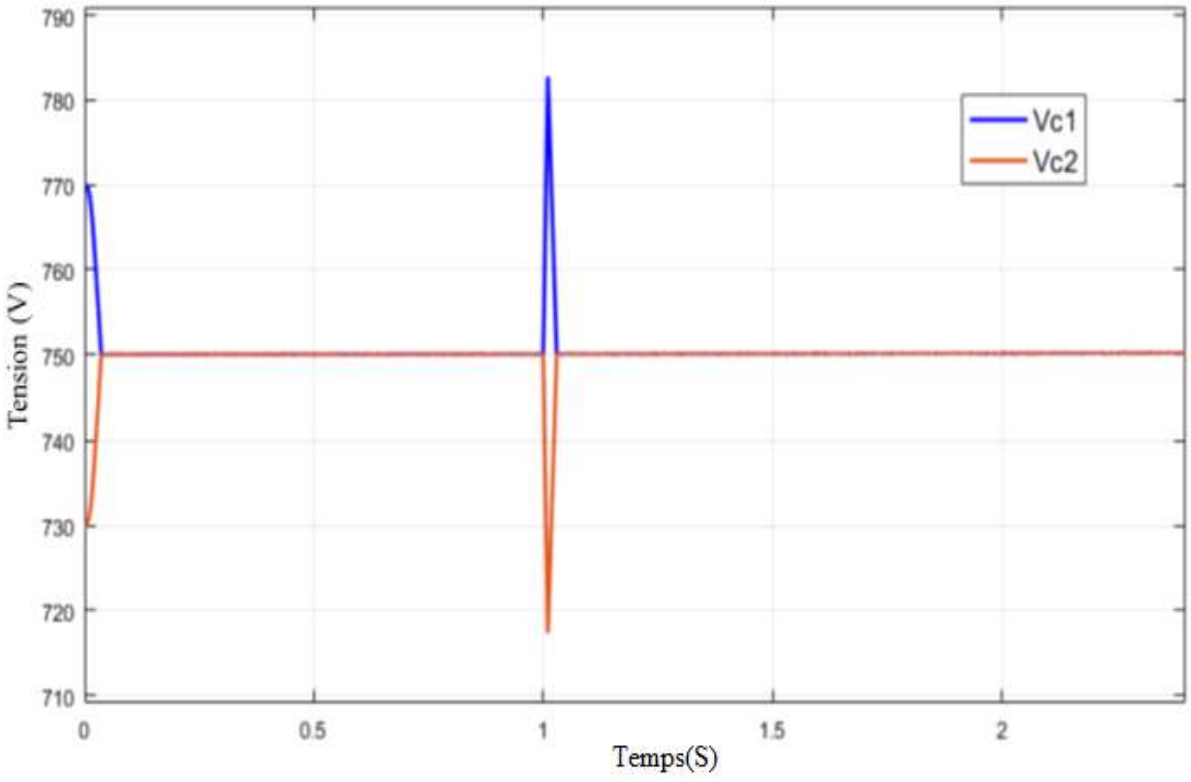


Figure III- 9-Balance de tension de condensateur

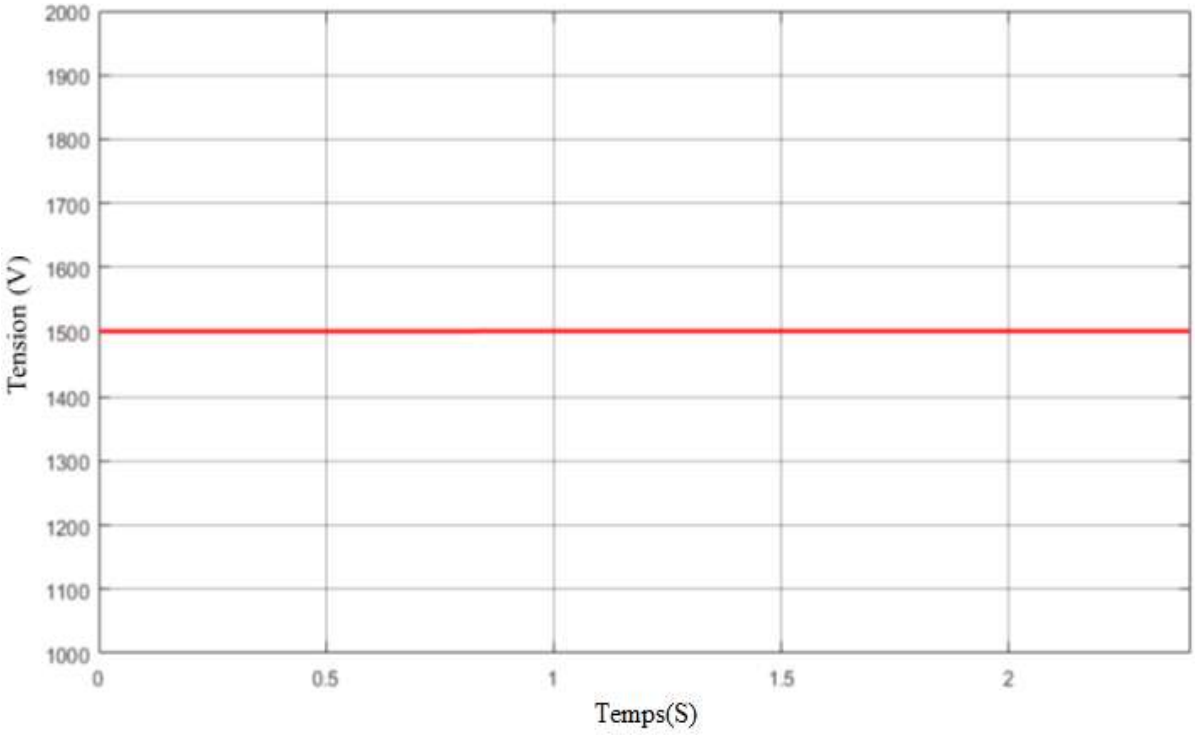


Figure III- 10-Tension du bus DC

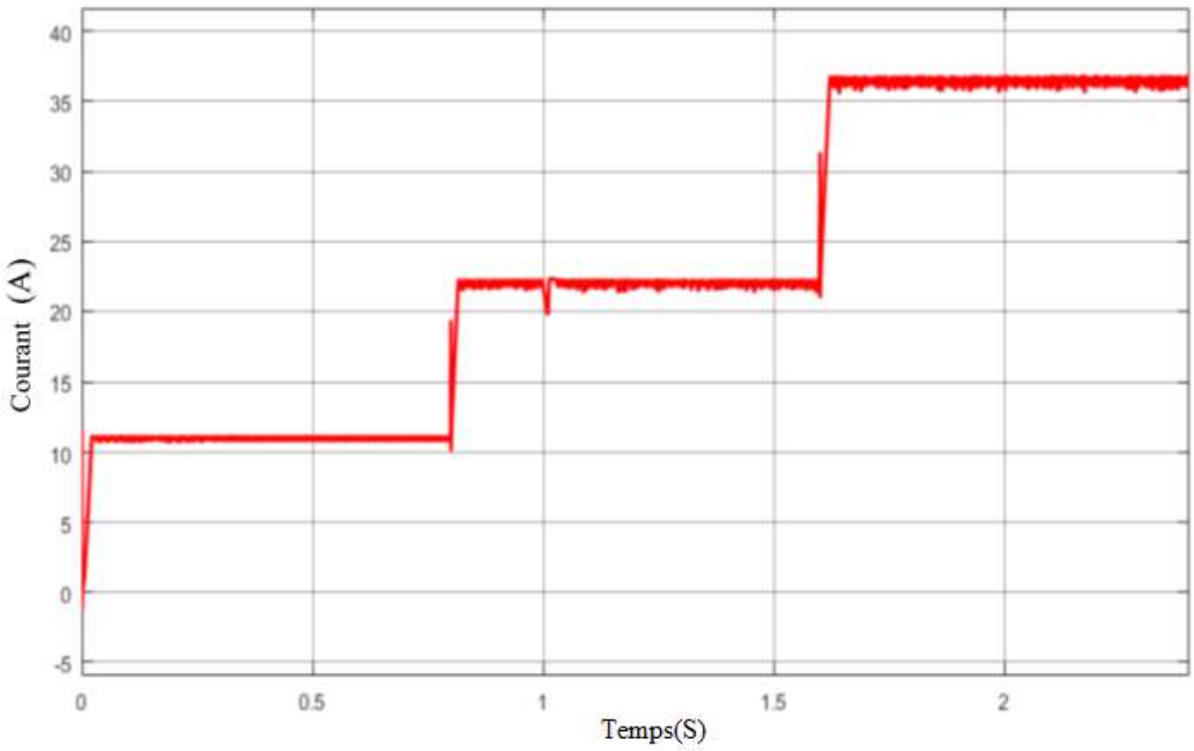


Figure III- 11-Courant photovoltaïque

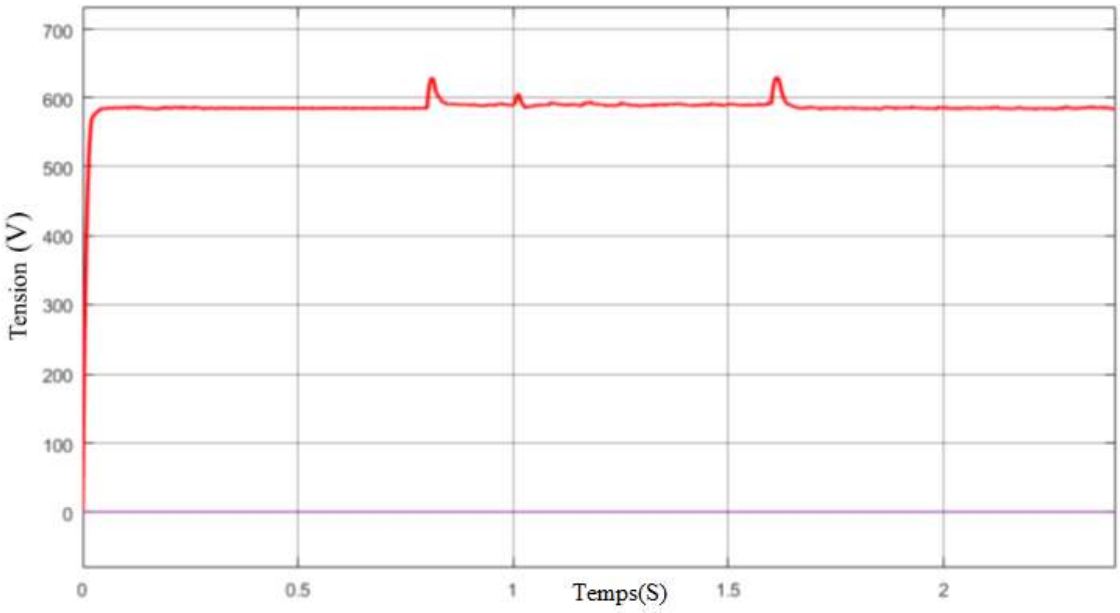


Figure III- 12-Tension du générateur photovoltaïque

La stratégie de contrôle met principalement en œuvre deux cibles de contrôle : Equilibre MPPT et tension du point neutre de la capacité. Pour ce faire, un modèle prédictif du convertisseur élévateur de tension à trois niveaux a été utilisé en combinaison avec la méthode P&O (Perturb et Observe) pour minimiser une fonction de coût prenant en compte à la fois l'équilibre de tension du point neutre et le MPPT. Les simulations ont montré l'efficacité de la stratégie de contrôle en termes de précision et de vitesse. Comme le modèle prédictif est potentiellement sensible aux paramètres du système, les travaux futurs porteront sur la sensibilité de la commande aux changements d'inductance ainsi qu'aux condensateurs de la TLB.

III.5 Conclusion :

Les systèmes PV traditionnels basés sur des convertisseurs DC/DC boost ont des problèmes tels qu'une capacité de suralimentation limitée du côté DC ainsi qu'une stratégie de commande complexe du côté de l'onduleur. L'utilisation de convertisseurs élévateurs de tension à trois niveaux (TLB) avec une stratégie de contrôle appropriée permet non seulement de surmonter ces problèmes, mais aussi d'équilibrer les tensions des condensateurs de liaison DC, donnant ainsi à l'onduleur plus de liberté pour améliorer la qualité de l'énergie côté réseau. Dans le présent chapitre, nous proposons un schéma MPPT basé sur la TLB pour un système PV à deux étages utilisant la technique de commande MPC (Model Predictive Control).

Conclusion générale

Notre travail c'est porté sur la commande d'un système photovoltaïque, nous avons décrit la nécessité d'étudier la caractéristique du modèle du générateur photovoltaïque, en présentant l'influence du couplet (ensoleillement, température) sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$, $P_{pv}(V_{pv})$ ainsi que la nécessité de faire l'assemblage des panneaux soit en série, soit en parallèle. Après nous avons présenté quelques configurations des systèmes photovoltaïques.

En deuxième chapitre, nous avons étudié la commande MPPT, son principe, nous avons développé la méthode dite perturbe et observe pour la mise en œuvre, cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Puis nous avons fait une application de la commande MPPT choisie sur le système PV associant panneau PV – hacheur – charge pour une variation de la température. Les résultats de simulation montre un fonctionnement satisfaisant malgré les faibles oscillations sur la tension et la puissance générée et au niveau de la charge.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties les constituant **:** la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques **:** le hacheur survolteur (Boost) et dévolteur (Buck), permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT

Dans la troisième chapitre, nous avons représenté le principe de fonctionnement d'un convertisseur boost a trois niveau associé à la commande prédictive, on a présenté la simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble « générateur PV, convertisseurs, MPPT » La stratégie de contrôle met principalement en œuvre deux cibles de contrôle : Equilibre MPPT et tension du point neutre de la capacité. Pour ce faire, un modèle prédictif du convertisseur élévateur de tension à trois niveaux a été utilisé en combinaison avec la méthode P&O (Perturb et Observe) pour minimiser une fonction de coût prenant en compte à la fois l'équilibre de tension du point neutre et le MPPT

Bibliographies

[1] *Mohamed Ansoumane Camara* Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs, thèse de doctorat 4 juillet 2011

[2] *Petit.Pierre* Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques thèse de doctorat 06 juillet 2011 .

[3] *Nichiporuk Oleksiy* Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités thèse de doctorat 03 mai 2005

[4] *DOUMANE RADHIA* Modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation thèse de doctorat 2018

[5] *Y AMINA AZZOUG* Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque thèse de doctorat 2008

[6] *KHENFER RIAD* Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques thèse de doctorat

[7] T.T. *Guingane, Z. Koalaga, E. Simonguy,F. Zougmore, D. Bonkoungou* Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB/SIMULINK 2016

[8] *Ashish N.Agrawal,* (Hybrid Electric Power System in Remote Arctic villages: Economic and Environmental Analysis for monitoring Optimization And Control), University of Alaska Fairbanks. 2006

[9] *D.Rekioua, Z.Roumila, T.Rekioua*, (Etude d'une centrale hydride photvoltaique – eolien – diesel), Revue des Energies Renouvelables vol 11 N°4 - 2008.

[10] *Mhamed Rebhi , Boufeldja kadri, Mabrouk Sellam, Ali Benatillah* Simulation et Réalisation d'un étage MPPT Pour un Système hybride PV- Diesel . November 2010.

[11] *Jui-Liang,Ding-Tsair Su, Ying-Shing Shiao* (Research on MPPT and Single Grid-connected for photovoltaic system) WSEAS Transactions on Systems, Issue 10, vol .10 ,october 2008

[12] *GUELLAL Amar[1], MOKHTARI Abderrahmane[2], KHERCHI Mohamed* La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA Octobre 2016

[13] DJERIOU.S, «Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone», MAGISTER, Soutenu le 03/07/ 2011

[14] *Adel Mellit, Soteris A. Kalogirou "*MPPT-based artificial intelligence techniques for photovoltaic systems and its implementation into field programmable gate array chips: Review of current status and future perspectives", Energy Volume 70, 1 June 2014, Pages 1–21

[15] *Irtaza M. Syed, Kaamran Raahemifar* Model Predictive Control of Three Phase Inverter for PV Systems 2015

[16] *Fu Wang , Zhou Lin, Guo Ke*, et al. Research on engineering analytical model of solar cells [J], Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10) : 211-216.

[17] *Yu Shijie, He Huiruo, Cao Renxian*. A Comparison between CVT and MPPT Control in Photovoltaic Water Pumping System. Acta Energiae Solaris Sinica. Vol. 19, No. 4, pp. 394-398, October 1998.

[18] J. *H. Lee, H. S. Bae, and B. H. Cho*, "Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size," in Proc. IEEE 12th Int. Power Electron. Motion Control Conf., Aug. 2006, pp. 603–607.

[19] *Fangrui Liu,Shanxu Duan,Fei Liu, Bangyin Liu and Yong Kang*," A variable step size inc mppt method for pv systems ,"IEEE Trans .[nd .Electron, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, July 2008.

[20] *D. Lalili, A. Mellit, N. Lourci, B. Medjahed, and E. M. Berkouk*, "Input output feedback linearization control and variable step size mppt algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter," Renewable Enegry, vol. 36, no. 12, pp. 3282-3291, 2011.

[21] *N. Femia, G. Petrone, G. Spagnolo and M. Vitelli*, 'Increasing the Efficiency of P&O by Converter Dynamic Matching', 35th Annual IEEE Power Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

[22] *N. Femia, G. Petrone, G. Spagnolo and M. Vitelli*, 'Optimizing Duty Cycle Perturbation of P&O MPPT Technique', 35th Annual IEEE Power Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

[23] *J. H. Lee, H. S. Bae, and B. H. Cho*, "Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size," in Proc. IEEE 12th Int. Power Electron. Motion Control Conf., Aug. 2006, pp. 603–607.

[24] *Y. Huang, J. Wang, F. Z. Peng, and D. Yoo*, "Survey of the power conditioning system for PV power generation," in Proc. IEEE PESC, Jun. 2006, pp. 1–6.

[25] *E. Reiter, K. Ardani, R. Margolis,* and *R. Edge*, "Industry perspectives on advanced inverters for us solar photovoltaic systems: Grid benefits, deployment challenges, and emerging solutions," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Tech. Rep. No. NREL/TP-7A40-65063., 2015.

[26] *P. G. Barbosa, H. A. C. Braga, M. C. B. Rodrigues,* and *E. C. Teixeira*, "Boost current multilevel inverter and its application on single-phase gridconnected photovoltaic systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 4, pp. 1116–1124, Jul. 2006.

[27] *H. Beltran, E. Bilbao, E. Belenguer, I. Etxeberria-Otadui,* and *P. Rodriguez*, "Evaluation of storage energy requirements for constant production in PV power plants," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 3, pp. 1225–1234, Mar. 2013.

[28] *H. Wang and F. Blaabjerg*, "Reliability of capacitors for dc-link applications in power electronic converters - an overview," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578, Sept. 2014.

[29] *A. Sangwongwanich, Y. Yang,* and *F. Blaabjerg*, "High-performance constant power generation in grid-connected PV systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 3, pp. 1822–1825, Mar. 2016.

[30] *V. Yaramasu and B. Wu*, "Predictive control of a three-level boost converter and an NPC inverter for high-power PMSG-based medium voltage wind energy conversion systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 10, pp. 5308–5322, Oct. 2014.

[31] *O. Bourebia*, «Commande Prédictive Floue Des Systèmes Non Linéaires», Thèse De Doctorat, Université Mentouri De Constantine, 2011

[32] *A. Bezzini*, «Commande Prédictive Non Linéaire En Utilisant Les Systèmes Neuro-Flous Et Les Algorithmes Génétiques», Mémoire De Magister, Université Mohamed Khider De Biskra, 2013.

[33] *M.B. Ben Slimen*, «Conception De Lois De Commande Structurées (Hiérarchisées, Décentralisées) Pour Les Chaines De Traction Pilotées», Thèse De Doctorat, Université De Nantes, France, 2011.

[34] *N. Petit*, « Commande Prédictive », Notes De Cours Option Procède Environnement, Ecole Centrale Paris, 2005-2006.

[35] *A. Benbrahim*, «Commande Prédictive Généralisée D'une Machine Synchrone A Aimants Permanents», Mémoire De Magistère, Université De Batna, 2009

[36] *S. Meziane*, « Commandes Adaptative Et Prédictive De La Machine Asynchrone », Thèse De Doctorat, Université De Constantine, 2009

[37] *G. Idiri*, «Commande Prédictive Des Systèmes Non Linéaires Dynamiques», Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, 2011

[38] *S. Aouaouda*, «Modélisation Multimodèle Et Commande Prédictive D'une Station D'épuration », Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba (Ubma) ,2012.