

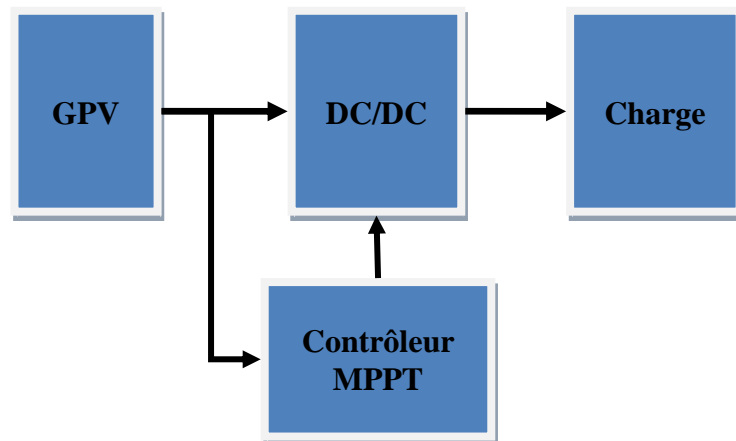
### III.1 Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

Dans ce chapitre, nous allons dimensionner les différentes partie du notre système, ceci après avoir fixé notre cahier des charges. Pour vérifier, les modèles utilisés et le dimensionnement réalisé, nous allons exécuter un certain nombre de simulation pour valider notre travail.

### III.2 Cahier des charges

Le but de notre projet est de modéliser les différentes parties d'un système photovoltaïque autonome, ensuite de tester différentes méthode de maximisation de puissance délivré par un générateur PV. Pour y parvenir, nous nous sommes fixées un certain nombre d'objectifs et un certain repère, ceci pour vérifier et comparer notre travail à celui rencontré dans la bibliographie.



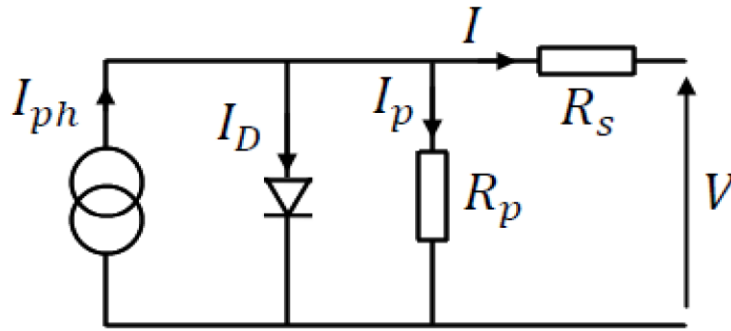
**Figure 3.1** : Schéma synoptique du système avec contrôleur MPPT

Le système que nous avons choisi de concevoir doit être est un système de moyenne puissance (100 Watt). Il doit comporter un hacheur avec une charge résistive, et la commande MPPT sera basée sur un contrôleur flou.

### III.3 Modélisation du champ photovoltaïque

La figure suivante (figure 3-2) [23] représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une diode en parallèle et une résistance série  $R_s$  et résistance parallèle  $R_p$ . la diode  $D1$  décrit la propriété de semi-conducteur de la cellule.

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).



**Figure 3.2:** Circuit équivalent d'une cellule solaire.

D'après le modèle de la cellule, on remarque qu'il y a une résistance shunt  $R_{sh}$  qui représente les fuites par effet de bord autour de la cellule solaire. La résistance  $R_s$  qui représente la résistance série, prend en compte les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque de Silicium ;  $I_{ph}$  est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode représente la jonction PN de la cellule.

En appliquant la loi des nœuds, on trouve :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.1)$$

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( q \frac{(V + IR_s)}{\alpha \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

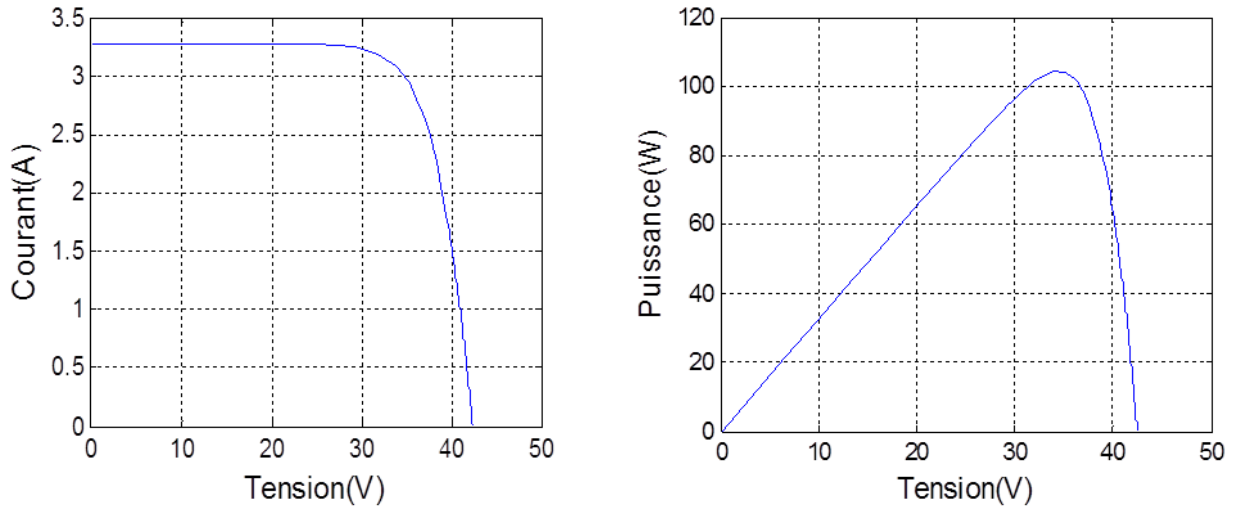
$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{e(V + IR_s)}{\alpha \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Où :  $\alpha$  : Est le facteur d'idéalité,

$T$  : Est la température de la cellule en K,

$e$  : Est la charge de l'électron  $e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$ ,

$K$  : est la constante de Boltzmann  $K = 1.3854 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ .



**Figure 3.3 :** Caractéristique (I-V) et (P-V)

La cellule photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres :

- **Le courant de court-circuit  $I_{SC}$**  : c'est le courant maximal généré par la cellule; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit, dans ce cas on peut écrire  $I_{SC} \approx I_{ph}$  du fait que  $R_s \ll R_p$ .

Dans le cas idéal ( $R_s=0, R_p=\infty$ ) Son expression approchée est donnée par:

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 * \left[ \exp \frac{V + I_{SC} \cdot R_s}{V_T} - 1 \right] - \frac{V + I_{SC} \cdot R_s}{R_p} \quad (3.4)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible) on peut négliger le terme  $I_0 * \left[ \exp \frac{V + I_{SC} \cdot R_s}{V_T} - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ .

L'expression approchée du courant de court-circuit alors :

$$I_{SC} \cong \frac{I_{ph}}{1 + R_s/R_p} \quad (3.5)$$

- **Tension à circuit ouvert  $V_{oc}$**  : c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge.

Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$I_{ph} - I_0 * \left[ \exp \frac{V_{oc}}{V_T} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} = 0 \quad (3.6)$$

Dans le cas idéal sa valeur est légèrement inférieure à

$$V_{oc} = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{sc} + I_0(T)}{I_0(T)} \right) + V_t \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_{sc}}{I_0(T)} \right) \quad (3.7)$$

Avec :  $V_t = \frac{\alpha \cdot K \cdot T}{e}$  la tension thermique et  $I_0$  le courant de saturation de la diode D.

- **Point de puissance maximale** ; c'est le point de fonctionnement ( $V_{mp}, I_{mp}$ ) où la cellule solaire génère sa puissance maximale.
- **Facteur de remplissage FF** ; il correspond au rapport de puissance maximale sur le produit de  $V_{oc}$  et  $I_{sc}$ , il reflète la qualité de la cellule par rapport à la cellule idéale avec  $FF=1$ .

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (3.8)$$

- **Le rendement de la cellule** ; c'est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il est égal au rapport entre la puissance électrique que l'on peut extraire au point de puissance maximale et la lumière incidente.

$$\eta = \frac{p_{max}}{P_{in}} = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} \quad (3.9)$$

P : Puissance incidente = P solaire =  $1 \text{ W/cm}^2$

A : section de la cellule

### III.4 : Générateur photovoltaïque

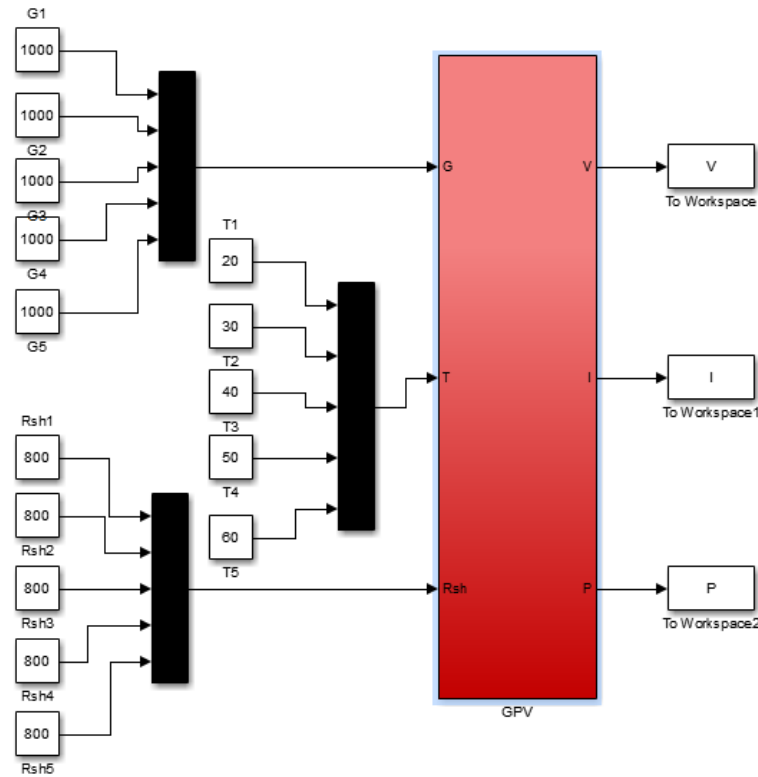
La cellule photovoltaïque constitue l'élément fondamental d'un générateur électrique. Elle délivre une puissance très faible pour la majorité des applications domestiques ou industrielles. Les cellules sont triées afin qu'elles aient toutes à peu près les mêmes caractéristiques, puis assemblées en : série, parallèle, et série-parallèle pour constituer le générateur électrique appelé aussi le module photovoltaïque.

Le module photovoltaïque PV-I106/24 est choisi pour la modélisation puis la simulation. Il contient (72) cellules série solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 106Wat. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

**Tableau 3.1** : Caractéristique du panneau photovoltaïque PV-I106/24

Caractéristiques physiques	PV-I106/24
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	$N_s = 72$
Nombre de cellules en parallèle ( $N_p$ )	$N_p = 1$
<b>Caractéristiques électriques (STC)</b>	$G_a = 1000 \text{ w/m}^2$ $T_a = 25^\circ\text{C}, AM1.5$
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	$106 \pm 5\% \text{ W}$
Tension au point maximale ( $V_{mpp}$ )	34.5V
Courant au point maximal ( $I_{mpp}$ )	3.08A
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	43.6 V
Courant de court circuit ( $I_{cc}$ )	3.27 A

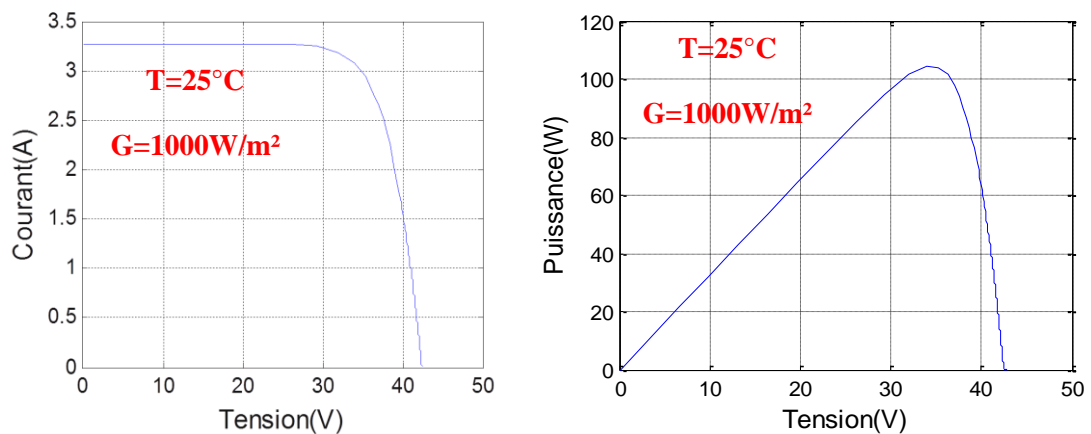
Pour construire un modèle équivalent (par Simulink), les expressions de la cellule puis d'un générateur PV ont été utilisées. Le schéma représentatif du modèle mathématique courant tension d'un module photovoltaïque sous Matlab-Simulink est donné par la figure suivante :



**Figure 3.4 :** Modèle 'SIMULINK' du panneau solaire.

#### III.4.1 Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température constante

A température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ( $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ), la caractéristique courant/tension  $I_{PV}=f(V_{PV})$  et la caractéristique puissance/tension  $P_{PV}=f(V_{PV})$  sont données sur la figure suivante :

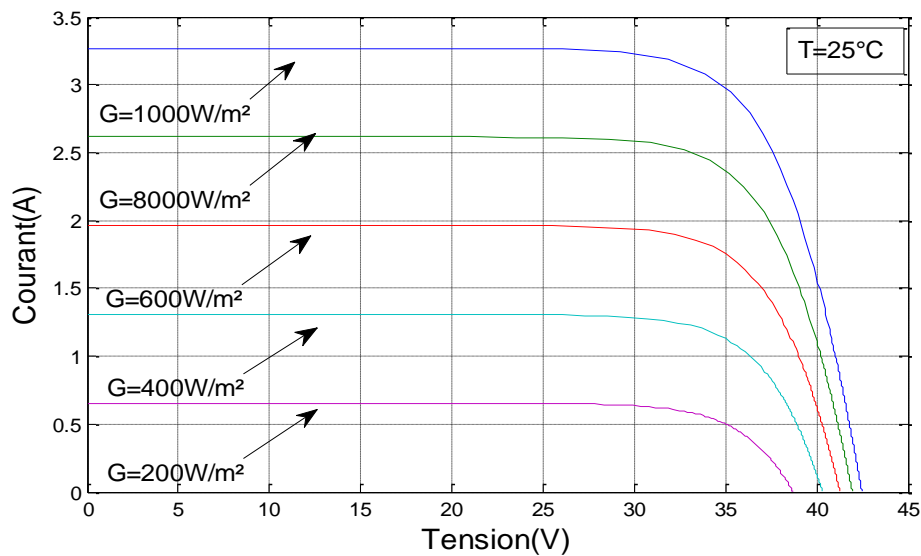


**Figure 3.5 :** Caractéristique (I-V) et (P-V) du GPV à température et éclairement constant.

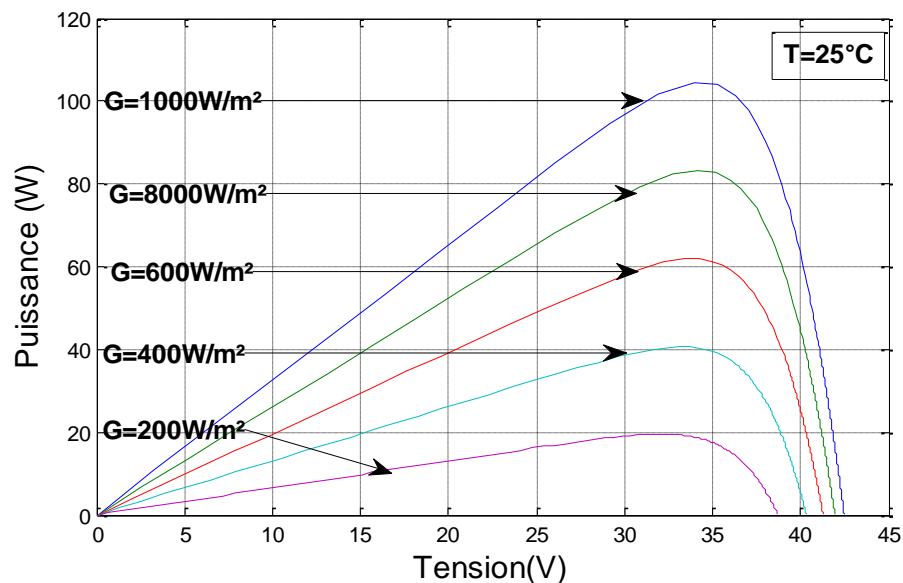
### III.4.2 Simulation du générateur (GPV) à éclairement variable

Le courant produit par la photopile  $I_{ph}$  est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire ( $G$ ). Par contre, la tension  $V$  aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N\_P du matériau lui-même. La tension de circuit ouvert ne diminue que légèrement avec l'éclairement. Ceci implique donc que

- La puissance optimale de la cellule  $P_m$  est pratiquement proportionnelle à l'éclairement
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension voir Figure (3.6/3.7).



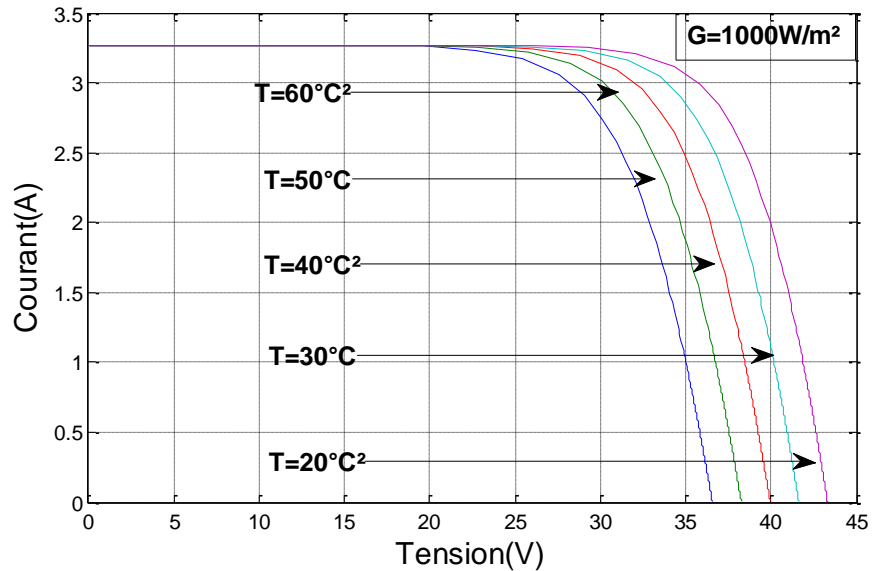
**Figure 3.6 :** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (I-V) à température constante.



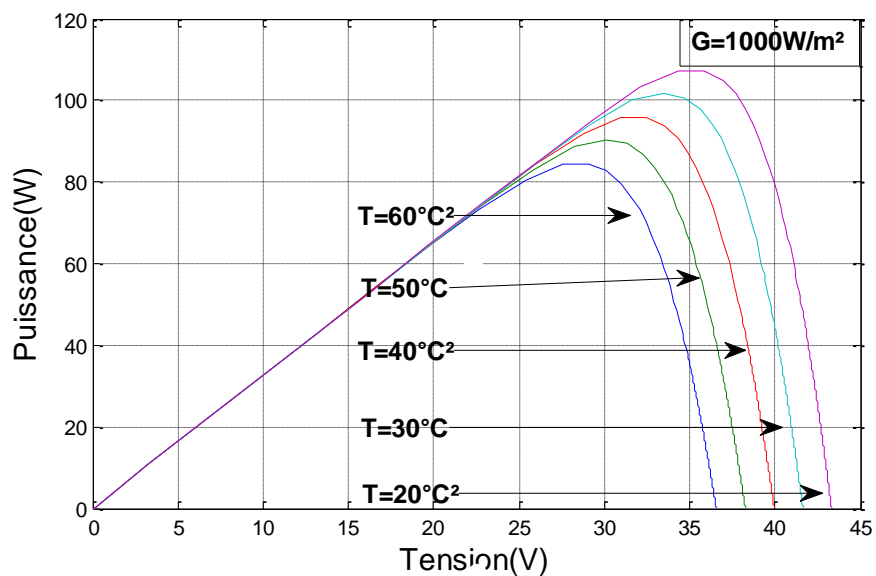
**Figure 3.7 :** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (P-V) à température constante

### III.4.3 Simulation du générateur (GPV) à température variable

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur (voir Figure 3.7 et 3.8), pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie légèrement.



**Figure 3.8 :** Influence de la température sur la caractéristique (I-V) à un ensoleillement constant.



**Figure 3.9 :** Influence de la température sur la caractéristique (P-V) à un ensoleillement constant.

### III.5 Modélisation du hacheur survolteur

#### III.5.1 Structure

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (3.10), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor ( $S_1$ ) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor ( $S_1$ ) s'ouvre et l'inductance ( $L$ ) s'opposant à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge ( $R$ ) à travers la diode ( $D$ ) [21].

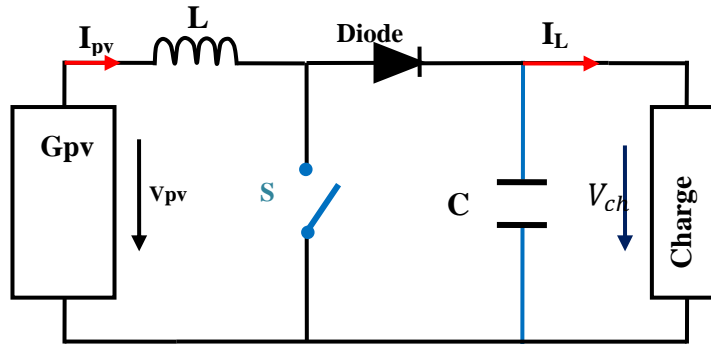


Figure 3.10 : Structure de convertisseur Boost.

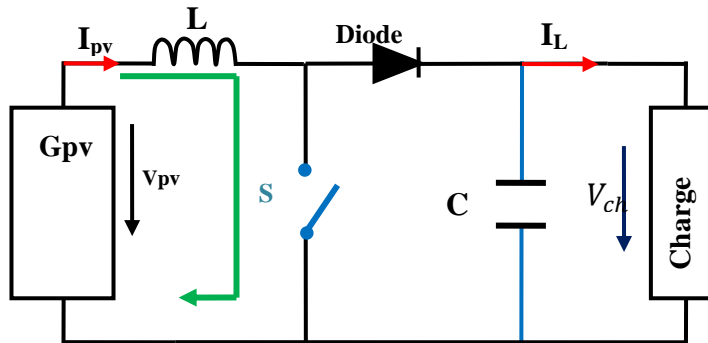


Figure 3.11 : Structure de convertisseur Boost durant l'état ON.

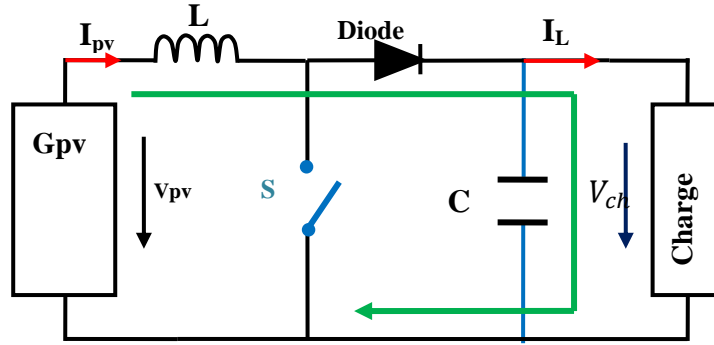
Pour  $0 < t < \alpha T$  L'interrupteur S est fermé :

$$V_{PV} = L \frac{di}{dt} \quad (3.10)$$

On a alors :

$$V_{S1} = 0; i_D = 0; V_{PV} = V_L \quad (3.11)$$





**Figure 3.12 :** structure de convertisseur Boost durant l'état OFF.

Pour  $0 < t < \alpha T$  L'interrupteur S est ouvert et l'inductance L se démagnétise et son courant décroît linéairement :

$$V_{PV} = L \frac{di}{dt} + V_{ch} \quad (3.12)$$

$$i_D = I_L \quad (3.13)$$

$$V_L = V_{PV} - V_{ch} \quad (3.14)$$

On peut ainsi calculer l'expression  $V_{L_{moy}}$  de la valeur moyenne de  $V_L$  :

$$V_{L_{moy}} = V_{PV} * \alpha + (V_{PV} - V_{ch}) * (1 - \alpha) \quad (3.15)$$

Finalement, on obtient la relation suivante :

$$V_{ch} = V_{PV} * \frac{1}{1 - \alpha} \quad (3.16)$$

### III.5.2 Ondulation de courant $\Delta I_L$

L'ondulation absolue du courant  $i_L$  est défini par  $\Delta I_L = I_{L_{MAX}} - I_{L_{MIN}}$ . A partir des Relations 12 et 14, à  $t = \alpha T$ , on peut écrire on a ( $V_E = V_{PV}$ ) :

$$\frac{V_E}{L} \cdot \alpha T + I_{L_{min}} = I_{L_{max}} \quad (3.17)$$

On en déduit l'expression de  $\Delta I_L$  suivante :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_E}{L \cdot f} \quad (3.18)$$

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

Comme  $V_E = V_S (1 - \alpha)$ , on peut écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha (1 - \alpha) \cdot V_S}{L \cdot f} \quad (3.19)$$

En résolvant  $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$

$$L \geq \frac{V_S}{4f\Delta I_L} \quad (3.20)$$

### III.5.3 Ondulation de tension $\Delta V_S$

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension  $\Delta V_S$ , on fait l'hypothèse que le courant  $I_S$  est parfaitement constant. On a la relation suivante :

$$i_C = C \cdot dv_S/dt \quad \text{or pour } 0 \leq t \leq \alpha T \text{ on a } i_C = -I_S.$$

La résolution de cette équation différentielle donne :

$$V_S = -\frac{I_S}{C}t + V_{S_{MAX}} \quad (3.21)$$

A  $t = \alpha T_d$  on a :

$$V_S(\alpha T) = V_{S_{MIN}} = -\frac{I_S}{C}\alpha T_d + V_{S_{MAX}} \quad (3.22)$$

Par suite, on a :

$$\Delta V_S = V_{S_{MAX}} - V_{S_{MIN}} = \frac{I_S}{C}\alpha T_d \quad (3.23)$$

Finalement :

$$\Delta V_S = \frac{\alpha V_S}{RCf} \quad (3.24)$$

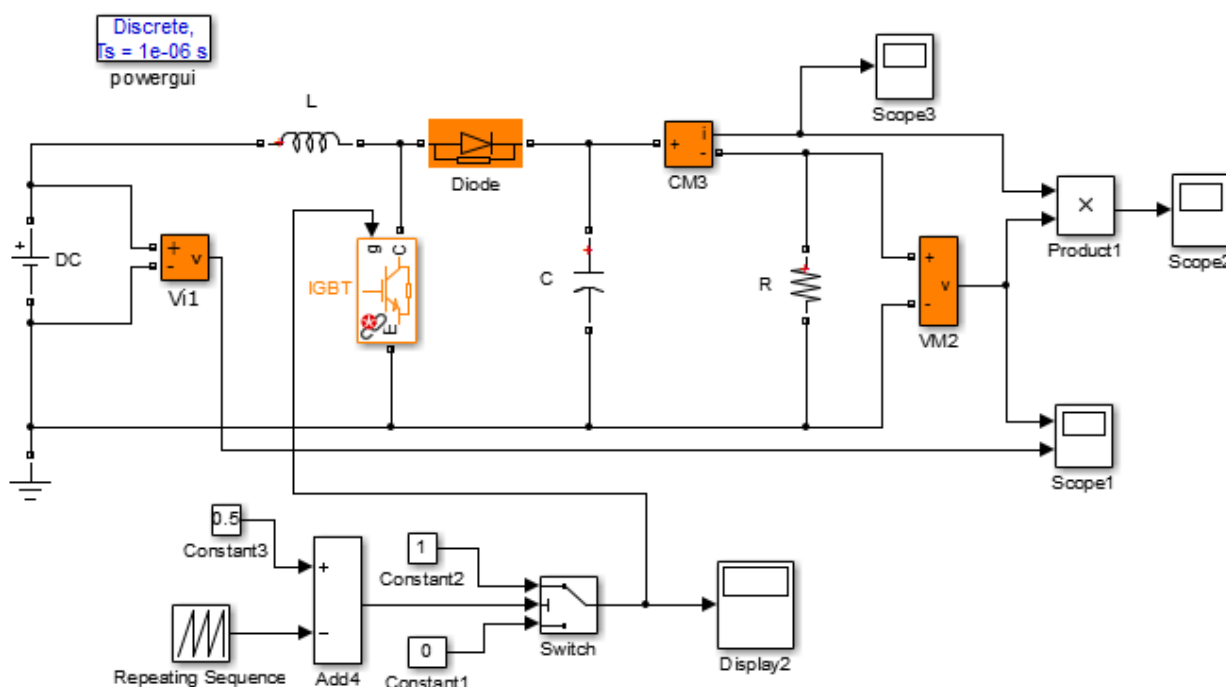
Cette expression nous montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de commutation  $f$  ou la valeur du condensateur  $C$  augmente.

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

$$C \geq \frac{\alpha_{max} V_S}{Rf\Delta V_S} \quad (3.25)$$

### III.5.4 Dimensionnement d'un hacheur Boost :

Afin de satisfaire les objectifs que nous nous sommes fixé, nous avons choisi la topologie d'un hacheur élévateur comme illustré dans la figure suivante :



**Figure 3.13:** Modèle ‘Simulink’ du convertisseur Boost.

Afin de faire le dimensionnement des éléments de ce convertisseur de puissance, il est important de fixer la valeur de certaines constantes du système.

**Tableau3.2 :** les valeurs de système

Puissance Max	106 Watt
Courant Max	3.27 A
Tension Max de sortie	43.6 A
Ondulation de la tension	2 %
Ondulation du courant	2 %
Charge	20 $\Omega$
Fréquence	10 kHz

On peut calculer les valeurs des composants à partir des valeurs données du Ondulation de courant, Ondulation de tension et la fréquence :

Pour  $\Delta V_{ch} = 0.9V$ ,  $f = 10KH$ ,  $R = 20 \Omega$ , et pour différentes valeur du rapport cyclique :

Exemple pour  $\alpha = 0.05$

$$L = \frac{(1 - \alpha)\alpha V_{ch}}{f \Delta I_L} \rightarrow L = \frac{(1 - 0.05)0.05 \times 43.5}{10000 \times 0.06} \rightarrow L = 3.43 * 10^{-3} \text{ mH}$$

$$C = \frac{\alpha V_{ch}}{Rf\Delta V_{ch}} \rightarrow C = \frac{0.05 \times 43.5}{20 \times 10000 \times 0.9} \rightarrow C = 12 \times 10^{-6} \mu F$$

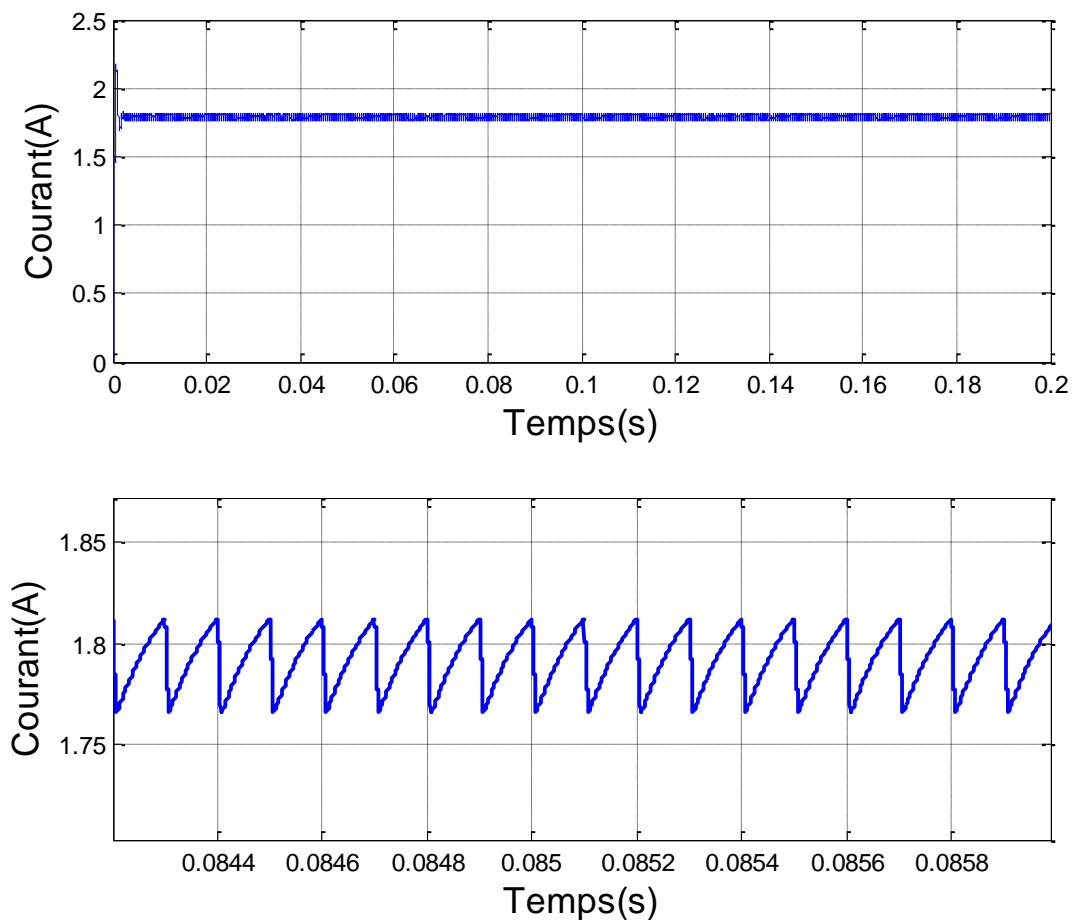
Les différentes valeurs calculer sont résumées dans le tableau suivant, nous allons prendre les valeurs maximum de la capacité et de l'inductance, celle-ci vont nous assurer un minimum d'ondulation, et un temps de réponse minimal.

**Tableau3.3** : les valeurs des composants du convertisseur Boost

Rapport cyclique ' $\alpha$ '	0.05	0.5	0.95
Inductance ' $L$ '	$3.43 \times 10^{-3} \text{ m H}$	$18.12 \times 10^{-3} \text{ mH}$	$3.43 \times 10^{-3} \text{ mH}$
Capacité ' $C$ '	$12 \times 10^{-6} \mu F$	$120 \times 10^{-6} \mu F$	$229 \times 10^{-6} \mu F$

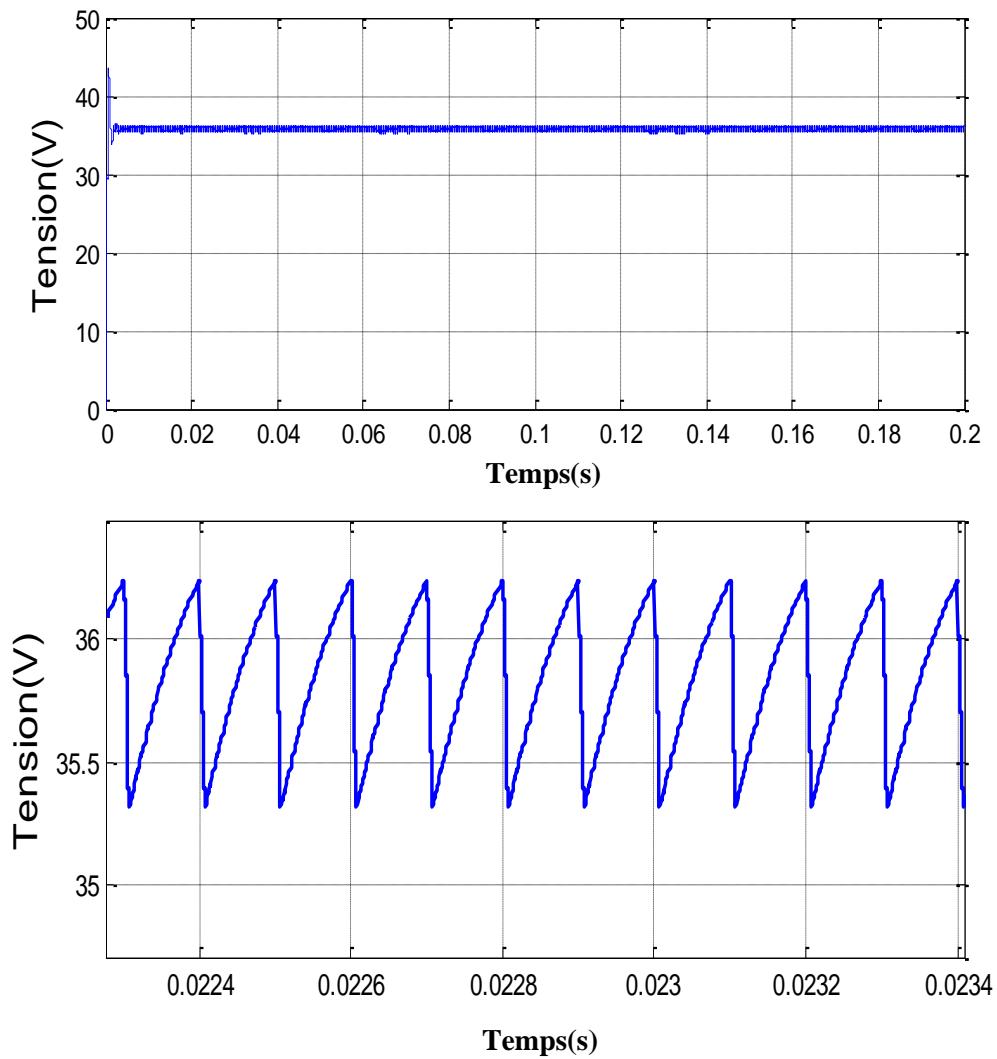
### III.5.5 Simulation et validation du hacheur Boost

Les simulations présentées dans les graphes suivants permettent de valider, la structure et le dimensionnement de chaque élément du convertisseur survolteur.



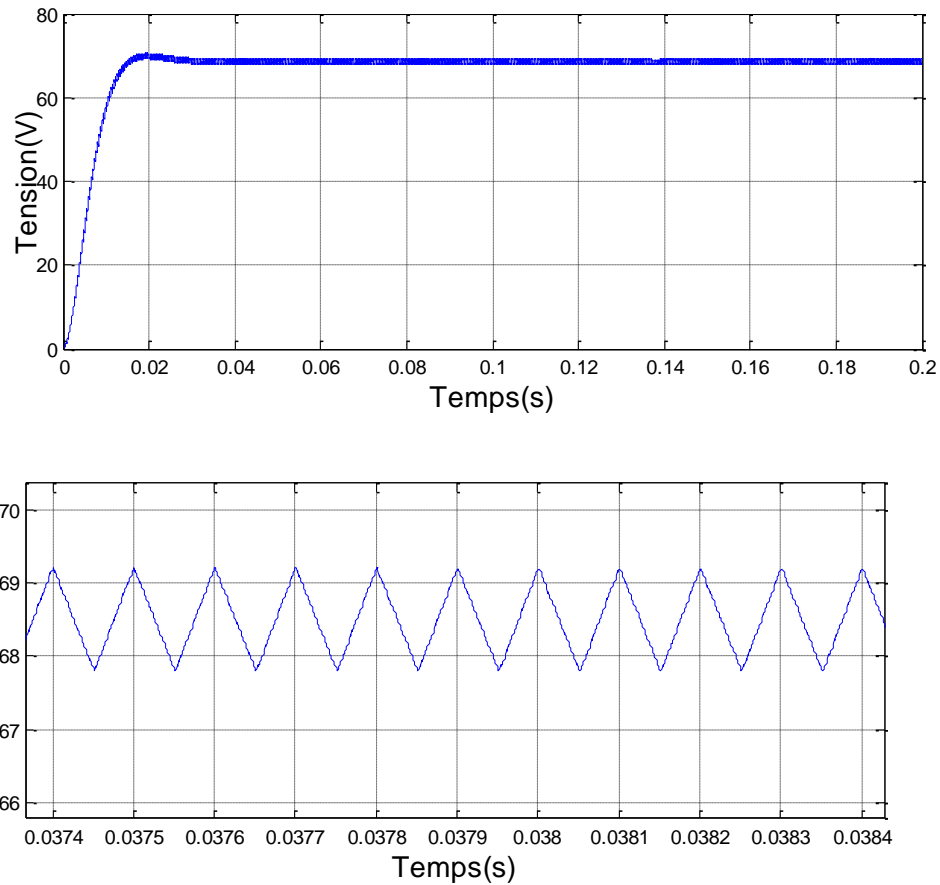
**Figure 3.14:** le courant de sortie et l'ondulation de courant pour  $V_{pv}=34.5$ ,  $\alpha=0.05$

La figure (3.14) représente le courant de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Boost pour une tension d'entrée  $V_{pv}=34.5V$  et de rapport cyclique  $\alpha =0.05$ .



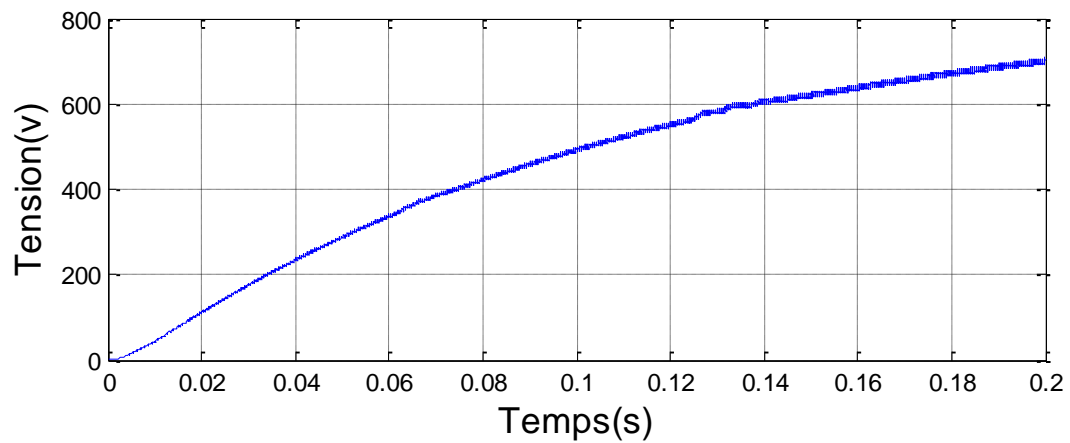
**Figure 3.15:** la tension de sortie et l'ondulation de tension pour  $V_{pv}=34.5V$ ,  $\alpha =0.05$ .

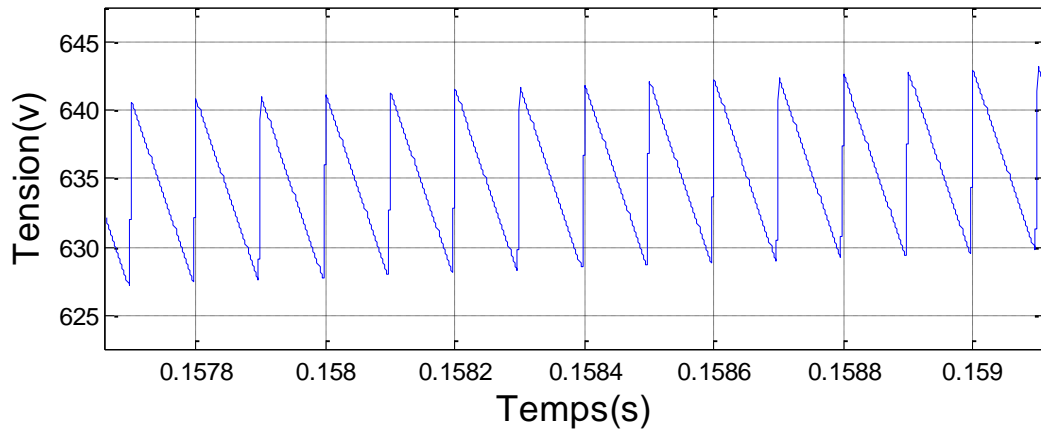
La figure (3.15) représente la tension de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Boost pour une tension d'entrée  $V_{pv}=34.5V$  et de rapport cyclique  $\alpha =0.05$ .



**Figure 3.16:** la tension de sortie et l'ondulation de tension pour  $V_{pv}=34.5$ ,  $\alpha=0.5$ .

La figure (3.16) représente la tension de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Boost pour une tension d'entrée  $V_{pv}=34.5V$  et de rapport cyclique  $\alpha=0.5$ .





**Figure 3.17:** la tension de sortie et l'ondulation de tension pour  $V_{pv}=34.5V$ ,  $\alpha =0.95$ .

La figure (3.17) représente le courant de sortie et l'ondulation de courant du convertisseur Boost pour une tension d'entrée  $V_{pv}=34.5V$  et de rapport cyclique  $\alpha =0.95$ ,

**Remarque:**

D'après les résultats obtenus on remarque bien que le Boost donne les tensions souhaitées à la sortie, ces tensions obéissent à la loi  $V_{ch} = V_{PV} * \frac{1}{1-\alpha}$ . Donc la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Ceci valide largement le dimensionnement et les choix que nous avons fait.

### III.6 Conclusion

On a vu dans ce chapitre le dimensionnement et la simulation de générateur photovoltaïque pour différent changement d'éclairement et de température. Nous avons aussi présenté le convertisseur Boost que nous avons dimensionné afin qu'il soit le plus adapté à notre système. Les simulations en en boucle ouverte ont été exécutés pour valider les choix effectués.