

II.1 Introduction

Pour déterminer une stratégie de gestion appropriée d'un système photovoltaïque il faut, dans un premier temps, connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la modélisation des composants de ce système.

Dans ce chapitre, on développe les différents modèles mathématiques implémentés dans notre logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink, Entre autre le modèle du générateur photovoltaïque (GPV), le modèle de conversion (Hacheur Boost); l'algorithme ;onduleur MLI MPPT et on terminera par le modèle complet de notre système en discutant ses performances.

II.2 Système photovoltaïque proposé

La structure de la topologie d'interconnexion proposée est montrée dans la figure II.1 Cette topologie est constituée d'un :

***Générateur PV de type « KC200GT »** : est en silicium poly cristalline, constitué de 54cellules photovoltaïques élémentaires et de 10 modules insérées série parallèles. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 200.143 W, un courant de 7.61A, sous une tension optimale de 26.3V.

***Le quadripôle d'adaptation** est un convertisseur d'énergie de type – hacheur survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 72 V. permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum.

***La commande MPPT** (Maximum Power Point Tracking) : est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge stables .

Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur appropriée de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

***Onduleur** :l'onduleur utilisé est a deux niveaux qui relie le GPV a la chrge ou un réseau électrique.

***Une Charge AC** : modélisée par une charge résistive.

Le schéma fonctionnel du notre système se présente alors comme suit :

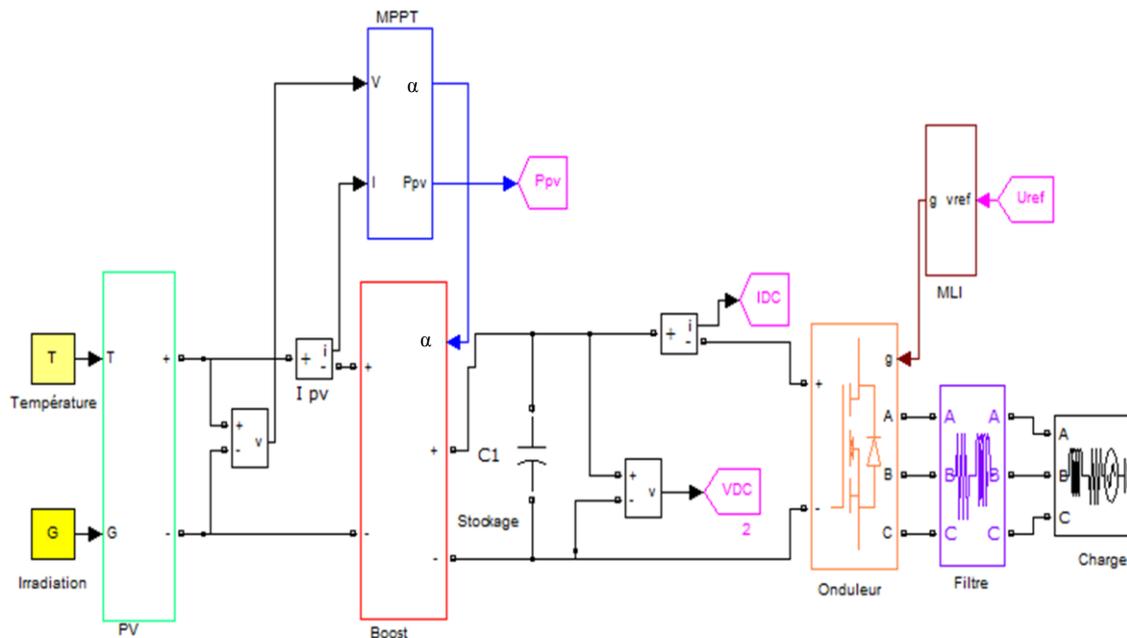


Figure II .1 : Shéma d'un système photovoltaïque avec une charge AC

II.3 Modélisation et simulation du Générateur Photovoltaïque

II.3.1 Modélisation du Générateur Photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un équipement mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque, composée d'un ou plusieurs modules. Ces modules sont formés d'un assemblage série /parallèle de cellules photovoltaïques, qui réalise la conversion d'énergie solaire en électricité afin de satisfaire les besoins en charge .

Nous nous intéressons uniquement aux propriétés électriques des générateurs photovoltaïques, et particulièrement à leur comportement en puissance qu'on le considère identique à celui d'une cellule. La figure II.2 représente le modèle électrique de littérature de Kaiser et Reiser standard à une seule diode (empirique) qui modélise la jonction PN défini par son courant de saturation I_0 et son facteur d'idéalité (A), une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_p représente le courant de fuite [13].

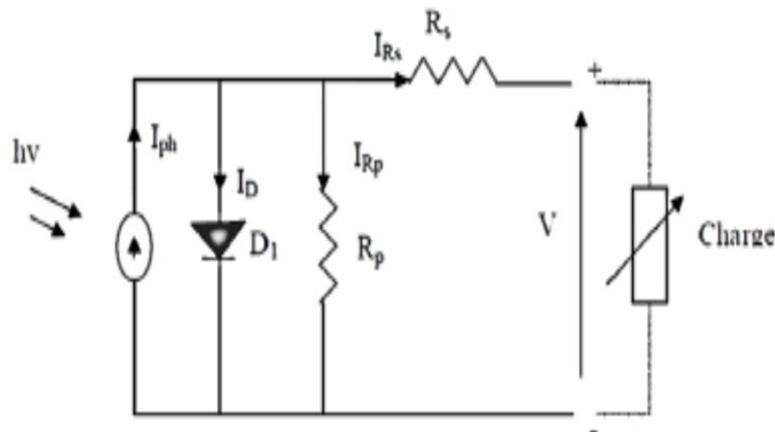


Figure II. 2 Schéma équivalent du modèle à une seule diode d'un GPV.

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I-V$ de la photopile:

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

* La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{A.K.T}} - 1 \right) \quad (\text{II-1})$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II-2})$$

$$= I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{A.K.T}} - 1 \right] - \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-3})$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II-4})$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{V_t \cdot a}} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{II-5})$$

Avec

I : Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_o: Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann (1,381 .10⁻²³ joule/Kelvin).

q:charge d'électron =1,602 .10⁻¹⁹ C.

T: La température de cellule en kelvin.

A : facteur de qualité de la diode.

V_t=NsKT /q est la tension thermique.

N_s : nombre des cellules séries.

N_p: nombre des cellules parallèles.

R_s : la résistance série.

R_p : la résistance parallèle.

(I_{scn}), qui est le courant maximal disponible aux bornes du dispositif pratique.

L'hypothèse $I_{cc} \approx I_{pv}$ est généralement utilisé dans des modèles photovoltaïques dans des dispositifs pratiques, car la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée. Le courant de la cellule photovoltaïque dépend linéairement au rayonnement solaire et est également influencée par la température selon l'équation suivante :

$$I_{pv} = I_{pv,n} + (K_I \cdot \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II-6})$$

I_{pv,n} : le courant générer au conditions nominaux (habituellement 25°C et 1000w /m²)

$T=T-T_n$ (étant T et T_n les températures réelles et nominales [K])

G [W / m²] est l' irradiation de la surface du dispositif et G_n

est l'irradiation nominale. Le courant I₀ de saturation de la diode et de sa dépendance à l'égard

la température peut être exprimée par (II-7):

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T} \right) \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{II-7})$$

Avec :

E_g est l'énergie de bande interdite du semi-conducteur (par ex ≈1.12 eV pour le Si polycristallin à 25 °C) et I_{0,n} est le courant de saturation nominale

$$I_{0,n} = \frac{I_{oc,n}}{\exp \frac{V_{oc,n}}{a \cdot V_t,n} - 1} \quad (\text{II-8})$$

avec

$V_{t,n}$ étant la tension thermique de N_s cellules connectés en série

à la température T_n nominale.

$$1 \leq A \leq 1,5$$

Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente, peut être améliorée si l'équation (II-7) est remplacé par :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{a \cdot V_T}\right) - 1} \quad (\text{II-9})$$

Le courant de saturation I_0 est fortement dépendant de la Température.

Les relations pour les points donnés sont :

Au court-circuit : $I_{sc} = I_{max} \rightarrow V_{oc} = 0$

Au circuit ouvert: $V_{oc} = V_{max} \rightarrow I_{sc} = 0$

Au point maximale $I_{mpv} = V_{mpv}$

II.3.2 Validation du model

Figure II.6 montre les circuits de modèle photovoltaïque mis en œuvre avec MATLAB / Simulink (en utilisant les SymPower Systems) en utilisant la stratégie de simulation

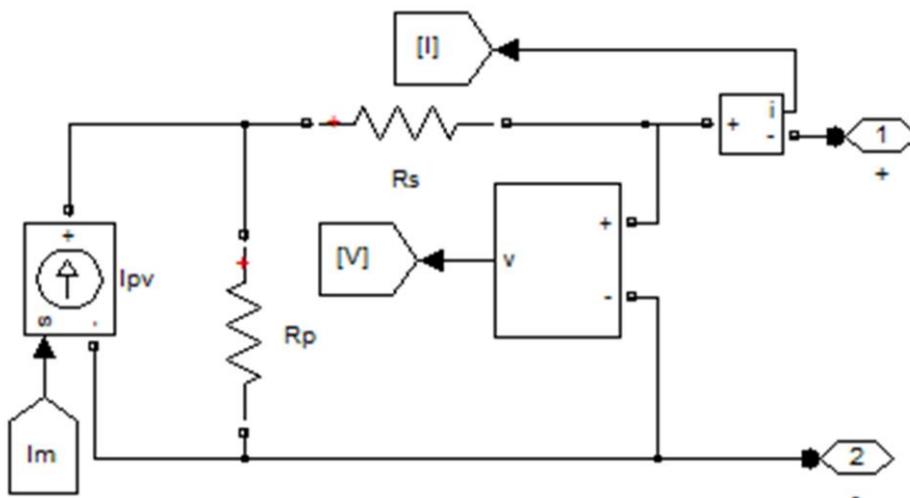
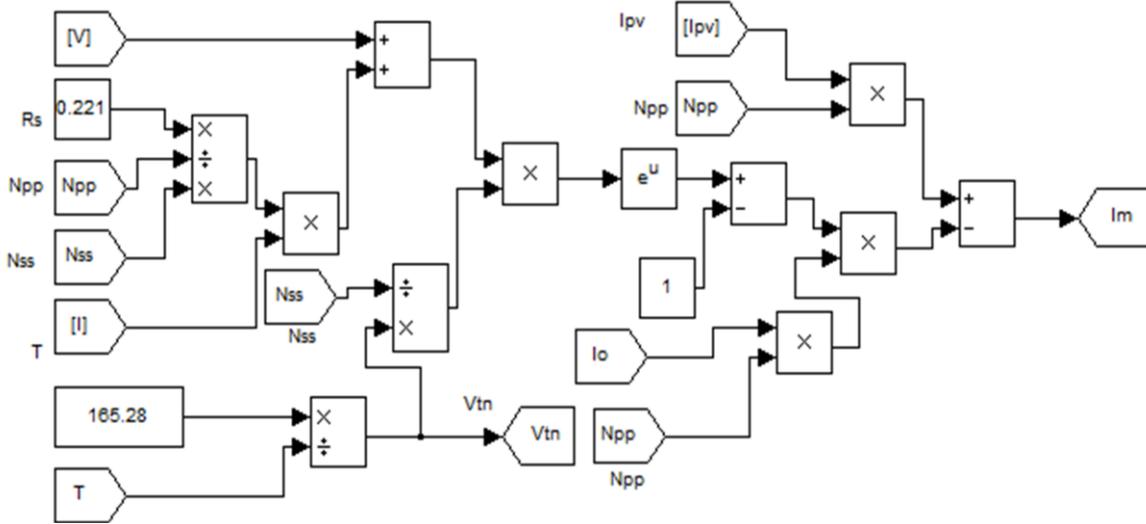
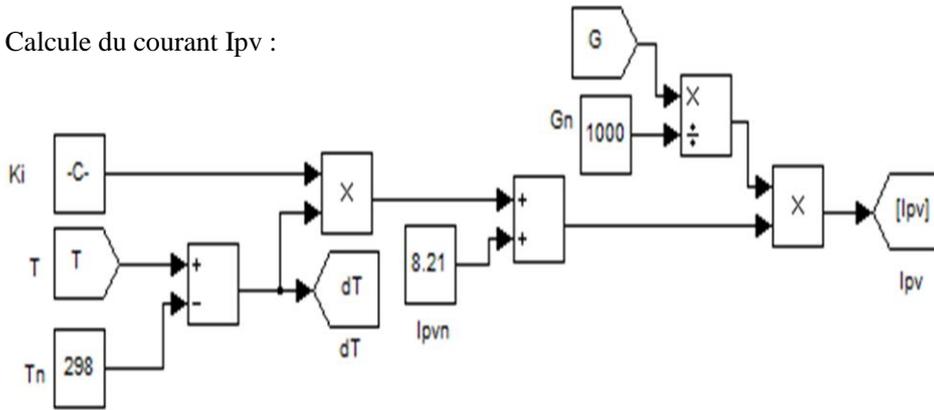


Figure II.3 : circuit équivalent d'un panneau photovoltaïque avec MATLAB

Calcul du courant I_m :



Calcul du courant I_{pv} :



Calcul du courant I_0 :

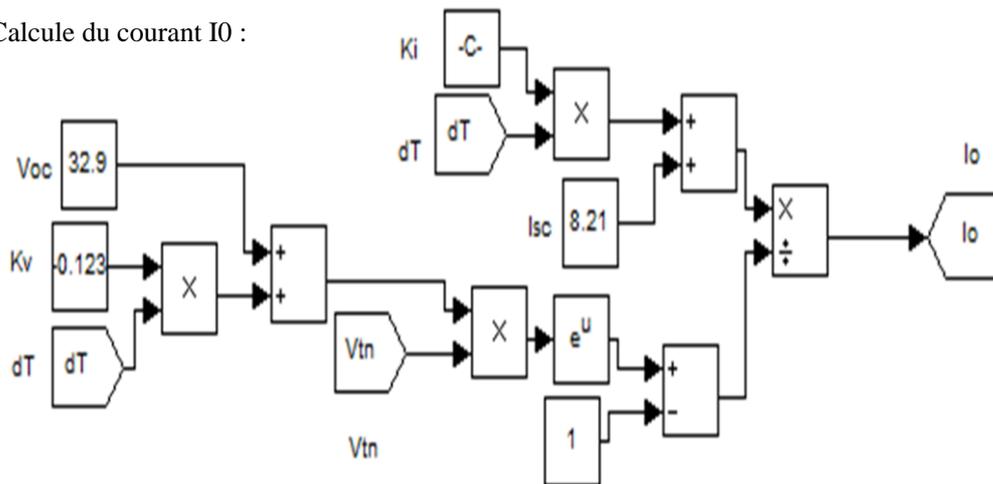


Figure II.4 : Schéma bloc de calcul du model de PV

La fiche technique du panneau KC200GT que nous avons choisi donne les spécifications suivantes .

Tableau. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau KC200GT Dans les conditions standards «CST»

| | |
|------|-------------------------|
| Imp | 7.61 A |
| Vmp | 26.3 V |
| Pmax | 200.143 W |
| Isc | 8.21 A |
| Voc | 32.9 V |
| I0 | $9.845 \cdot 10^{-8}$ A |
| Ipv | 8.214 A |
| A | 1.3 |
| Rp | 415.405 Ω |
| Rs | 0.221 Ω |

Nss : Nombre de module connecté en série

Npp : Nombre de module connecté en parallèle

Ns : Nombre de cellule connecté en série (dans notre cas =54)

Np : Nombre de cellule connecté en parallèle (dans notre cas =1)

II.3.3 Influence de la température

L'évolution de la caractéristique I(V) montre que le courant est faiblement dépendant de la température alors que la tension est très sensible à la variation de la température.

L'augmentation de la puissance va dans le sens inverse de T

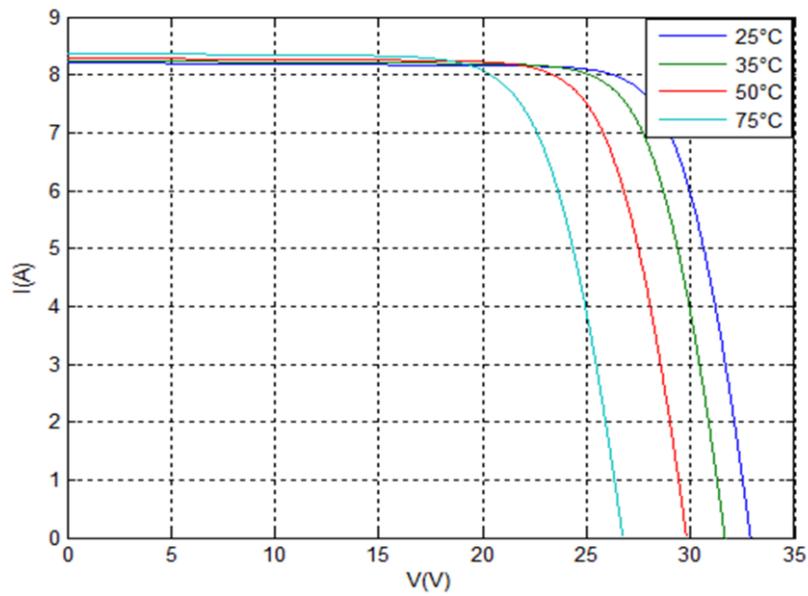


Figure II.5 : Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes température

Et la même chose pour la caractéristique $P(V)$ dans la figure II.6.

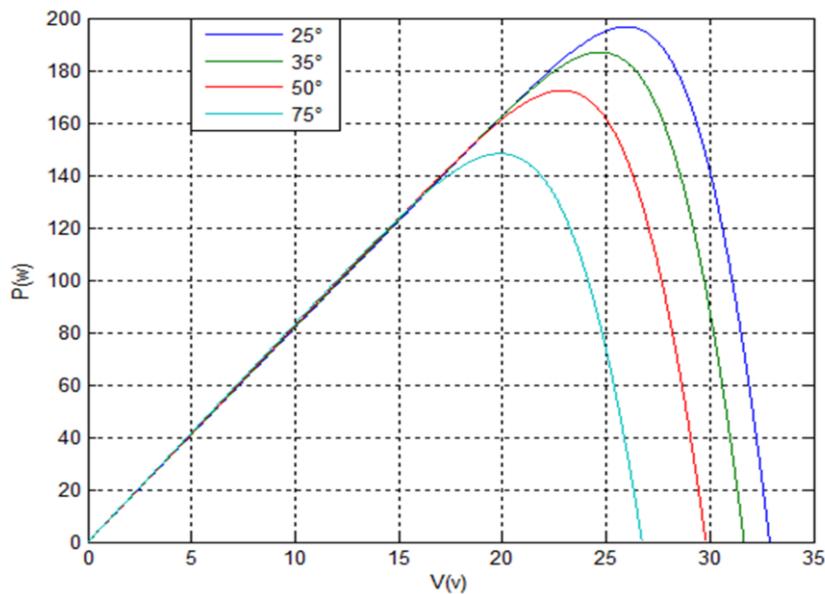


Figure II.6: Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes température

II.3.4 Influence de l'éclairement

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, les courbes $I-V$ se déplacent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante, figure II.7.

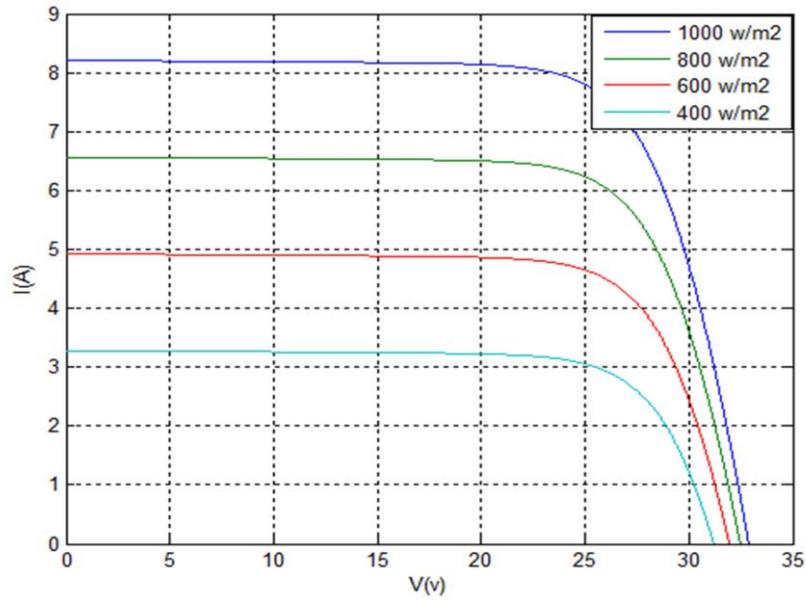


Figure II.7: Caractéristique I(V) d'un module pour différentes éclaircment solaires

Et la même chose pour la caractéristique P(V) dans la figure (II.8).

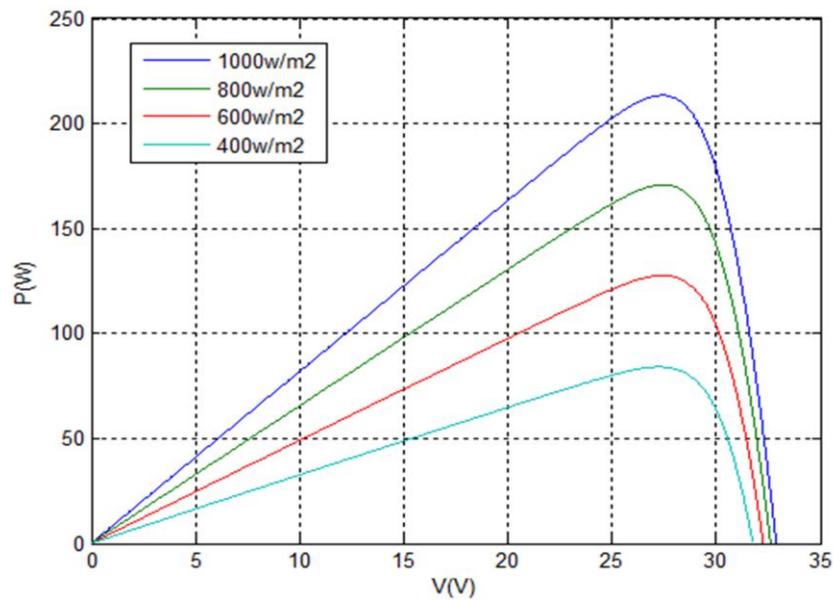


Figure II.8: Caractéristique P(V) d'un module pour différentes éclaircment solaires

II.3.5 Influence de la résistance série

Les performances d'une cellule sont d'autant plus dégradées que R_s est grande, la figure II.9 montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique P-V. cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $P=f(V)$

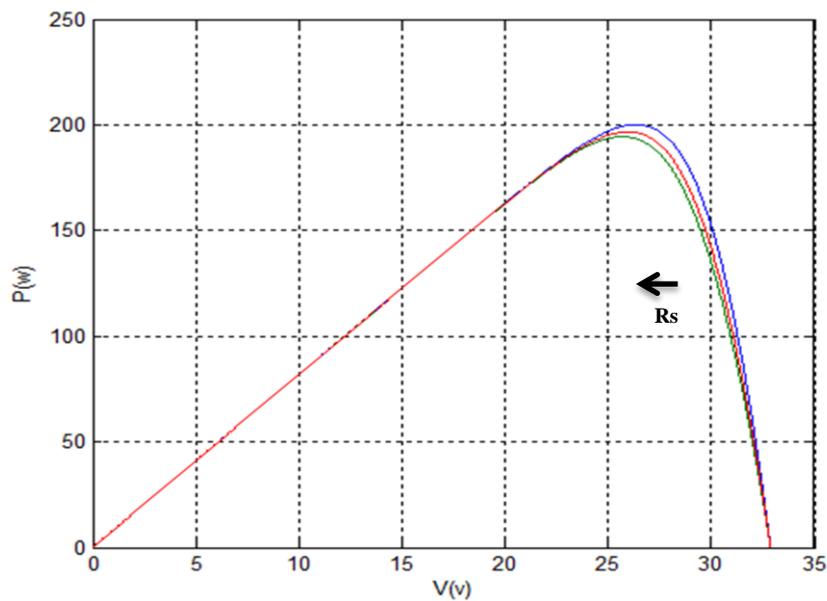


Figure II.9 : courbes $P(V)$ pour différentes valeurs de R_s

II.4 Modélisation et simulation de l'étage d'adaptation du GPV avec la charge

A fin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance

fournie par le générateur. L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survoltrice ou dévoltrice.

II.4.1 Modélisation d'un hacheur survolteur (boost)

Le système PV que nous voulons modéliser, comprend un hacheur Boost inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion dont la fonction essentielle est double: d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension fixe en une tension continue variable et en augmentant le niveau de la tension [14]) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source [15].

Nous considérons qu'un dispositif MPPT est intégré à la commande du hacheur son circuit de base est celui de la figure II.10.

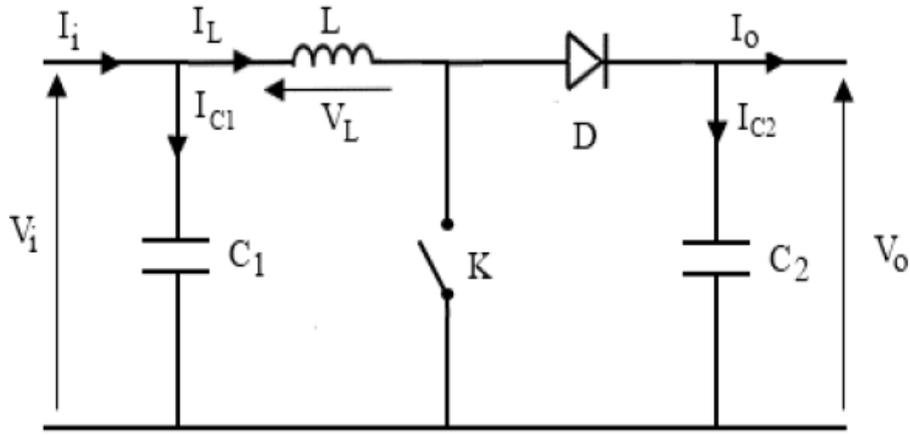


Figure II. 10 Schémas équivalents du hacheur survolteur.

Son principe de fonctionnement est basé sur la position du commutateur **K** ouvert/fermé,

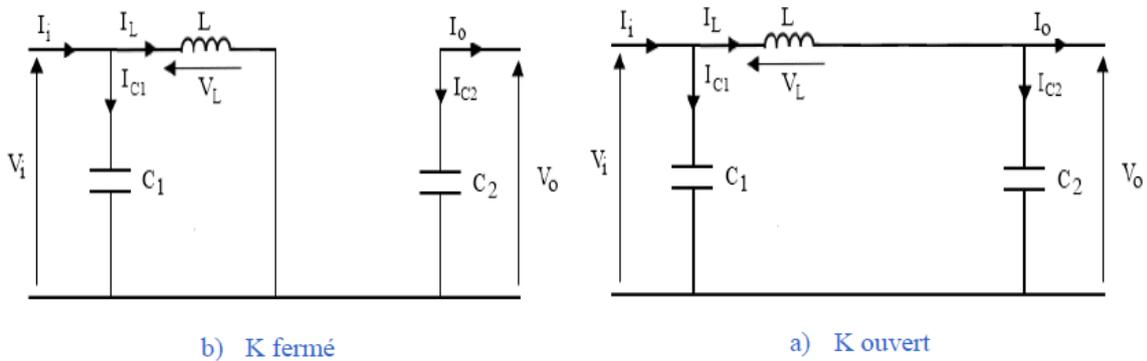


Figure II. 11 Schéma de principe d'un Boost.

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur figure II.11 des deux phases de fonctionnement donne [16] :

Pour la première période αTS :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) & (II. 10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) & (II. 11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_i(t) & (II. 12) \end{cases}$$

Pour la deuxième période $(1 - \alpha) TS$:

état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du BOOST est le suivant :

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) & (II. 13) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) & (II. 14) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) & (II. 15) \end{cases}$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et par une approximation de ces grandeurs à leurs valeurs moyennes, on obtient une forme simplifiée des équations (II.10) à (II.11) comme suit :

$$\begin{cases} I_{C1} = I - I_L & (II.16) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{C2} = -I_0 & (II.17) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_L = V_i & (II.18) \end{cases}$$

Tandis que les équations (II.13) à (II.15) donnent naissance aux équations simplifiées suivantes :

$$\begin{cases} I_{C1} = I - I_L & (II.19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{C2} = I_L - I_0 & (II.20) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_L = V_i - V_0 & (II.21) \end{cases}$$

En régime permanent i_{c1} , i_{c2} et V_L sont approchés à leurs valeurs moyennes donc :

$$\begin{cases} d.I_{C1,ON} = (1 - \alpha)I_{C1,OFF} \rightarrow d.I_{C1,ON} - (1 - \alpha)I_{C1,OFF} = 0 & (II.22) \end{cases}$$

$$\begin{cases} d.I_{C2,ON} = (1 - \alpha)I_{C2,OFF} \rightarrow d.I_{C2,ON} - (1 - \alpha)I_{C2,OFF} = 0 & (II.23) \end{cases}$$

$$\begin{cases} d.V_{L,ON} = (1 - \alpha)V_{L,OFF} \rightarrow d.V_{L,ON} - (1 - \alpha)V_{L,OFF} = 0 & (II.24) \end{cases}$$

Le système d'équations devient. De l'équation(II.19) et (II.22) :

$$\alpha(I - I_L + (1 - \alpha)(I - I_L)) = 0 \rightarrow I = I_L \quad (II.25)$$

De l'équation (II.17) et(II.23) :

$$\alpha(-I_0) + (1 - \alpha)(I_L - I_0) = 0 \rightarrow (1 - \alpha)I_L \quad (II.26)$$

De l'équation (II.18) et(II.22) ; (II.25) :

$$\alpha V_i + (1 - \alpha)(V_i - V_0) = 0 \rightarrow (1 - \alpha)V_0 \quad (II.27)$$

Le rapport de conversion est déduit :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{(1 - \alpha)} \quad (II.28)$$

Les équations de la tension et du courant en régime établie sont :

$$V_o = \frac{V_i}{1 - \alpha} \quad (II.29)$$

Cette équation montre que la tension V_o est en fonction du rapport cyclique α et supérieure à celle d'entrée V_i

$$I_o = (1 - \alpha)I_i \quad (II.30)$$

II.4.2 Simulation du hacheur survolteur

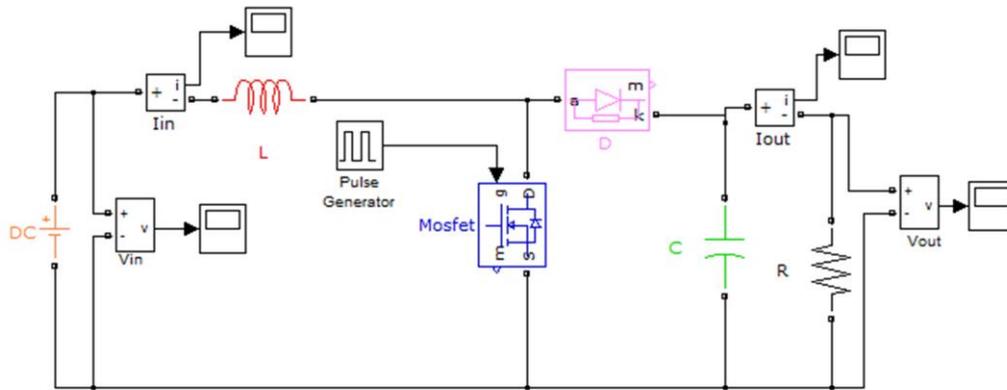


Figure II. 12 Schéma block d'un convertisseur survolteur.

II.4.3 Résultats de simulation

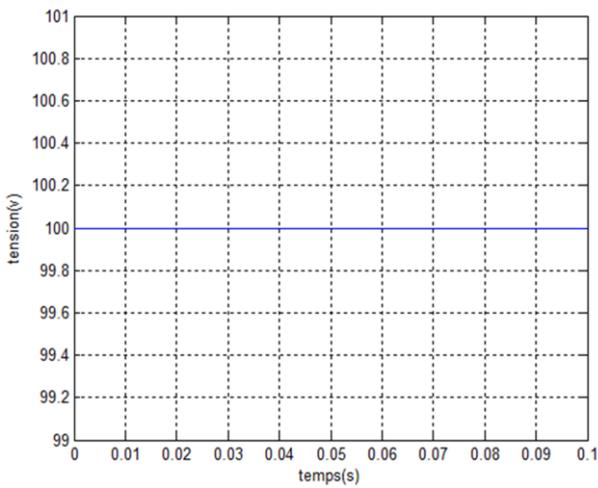


Figure II.13: Tension d'entrée du hacheur Boost

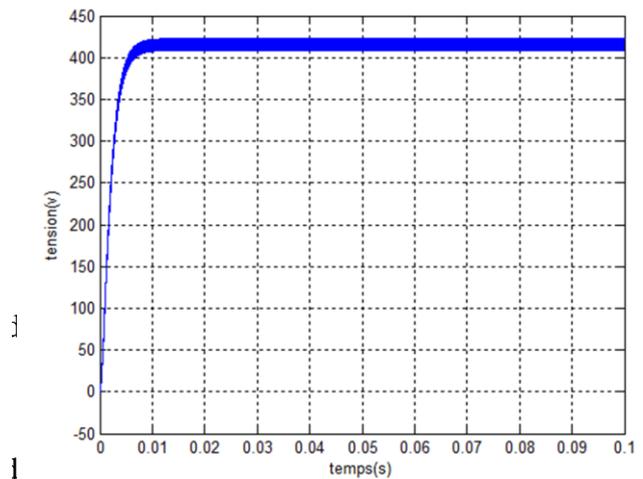


Figure II.14: Tension de sortie du hacheur Boost

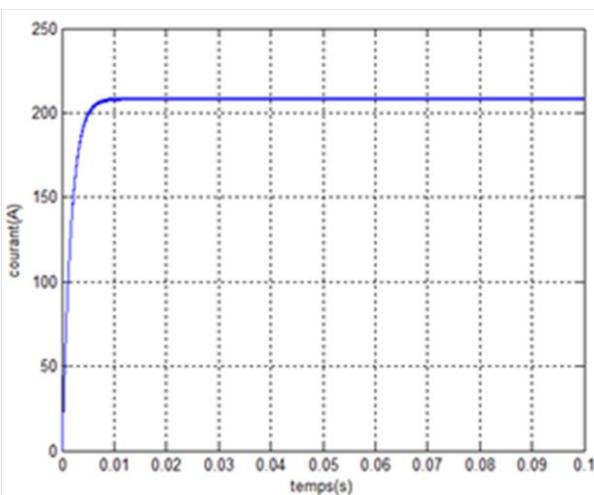


Figure II.15: Courant de l'inductance L

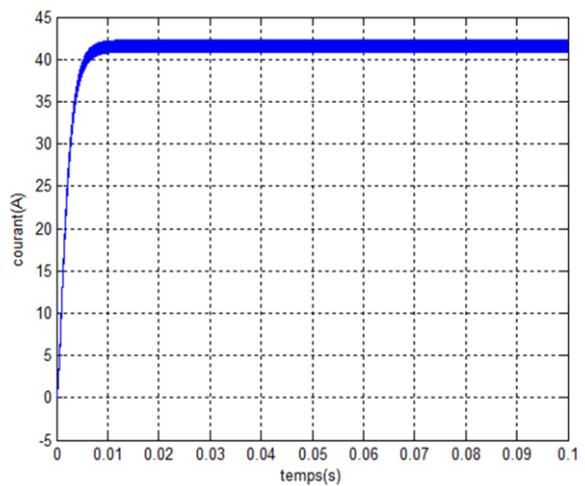


Figure II.16: Courant de sortie

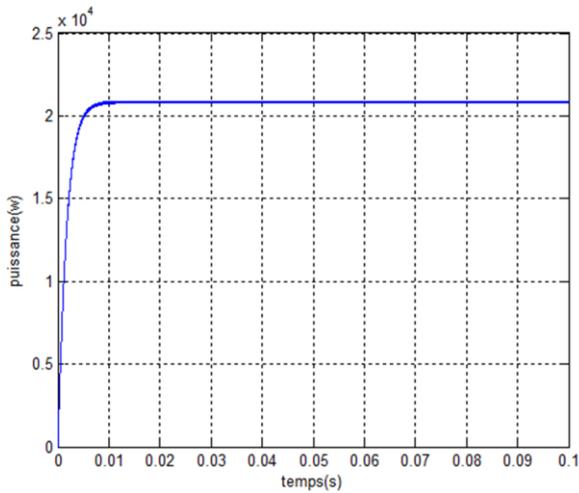


Figure II.17: Puissance d'entrée

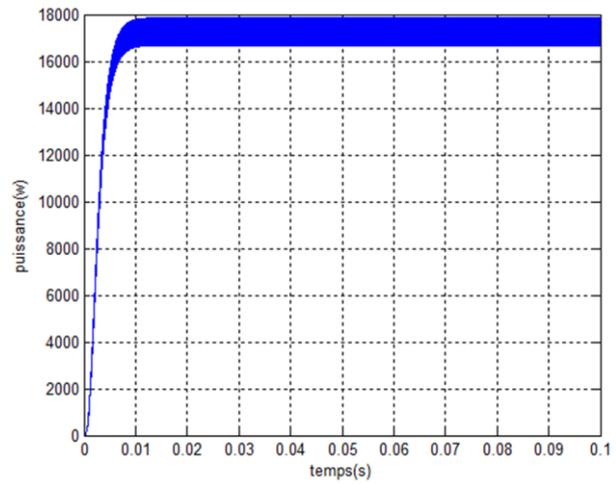


Figure II.18: Puissance de sortie

II.5 Commande pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules [17]. Il indique à un contrôleur de MPPT comment déplacer la tension d'opération. Puis, l'apporter à un niveau désiré et de la maintenir induisant une amélioration globale du rendement du système.

Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation-observation » qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur, assurant l'interface de puissance du générateur photovoltaïque et la charge.

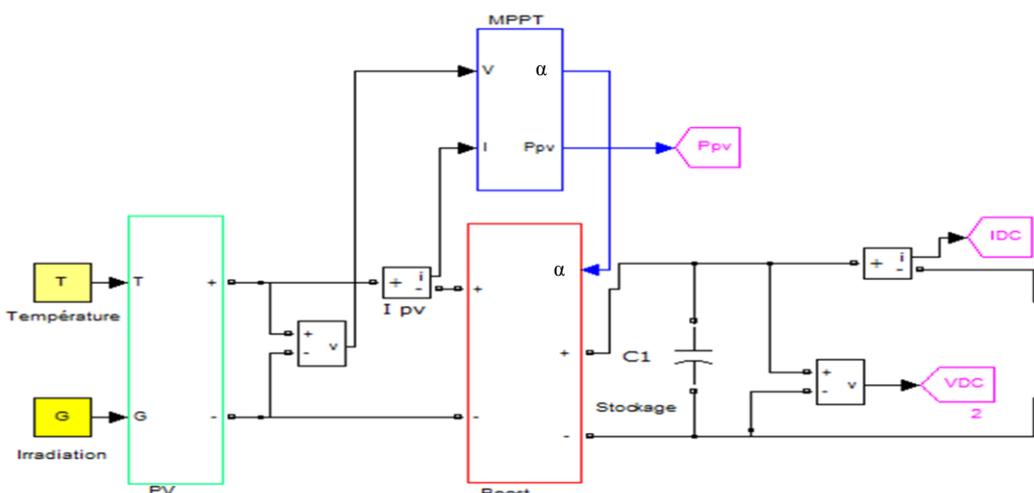


Figure II.19: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec sa commande.

II.6 Conception du système de poursuite du point optimum de fonctionnement (commande P&O)

II.6.1 Principe de la régulation

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension 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.22, 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.

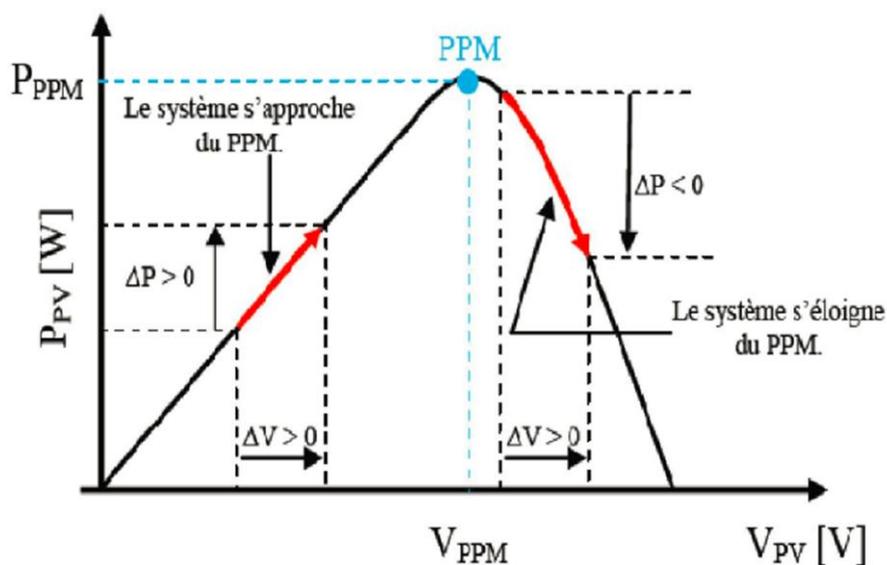


Figure II.20 : Principe de la régulation

IV.6.2 L'organigramme fonctionnel

L'organigramme fonctionnel de cet algorithme est le suivant :

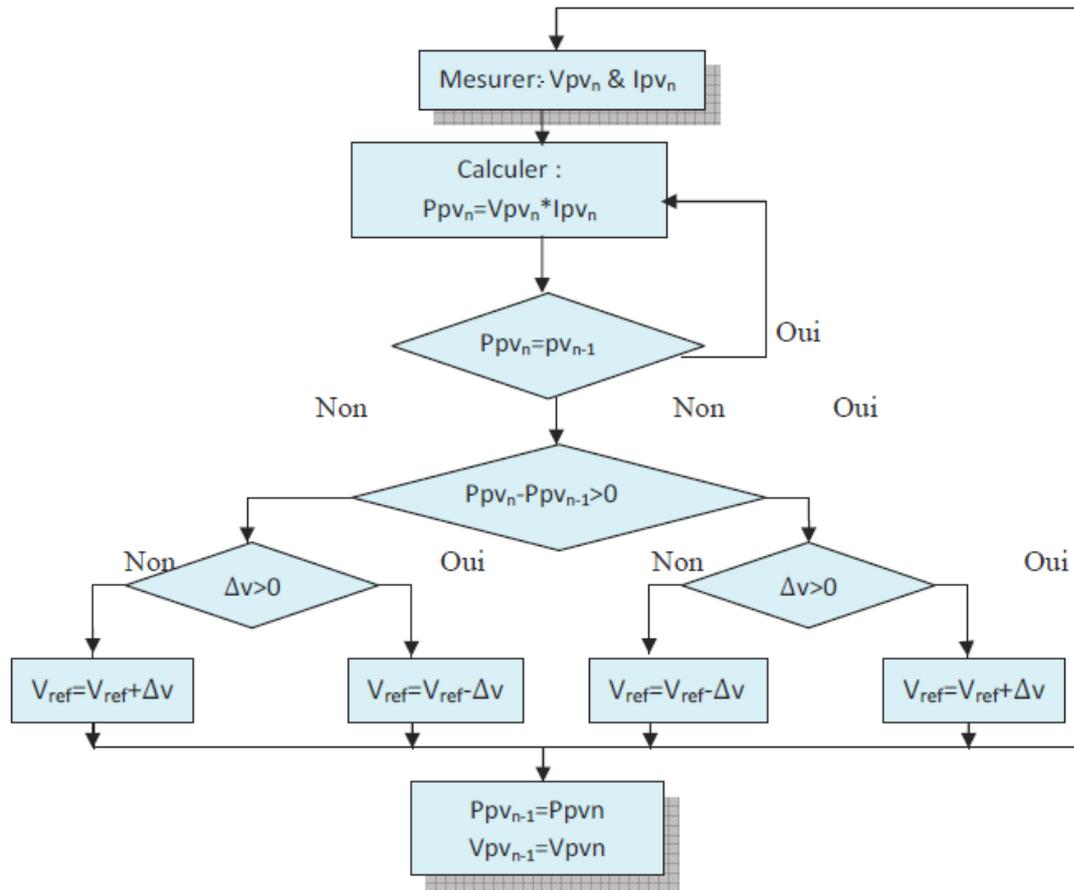


Figure II.21: Diagramme fonctionnel algorithme (P&O)

II.6.3 Simulation de la commande MPPT

L'implantation de cet algorithme sous l'environnement MATLAB/SIMULINK est présentée dans la figure suivante :

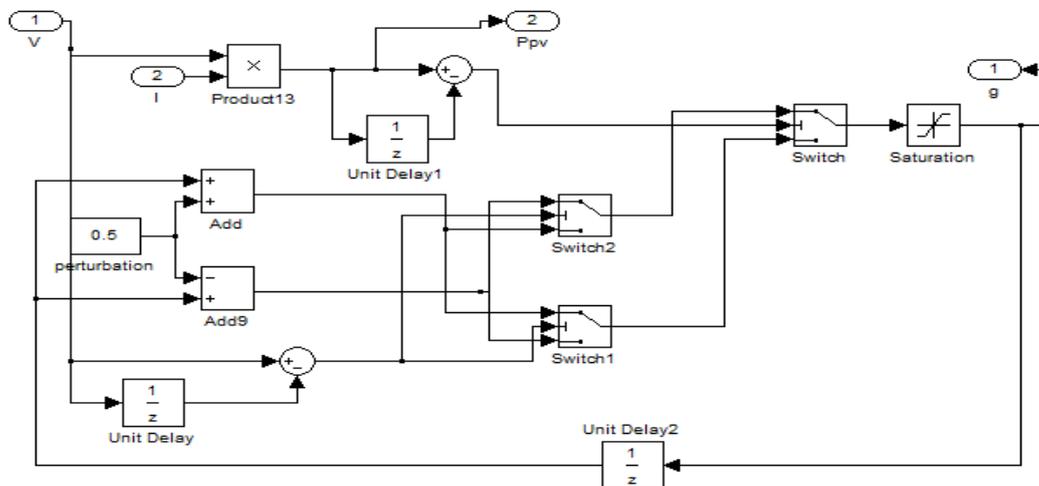


Figure II. 22: Modèle SIMULINK de la commande MPPT (P&O).

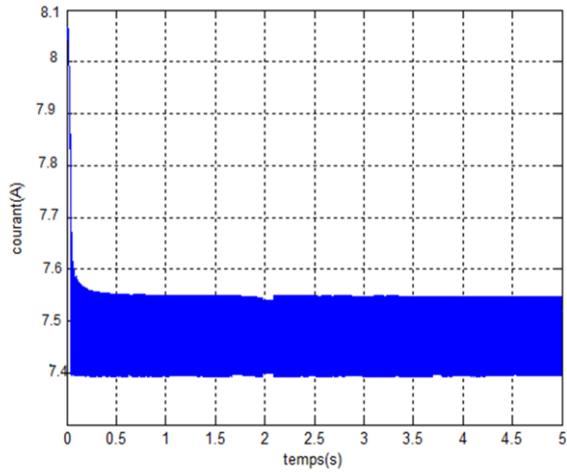


Figure II.23: Courant du panneau I_{pv} .

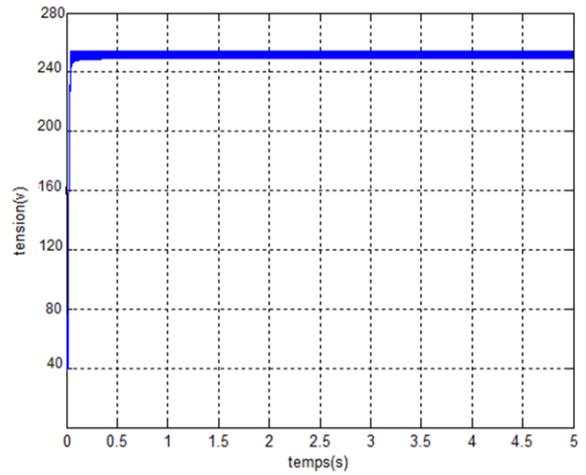


Figure II.24: Tension du panneau V_{pv} .

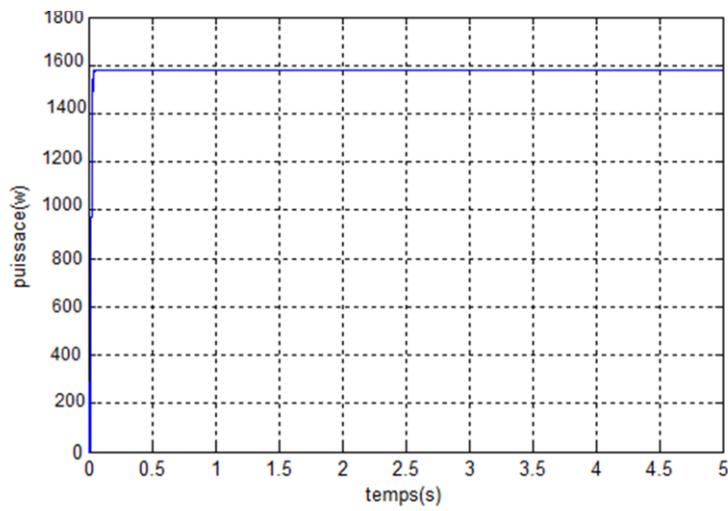


Figure II.25: la puissance du panneau P_{pv} .

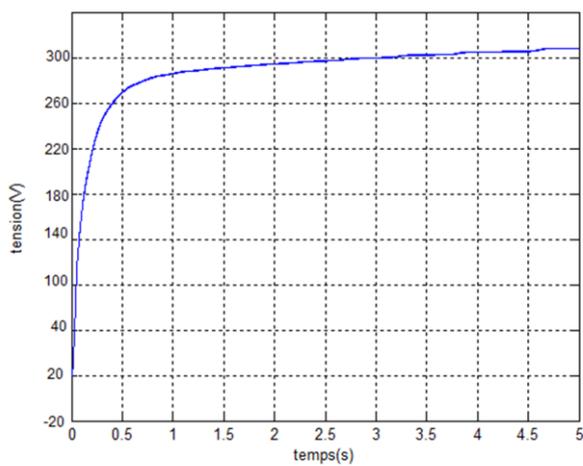


Figure II.26: Tension V_{dc} de sortie du convertisseur Boost (P&O).

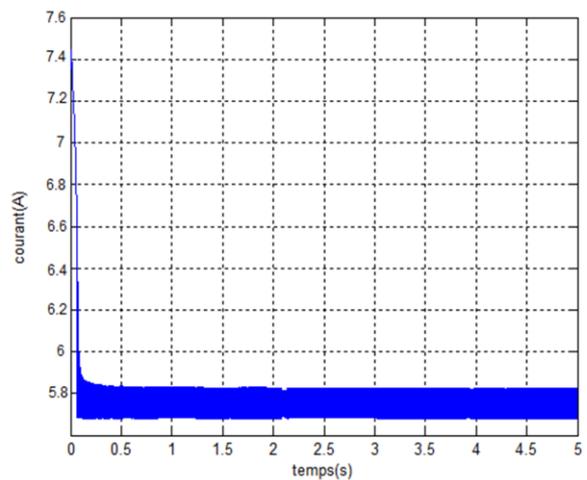


Figure II.27: Courant I_{dc} de sortie du convertisseur Boost (P&O).

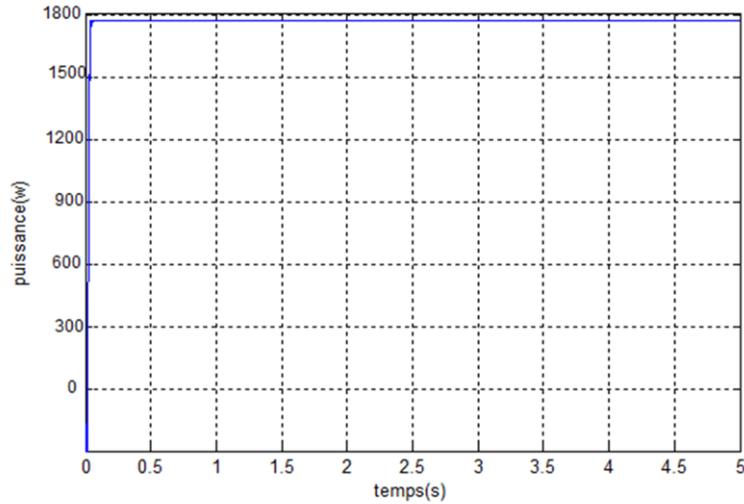


Figure II.28: la puissance du panneau **Ppv**.

II.7 Etude comparative entre connexion direct et indirect

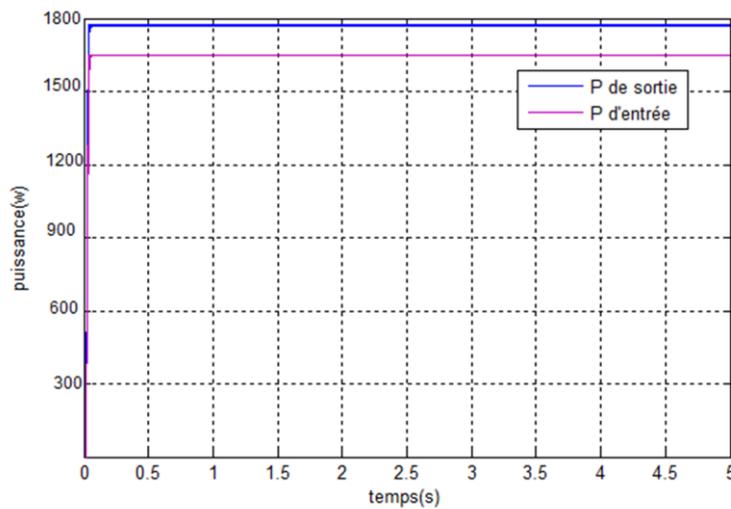


Figure II. 29 Puissance d'entrée et de sortie du convertisseur Boost

D'après les figures de puissance On remarque que le hacheur fonctionne en mode survolteur car la tension de sortie est supérieure à celle d'entrée.

II.8 Simulation de l'onduleur à deux niveaux branché sur source photovoltaïque

La simulation du troisième étage qui correspond au composant clé du système PV, l'onduleur à deux niveaux qui relie le GPV à la charge ou un réseau électrique. Le système est en boucle ouverte, commandé par MLI (modulation de largeur d'impulsion). La fréquence 50 Hz et l'amplitude de 220V.

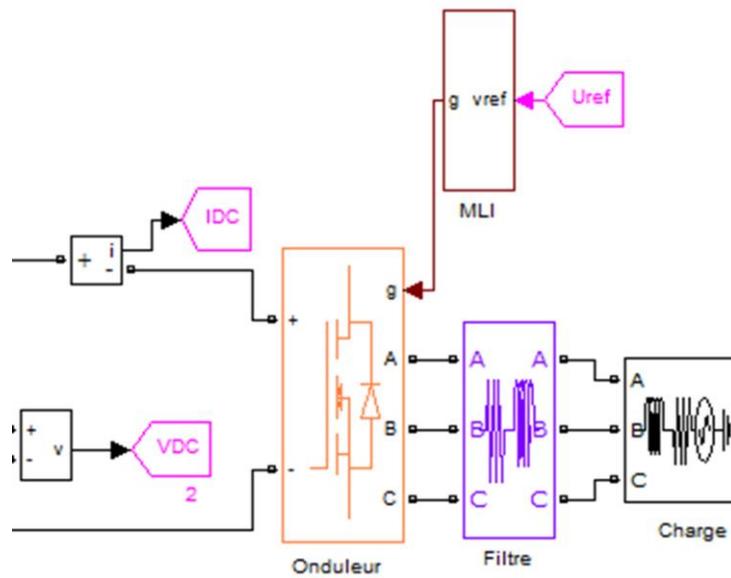


Figure II. 30 : Schéma de simulation d'un onduleur a deux niveaux.

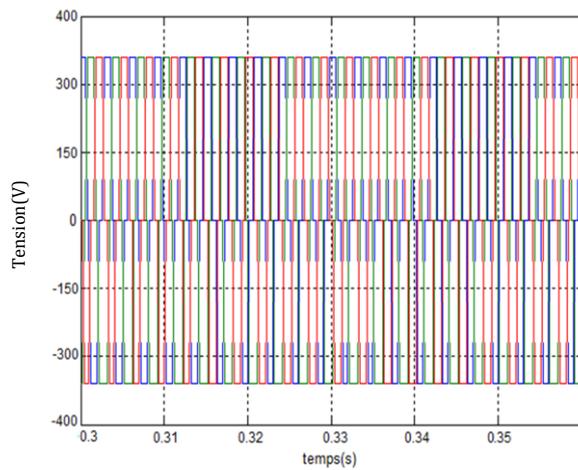


Figure II. 31 : La tension composée à la sortie de l'onduleur.

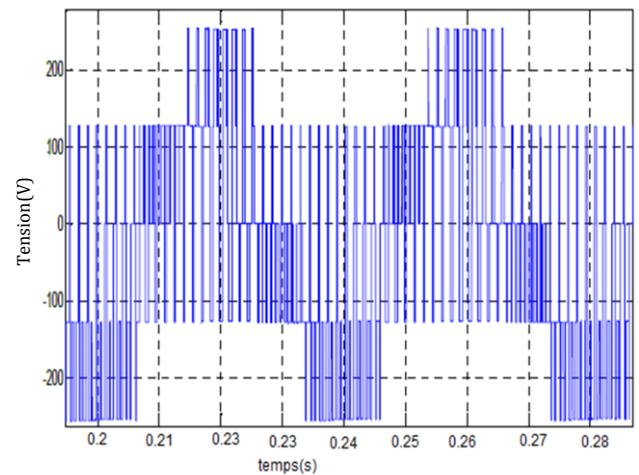


Figure II. 32 : La tension simple à la sortie de l'onduleur.

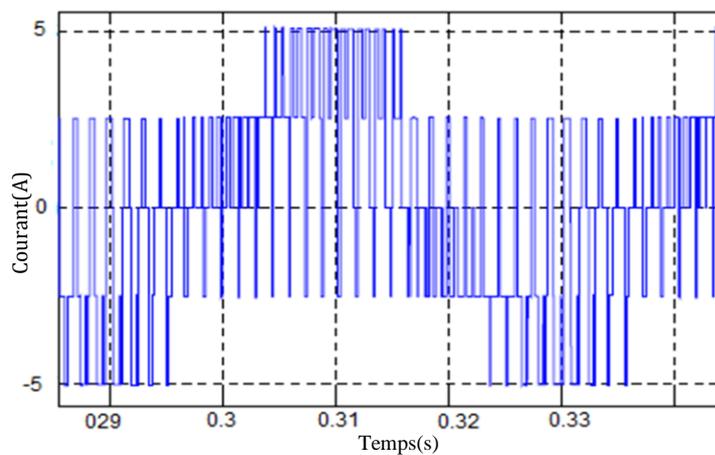


Figure II. 33 : Le courant simple à la sortie de l'onduleur.

Le courant et la tension de sortie de l'onduleur ont une forme périodique qui s'approche d'une sinusoïde. Afin de le connecter au réseau une adaptation est nécessaire suivant les exigences et les normes en vigueur. Le taux d'harmonique doit être inférieur à 5%.

II.8.1 L'interface de raccordement au réseau électrique

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement. La prise en charge des harmoniques s'impose. L'amélioration de la qualité d'énergie injectée au réseau est assuré par un filtre passe bas pour éliminer les harmoniques [18]. Le filtre RL utilisé aux valeurs

$$R = 2e^{-3}\Omega$$

$$L = 5e^{-3}H$$

II.8.2 Système de contrôle

En mode connecté l'onduleur travail en boucle fermée. Le système de contrôle est conçu pour réguler le fonctionnement en toute sécurité de système dans les modes connectés au réseau.

L'objectif du système de contrôle consiste à contrôler la tension et la fréquence. Dans ce type de contrôle, l'unité de source est obligée de fournir un courant de sortie constant. Le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur exige une boucle d'asservissement fermée.

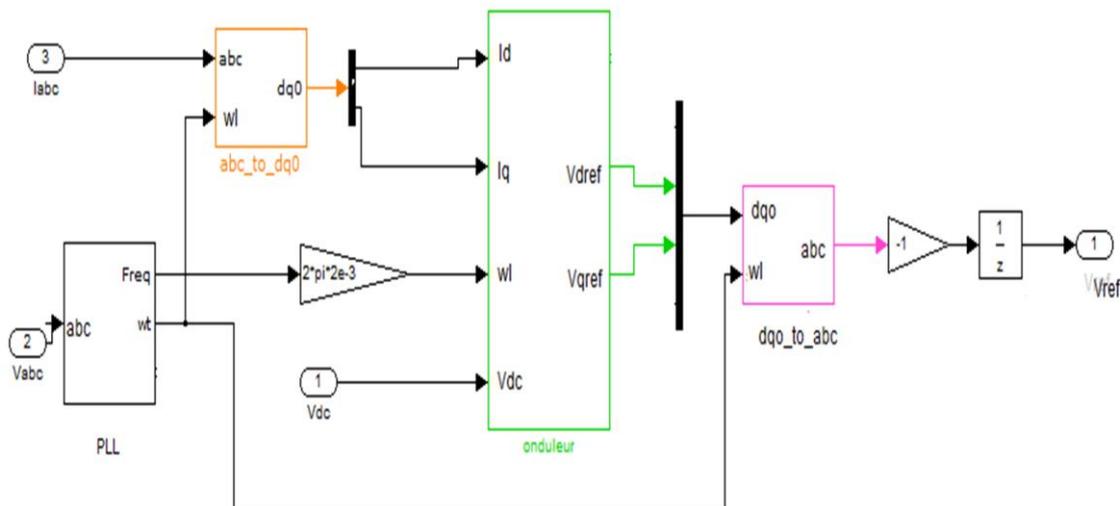


Figure II. 34 : Bloc de contrôle courant constant.

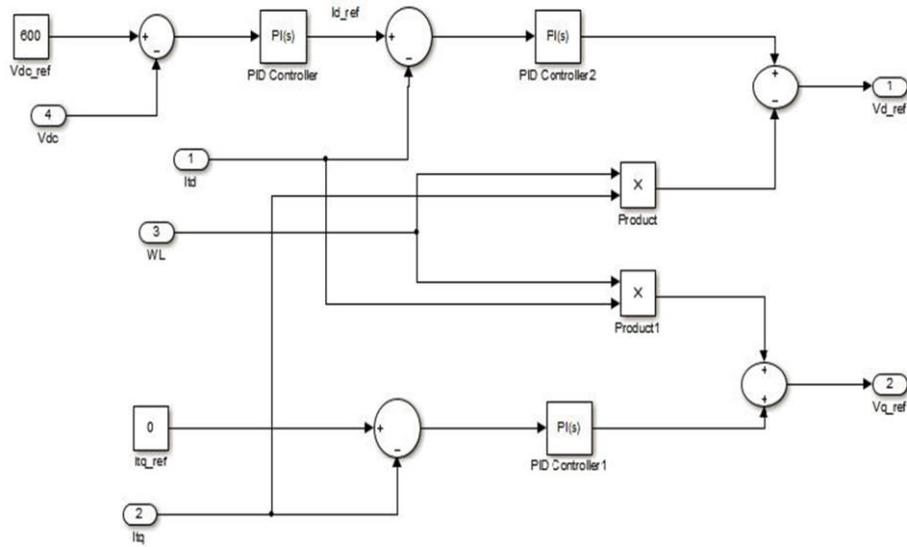


Figure II. 35 : Détails du bloc de commande.

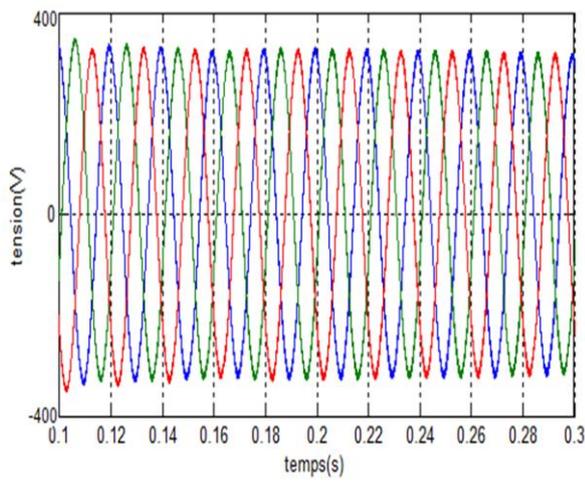


Figure II. 36 : Les tensions à la sortie de l'onduleur.

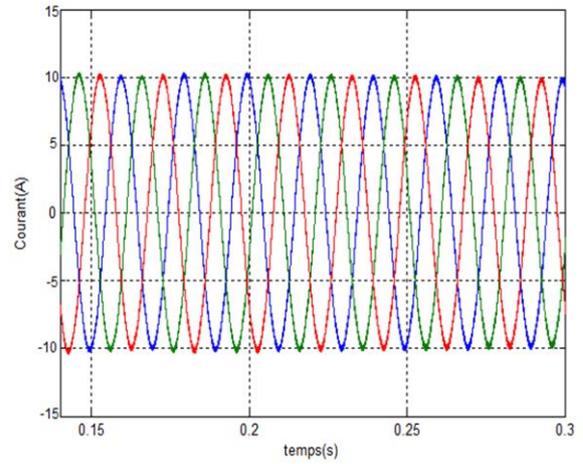


Figure II. 37 : Les courant de lignes à la sortie de l'onduleur.

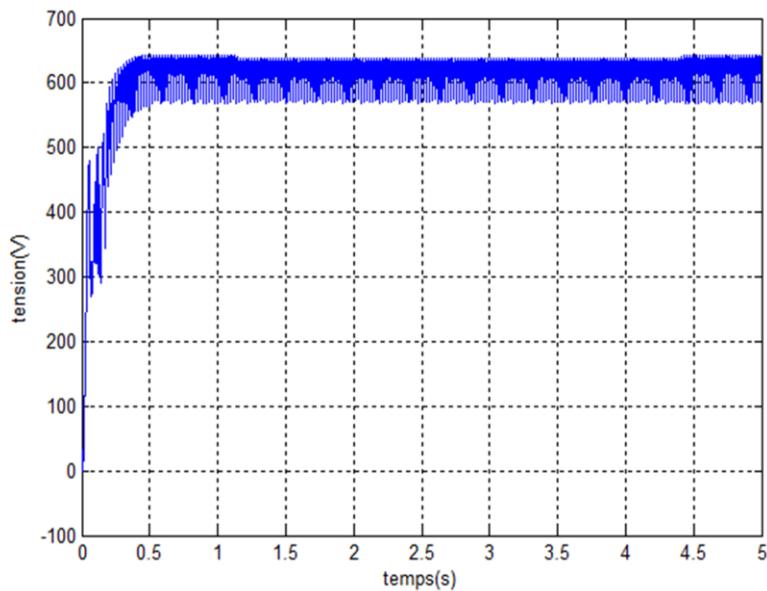


Figure II. 38 : Les tensions Vdc.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que, le générateur photovoltaïque, le hacheur survolteur, l'onduleur et la charge.

On a pu constater que la structure globale du système PV électrique est stable. D'après les résultats obtenus de simulation on remarque que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent leurs rôles d'atteindre la puissance maximale de générateur PV. Le hacheur et la commande MLI a le rôle de fournir une allure sinusoïdale ou niveau de la sortie de l'onduleur.