

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons parler des problèmes de la recherche du point de puissance maximale (MPP, maximum power point). Ensuite, nous allons parler du classement des différents dispositifs MPPT (maximum power point tracking), où les méthodes MPPT les plus utilisées seront détaillées. L'approche de poursuite de la commande Perturber et Observer (P&O) qui représente la base des MPPT sera elle aussi étudiée dans différentes conditions d'ensoleillement et de température. Également dans ce chapitre, nous allons présenter l'étage de puissance utilisé (convertisseur DC/DC). On détaillera leur principe de fonctionnement, le dimensionnement des différents éléments qui les composent.

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 méthodes 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.

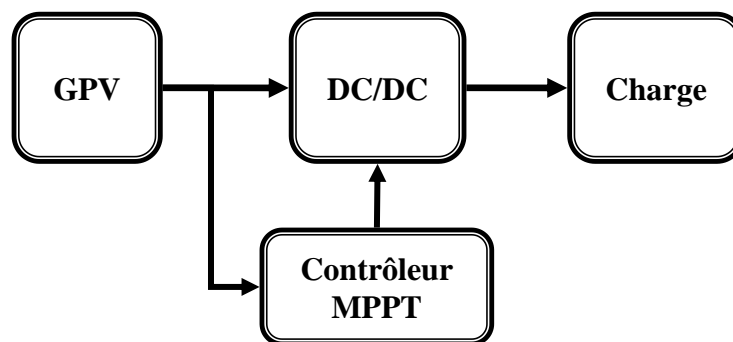


Figure III.1 : Schéma synoptique du système avec contrôleur MPPT

Le système que nous avons choisi de concevoir doit être 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 Poursuite de puissance maximale

Un générateur photovoltaïque GPV présente des caractéristiques (I-V) non linéaires avec un point de puissance maximum MPPT. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance

potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode de connexion directe.

Le générateur délivre sa puissance maximale notée P_{\max} ($P_{\max} = V_{\text{opt}} \cdot I_{\text{opt}}$) ou V_{opt} , I_{opt} présentent respectivement les tensions et les courants optimaux du générateur photovoltaïque, pour une courbe I-V donnée), tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

L'efficacité d'un système photovoltaïque n'est améliorée si seulement si le panneau est actionné intentionnellement au MPP, indépendamment des variations des conditions atmosphériques. Ceci peut être fait en accordant correctement le panneau avec la charge à l'aide des techniques qui détectent et localisent le MPP, les techniques utilisées sont appelées MPPT « maximum power tracking». Elles sont utilisées pour extraire le maximum de puissance disponible à l'aide d'un convertisseur de puissance contrôlé par un algorithme de recherche qui permet d'alimenter la charge en maximisant la puissance du générateur PV.

Il existe une multitude d'algorithmes de recherche, les plus utilisés seront détaillés par la suite dans ce chapitre.

III.3.1 Classification des techniques MPPT

Il existe différentes manières de classification des algorithmes MPPT. Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT.

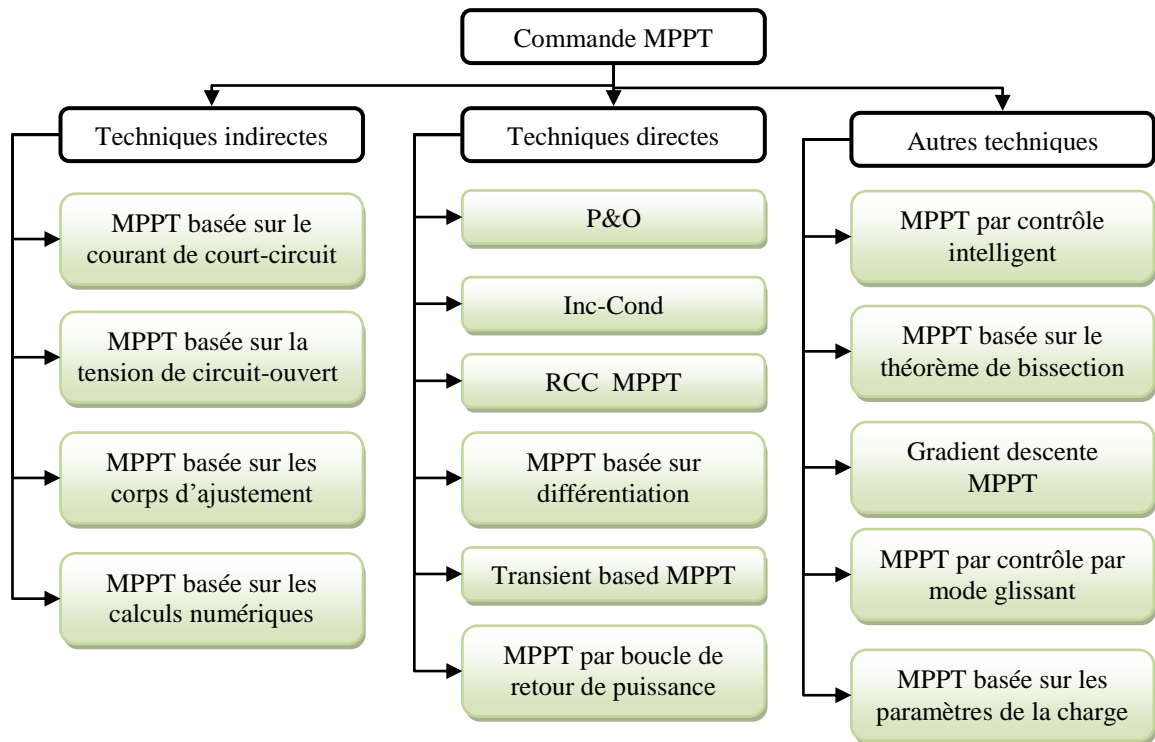


Figure III.2 : Classification des différentes méthodes de poursuite du MPP

Il existe on classer la commande MPPT on trois groupe Offline (indirect), en ligne (direct) et autres techniques (fig.III.2). On se concentrera d'exposer que ceux qui représentent les meilleures performances.

III.3.1.1 Méthodes Indirectes

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur.

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. [13]

III.3.1.2 Méthodes directes

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP.

III.3.2 commande et Observation (P&O)

Dans ce travail, nous allons utiliser une méthode MPPT qui utilise les principes de la logique floue, et qui est basé sur la méthode MPPT P&O, de ce fait, nous allons présenter dans cette section cette dernière méthode. [12]

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure(III.3), on voit que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dP/dV > 0$), alors il est clair que la perturbation a déplacé le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à Perturber la tension dans la même direction par contre, si la puissance diminue ($dP/dV < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur l'organigramme de la figure (III.4) L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(k) = V(k - 1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left(\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{k-1}} \right)$$

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance l'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité.

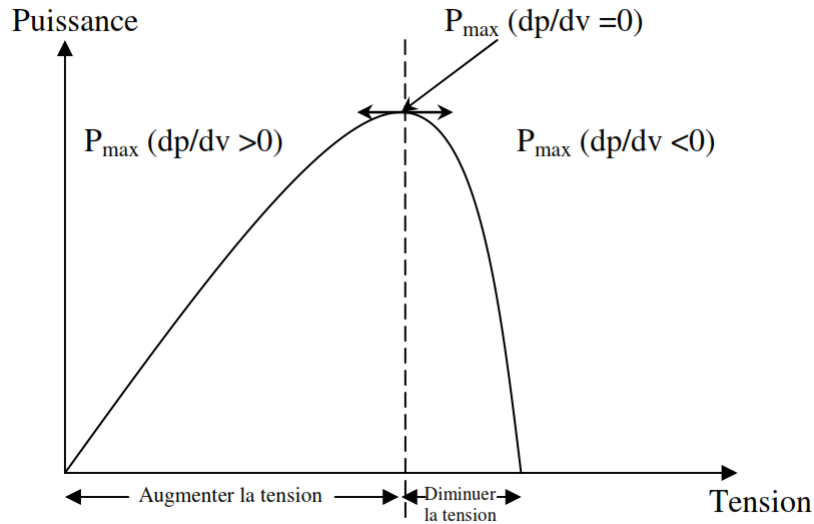


Figure III.3 : Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

- **Premier Cas :** $P(k) > P(k-1)$ et $V(k) > V(k-1)$

Le rapport dp/dv est positif, ceci indique que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP ; en plus est positive, on est donc dans la bonne direction. Pour la prochaine itération, on augmente la valeur de la tension du panneau photovoltaïque. Rappelons que quel que soit le type du convertisseur $DC-DC$ utilisé, la tension à son entrée est inversement proportionnelle avec le rapport cyclique. Soit donc

$$\alpha(k-1) = \alpha(k) - D, \text{ ou } D \text{ est le pas d'incrémentation.}$$

- **Deuxième Cas :** $P(k) > P(k-1)$ et $V(k) < V(k-1)$

Le rapport dp/dv est négatif, ceci indique que le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP ; en plus ΔV est négative, la recherche du MPP se fait dans la bonne direction. On va donc pour la prochaine itération continuer à diminuer la tension (donc à augmenter le rapport cyclique). Soit donc $\alpha(k+1) = \alpha(k) + D$.

- **Troisième Cas :** $P(k) < P(k-1)$ et $V(k) < V(k-1)$

Le rapport dp/dv est positif, le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP et comme ΔV est négative on se dirige dans le mauvais sens. Lors de la prochaine itération on doit corriger le sens de la recherche c.-à-d. augmenter la tension. Soit donc $\alpha(k+1) = \alpha(k) - D$.

- **Quatrième Cas :** $P(k) < P(k-1)$ et $V(k) > V(k-1)$

Le rapport dp/dv est négatif, le point de fonctionnement actuel est à droite du MPP, en plus ΔV est positive c.-à-d. que la recherche se fait dans la mauvaise direction. Pour la prochaine itération, on va diminuer la tension (donc augmenter le rapport cyclique). Soit donc $\alpha(k+1) = \alpha(k) + D$.

À partir de l'organigramme de la méthode P&O, représenté par la figure (III.4), on détermine la loi de commande qui régit notre système par laquelle on peut situer facilement le point de fonctionnement par rapport au MPP et le faire converger vers le maximum de puissance.

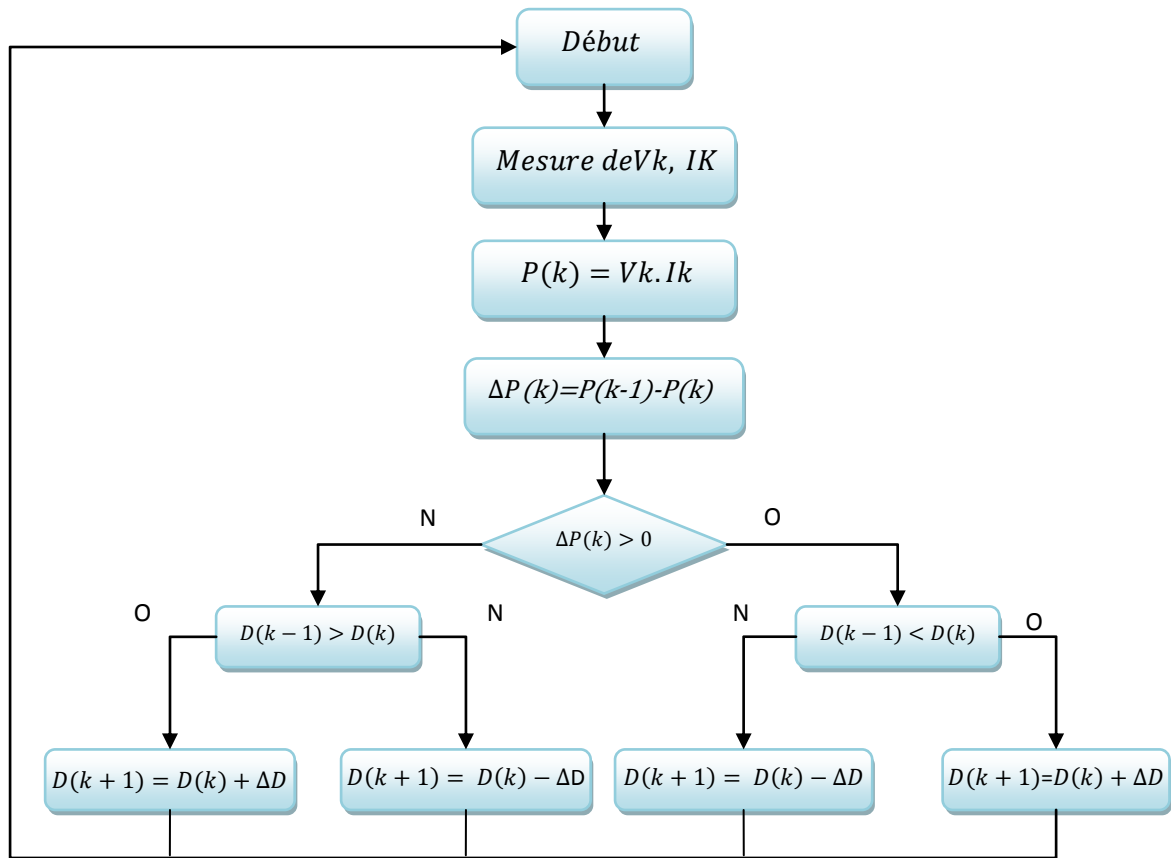


Figure III.4 : Organigramme de la méthode P&O

III.4 Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs statiques de puissance continu/continu (DC/DC), sont l'élément fondamentale de tout MPPT, de ce fait, nous allons présenter dans ce qui suit les convertisseurs que nous allons utiliser. Dans une première phase de notre travail, nous allons étudier et comparer deux convertisseurs de puissance Buck et Ćuk et ensuite de choisir l'un des deux. [14]

III.4.1 Convertisseur DC/DC dévolteur 'Buck'

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (III.5). Les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S1) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.

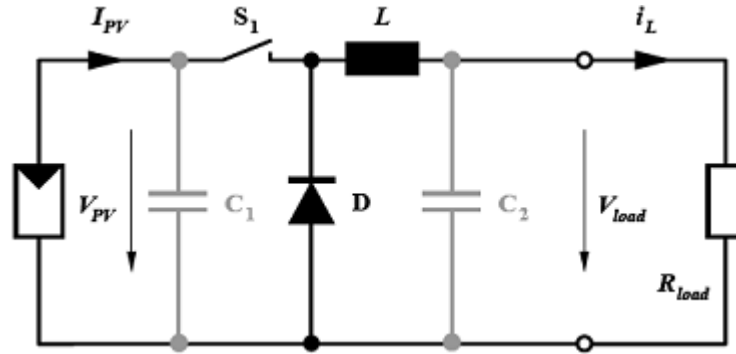


Figure III.5 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Pour pouvoir utilisé un convertisseur de puissance notamment un convertisseur DC/DC, il faut toujours faire un dimensionnement des composant en adéquation avec le cahier de charge fixé au préalable. Pour définir les valeurs de ces composants, nous avons toujours besoin de définir les ondulations de courant dans les bobines, et les ondulations de tension dans les condensateurs.

a) Ondulation du courant

$$\Delta i_L = I_{max} - I_{min} = \frac{(V_{PV} - V_{load}) D T}{L} = \frac{V_{load} * (1 - D)}{Lf} = \frac{V_{PV}}{Lf} (1 - D) * D \quad (III. 1)$$

Où : $T=1/f$ est la période de hachage

D est le rapport cyclique entre le temps de fermeture de l'interrupteur de puissance (S1) et la période de hachage.

Par cette équation nous pouvons déduire la valeur de l'inductance comme suit :

$$L \geq \frac{V_{PV}}{f \Delta i_L} (1 - D) D \quad (III. 2)$$

a) Ondulation de la tension

$$\Delta V_c = \frac{V_{load}}{8 L C_2 f^2} (1 - D) = \frac{V_{PV}}{8 L C_2 f^2} (1 - D) D \quad (III. 3)$$

Nous avons donc la valeur de la capacité qui s'écrit comme suit :

$$C_2 \geq \frac{V_{PV}(1-D)D}{8L\Delta V_c f^2} \quad (\text{III.4})$$

III.4.2 Convertisseur DC/DC dévolteur/survolteur Ćuk

Le Ćuk est constitué de deux inductances, de deux condensateurs, d'un interrupteur (généralement un transistor) et d'une diode. Le schéma de base d'un convertisseur Ćuk est représenté par la figure (III.6). Un inconvénient subsiste concernant l'inversion du signe de la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée. Par sa structure, le convertisseur Ćuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée. Le convertisseur Ćuk utilise un condensateur pour stocker l'énergie.

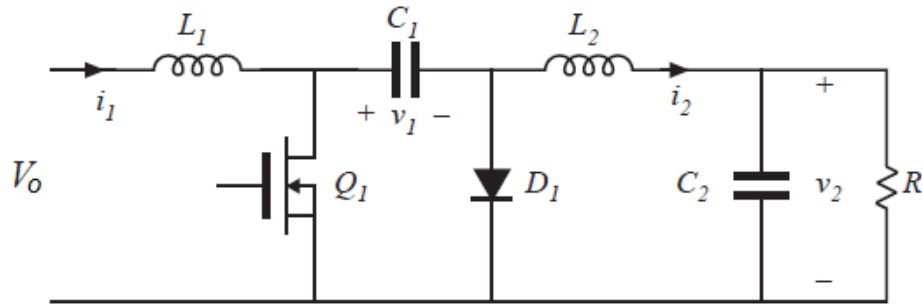


Figure III.6: Circuit électrique d'un convertisseur DC-DC de type Ćuk

Comme pour le convertisseur Buck nous allons présenter les différentes équations qui nous aideront dans la mise en œuvre d'un convertisseur Ćuk.

a) Ondulation du courant

$$\Delta I_{L2} = \frac{VD}{fL_2} \leftrightarrow L_2 = \frac{DV}{\Delta I_{L2}f} \quad (\text{III.5})$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{VD}{fL_1} \leftrightarrow L_1 = L = \frac{DV}{\Delta I_{L1}f} \quad (\text{III.6})$$

b) Ondulation de la tension

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta I_{L2}}{8fC_2} = \frac{VD}{8C_2L_2f^2} \leftrightarrow C_2 = \frac{\Delta I_{L2}}{8f\Delta V_0} \quad (\text{III.7})$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{VD^2}{(1-D)fC_1R} \leftrightarrow C_1 = \frac{VD^2}{(1-D)f\Delta V_{C1}R} \quad (\text{III.8})$$

III.5 Dimensionnement et simulation du hacheur Buck

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

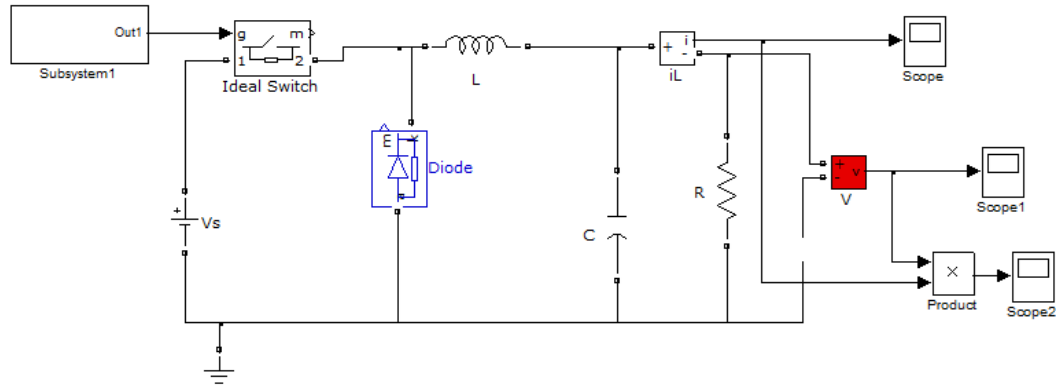


Figure III.7. Modèle ‘Simulink’ du convertisseur Buck.

Afin de faire le dimensionnement des éléments de ce convertisseur de puissance, il est important de fixer la valeur de certaines constantes du système incluant celle du générateur photovoltaïque qui devrait être connecté par la suite.

Tableau III.1 : les valeurs du système

Puissance Max	106 Watt
Courant de court-circuit	3.27 A
Tension de circuit-ouvert	43.6 A
Ondulation de la tension	2 %
Ondulation du courant	2 %
Charge	20 Ω
Fréquence	10 kHz

a) Dimensionnement

On peut calculer les valeurs des composants à partir des valeurs données de l’ondulation du courant et de l’ondulation de la tension et de la fréquence :

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

Exemple pour $D=0.5$

$$L = \frac{D(1-D)U_{PV}}{\Delta I_s f} \rightarrow L = 1816.66 \mu H$$

$$C = \frac{U_{PV}(1-D)D}{8 * L * f^2 \Delta V_c} \rightarrow C = 8.33 \mu F$$

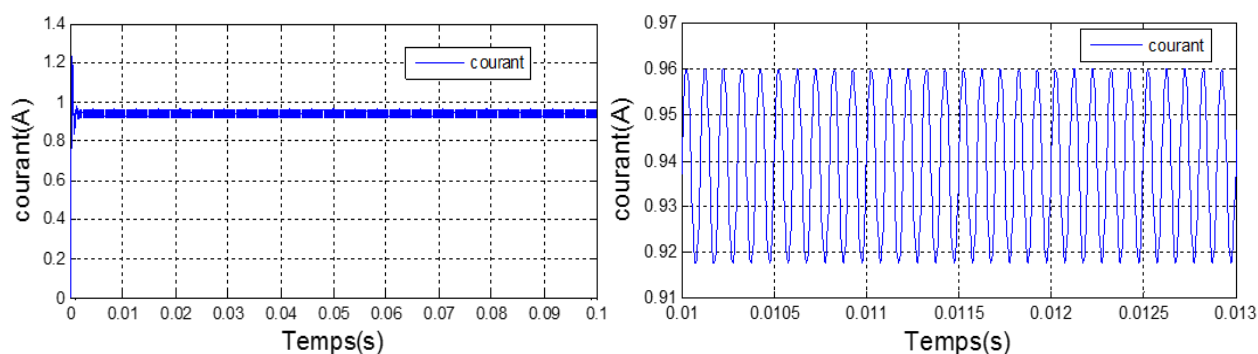
Les différentes valeurs calculer sont résumées dans le tableau suivant, nous allons prendre les valeurs maximums de la capacité et de l’inductance, celle-ci vont nous assurer un minimum d’ondulation, et un temps de réponse minimal.

Tableau III.2 : les valeurs des composants du convertisseur Buck

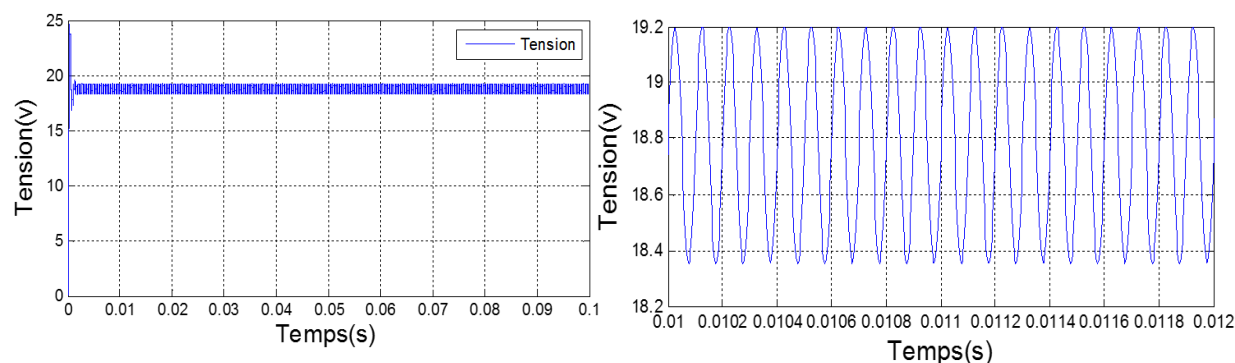
Rapport cyclique ' D '	0.05	0.5	0.95
Inductance ' L '	345 μ H	1816 μ H	345 μ H
Capacité ' C '	$8.6 \cdot 10^{-8}$ F	$8.33 \cdot 10^{-6}$ F	$8.6 \cdot 10^{-8}$ F

b) Simulation et validation du hacheur Buck

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

**Figure III.8:** le courant de sortie et l'ondulation de courant pour $V_{pv}=40V$, $D=0.5$

La figure (III.8) représente le courant de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Buck pour une tension d'entrée $V_{pv}=40V$ et de rapport cyclique $D=0.5$

**Figure III.9:** La tension de sortie et l'ondulation de tension pour $V_{pv}=40V$, $D=0.5$.

La figure (III .9) représente la tension de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Buck pour une tension d'entré $V_{pv}=40V$ et de rapport cyclique $D=0.5$.

III.6. Dimensionnement et simulation du hacheur Cuk

Nous nous sommes fixé comme objectif de comparer le fonctionnement du Buck avec le Cuk, pour satisfaire cet objectif nous avons choisi la topologie d'un hacheur Cuk comme illustré dans la figure suivante :

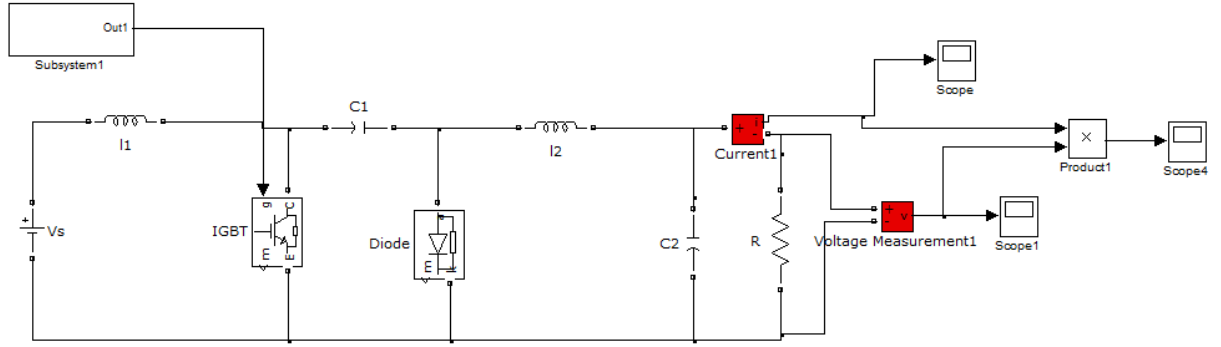


Figure III.10 : Modèle 'Simulink' du convertisseur Ćuk.

a) Dimensionnement

Avec les mêmes valeurs du système que nous avons choisi dans le tableau (III.3), nous allons fixer les valeurs des composants de cet hacheur.

Pour $f = 10\text{kHz}$, $R = 20\Omega$, et pour différentes valeurs du rapport cyclique :

Exemple pour $D=0.5$,

$$L1 = \frac{V_{PV} * D}{f \Delta I_{L1}} = \frac{43.6 * 0.5}{10000 * (0.0654)} = 33.33 * \text{mH}$$

$$L2 = \frac{V_{PV} * D}{f \Delta I_{L2}} = \frac{43.6 * 0.5}{10000 * (0.046)} = 47.39 * \text{mH}$$

$$C1 = \frac{V_{PV} * D^2}{(1 - D) f R \Delta V_{C1}} = \frac{43.6 * (0.5)^2}{(1 - 0.5) 10000 * 1.7928 * 20 * (0.046)} = 60.798 \mu\text{F}$$

$$C2 = \frac{\Delta I_{L2}}{8 f \Delta V_{load}} = \frac{0.046}{8 * 10000 * 0.9208} = 0.624 \mu\text{F}$$

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

Tableau III.3 : les valeurs des composants du convertisseur Ćuk

Rapport cyclique ' D '	0.05	0.5	0.95
Inductance ' $L1$ '	3.33Mh	3.33 Mh	63.33Mh
Inductance ' $L2$ '	4.73Mh	47.39 Mh	900.43Mh
Capacité ' $C1$ '	0.319 μF	60.798 μF	2194.834 μH
Capacité ' $C2$ '	0.624 μF	0.624 μF	0.624 μF

b) Simulation et validation

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

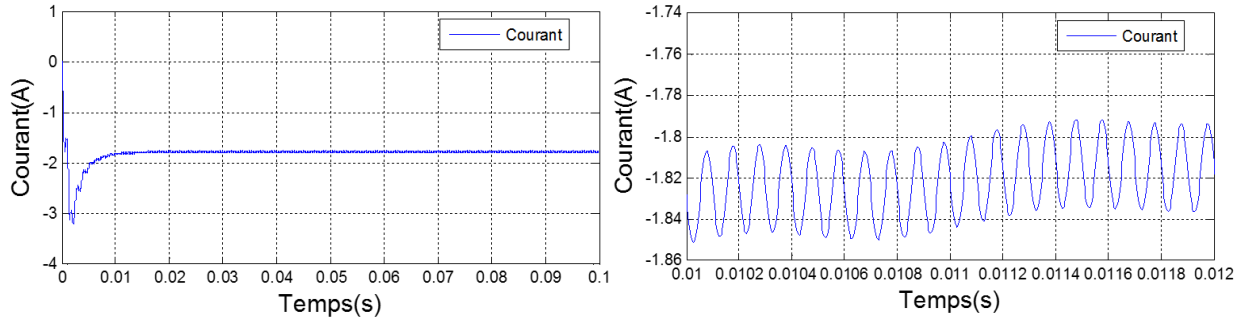


Figure III.11: le courant de sortie et l'ondulation de courant pour $V_{pv}=40V$, $D=0.5$

La figure (III.11) représente le courant de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Ćuk pour une tension d'entrée $V_{pv}=40V$ et de rapport cyclique $D=0.5$

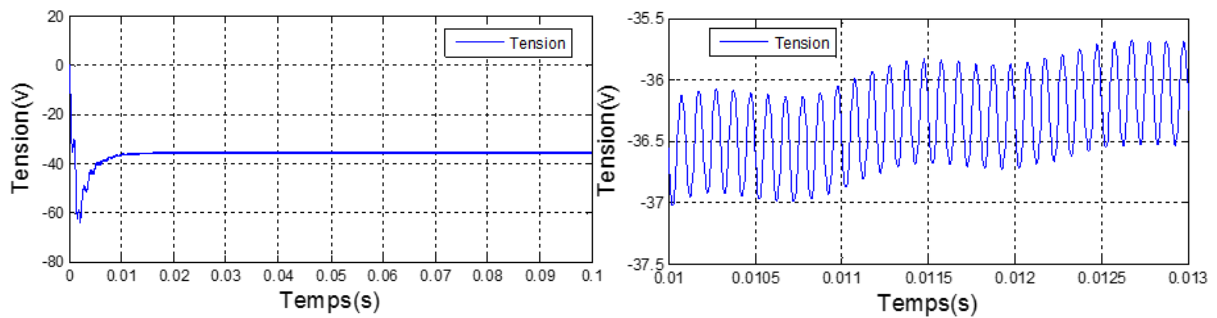


Figure III.12: la tension de sortie et l'ondulation de tension pour $V_{pv}=40V$, $D=0.5$.

La figure (III.12) représente la tension de sortie et l'ondulation de tension du convertisseur Ćuk pour une tension d'entré $V_{pv}=40V$ et de rapport cyclique $D=0.5$.

III.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les techniques de commande MPPT spécialement l'algorithme de commande et Perturb and Observ (P&O). Nous avons aussi présenté le convertisseur Buck et le convertisseur Ćuk que nous avons dimensionné afin qu'il soit le plus adapté à notre système. Les simulations en boucle ouverte ont été exécutées pour valider le dimensionnement effectué.