

3.5 Modèle de batterie

Il y a différents types de batteries sur le marché tels que les batteries au nickel, les batteries au plomb et les batteries au lithium-ion. Comme ils sont peu coûteux et facilement disponibles sur le marché, les batteries au plomb sont principalement utilisées dans les applications PV. En outre, elles sont préférées en raison de leurs propriétés de faible autodécharge et peu d'entretien. Pour une batterie au plomb, il existe deux modes de fonctionnement : chargement et déchargement. Lorsque le courant qui circule de la source vers la batterie est positif/négatif, la batterie est en mode de charge/décharge. La Figure. 3.3 montre le modèle de circuit équivalent de la batterie au plomb pour les deux modes de fonctionnement [69].

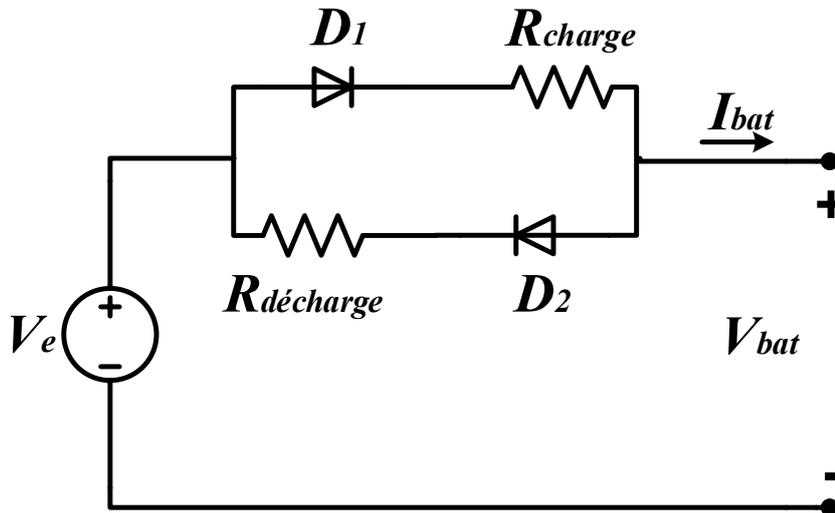


FIGURE 3.3 – Circuit équivalent de la batterie au plomb.

Dans la Figure. 3.3, V_e est la tension d'entrée, V_{bat} est la tension de la batterie, I_{bat} est le courant de la batterie, et R_{charge} et $R_{décharge}$ sont les résistances de charge et de décharge. Ainsi, l'équation principale du circuit équivalent devient.

$$V_{bat} = V_e + I_{bat} \times R_1 \quad (3.1)$$

Où R_1 représente les résistances R_{charge} et $R_{décharge}$ en selon le mode de fonctionnement. En mode charge, R_{charge} et V_e peuvent être écrits comme suit :

$$R_{charge} = \left(0.758 + \frac{0.139}{(1.06 - SOC(t)n_s)}\right) \frac{1}{SOC_m} \quad (3.2)$$

Où $SOC(t)$ est l'état de charge de la batterie à l'instant t, SOC_m est l'état de charge maximal de la batterie, et n_s est le nombre de groupes de la série 2V dans la batterie. Par exemple, si la tension de la batterie est de 12V alors n_s est 6. En mode décharge, les équations sont :

$$R_{décharge} = \left(0.19 + \frac{0.1037}{(SOC(t) - 0.14)n_s}\right) \frac{1}{SOC_m} \quad (3.3)$$

$$V_e = (1.986 + 0.124 \times SOC(t))n_s \quad (3.4)$$

Pour obtenir le $SOC(t)$ on utilise l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{1}{3600} \int_{t-1}^t \left(\frac{K_b V_e I_{bat}}{SOC_m} - SOC(t-1)D_d \right) dt \quad (3.5)$$

Où K_b est l'efficacité de charge et de décharge, et D_d est le taux d'autodécharge de la batterie.

3.6 Contrôleur de charge

Une batterie au plomb entièrement déchargée peut consommer une très grande quantité de courant de charge. En pratique, le courant de charge n'est pas limité par les propriétés d'une batterie, mais par le chargeur de batterie. Fondamentalement, nous avons utilisé trois étapes pour charger la batterie au plomb comme le montre la Figure. 3.4, la batterie que nous utilisons une batterie de 12 V et de 6 cellules et sa capacité 7 Ah. Ces étapes sont : Bulk, Absorption et Float.

L'étape Bulk est l'endroit où la batterie reçoit la plus grande partie de son énergie, ce qui représente environ 80% du cycle de recharge. Pendant cette phase, la batterie reçoit le courant le plus possible tout en gardant la température de la batterie sous $100F$. Un contrôleur à trois étapes ajoute une phase d'absorption (parfois appelée «étape d'égalisation»). Pendant cette phase, le contrôleur maintient la tension de charge entre $14.5 V$ et $14.9 V$, tout en diminuant l'ampérage de charge. Cela permet de conserver l'énergie stockée pendant l'étape Bulk. La phase Float est l'étape où la tension de charge est réduite entre $13,6 V$ et $13,8 V$ et maintenue constante, tandis que le courant est réduit moins que 1% de la capacité de la batterie. Ce mode peut être utilisé pour maintenir une batterie complètement chargée indéfiniment [70].

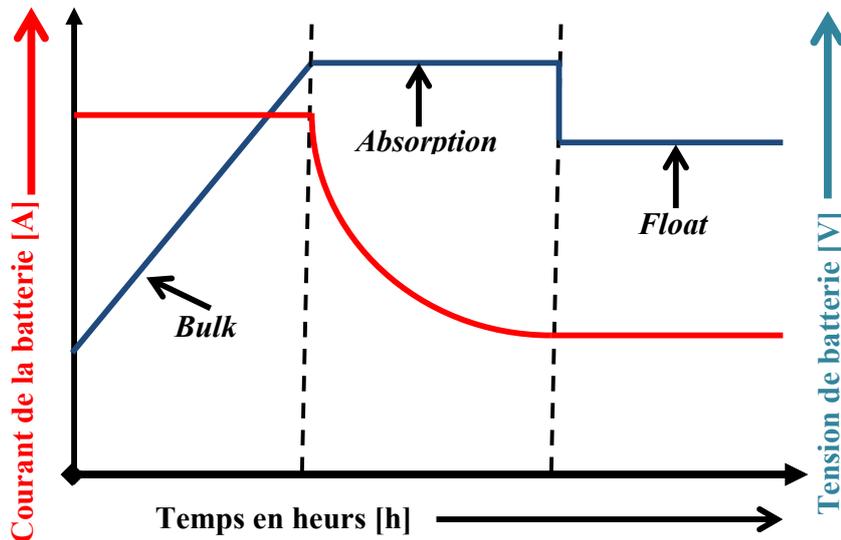


FIGURE 3.4 – Les phases de chargement de la batterie au plomb.

3.7 Types de contrôleur de charge

Les deux types de contrôleurs de charge les plus couramment utilisés dans les systèmes d'énergie solaire actuels sont la modulation de largeur d'impulsion (PWM) et le suivi de point de puissance maximum (MPPT).

3.7.1 Chargeur à modulation de largeur d'impulsion

Le contrôleur de charge à modulation de largeur d'impulsion (PWM) est le moyen le plus efficace pour obtenir une charge de batterie à tension constante en ajustant le rapport cyclique des commutateurs (MOSFET) [71]. Dans le régulateur de charge PWM, le courant provenant du panneau solaire diminue en fonction de l'état de la batterie et des besoins de recharge. Quand une tension de batterie atteint le point de consigne de régulation, l'algorithme PWM réduit lentement le courant de charge pour éviter le chauffage de la batterie ; Cependant, la charge continue de délivrer le maximum d'énergie à la batterie. La tension du module PV sera réduite à celle de la batterie [72].

Un contrôleur PWM n'est pas un convertisseur DC/DC. Le contrôleur PWM est un interrupteur qui connecte le panneau solaire à la batterie. Lorsque l'interrupteur est fermé, le panneau et la batterie seront presque à la même tension. En supposant une batterie déchargée, la tension de charge initiale sera d'environ 13 V, et en supposant une perte de tension de 0,5 V sur le câblage et le contrôleur, le panneau sera à 13,5 V. La tension augmentera lentement avec l'augmentation de l'état de charge de la batterie. Lorsque la tension d'absorption est atteinte, le contrôleur PWM commencera à déconnecter le panneau PV. Il existe deux types de chargeur PWM ; chargeur série et chargeur parallèle [73].

3.7.1.a Chargeur série

Le contrôleur série coupe le courant supplémentaire qui traverse les batteries lorsqu'elles sont pleines. Ce type de contrôleur dans la Figure. 3.5 fonctionne en série avec le module PV et la batterie. Il existe plusieurs variantes du contrôleur de type série, qui utilisent toutes un certain type d'élément de commande ou de régulation en série. Le relais ou l'interrupteur à semi-conducteurs ouvre le circuit entre le panneau PV et la batterie pour interrompre la charge, ou limite le courant d'une manière linéaire en série pour maintenir la tension de la batterie à une valeur élevée [74].

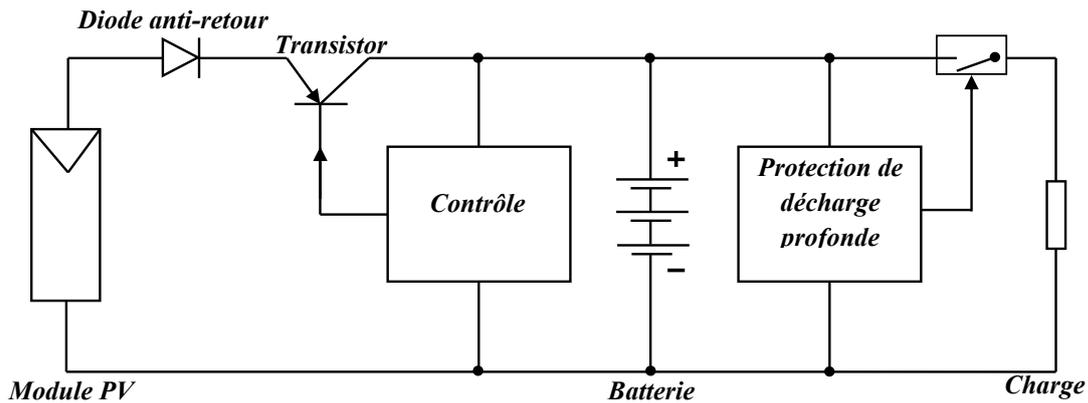


FIGURE 3.5 – Chargeur solaire série.

3.7.1.b Chargeur parallèle

Les contrôleurs parallèles (Figure. 3.6) (également appelés contrôleurs shunt), tout courant de module PV non nécessaire à la batterie est dérivé vers une charge auxiliaire, comme un chauffe-eau électrique, lorsque les batteries sont pleines. Tous les contrôleurs parallèles doivent avoir une diode de blocage en série entre la batterie et l'élément shunt pour éviter que la batterie ne court-circuite pas lorsque le panneau PV est en train de réguler. L'élément de régulation dans les contrôleurs shunt est typiquement un transistor de puissance ou MOSFET [74].

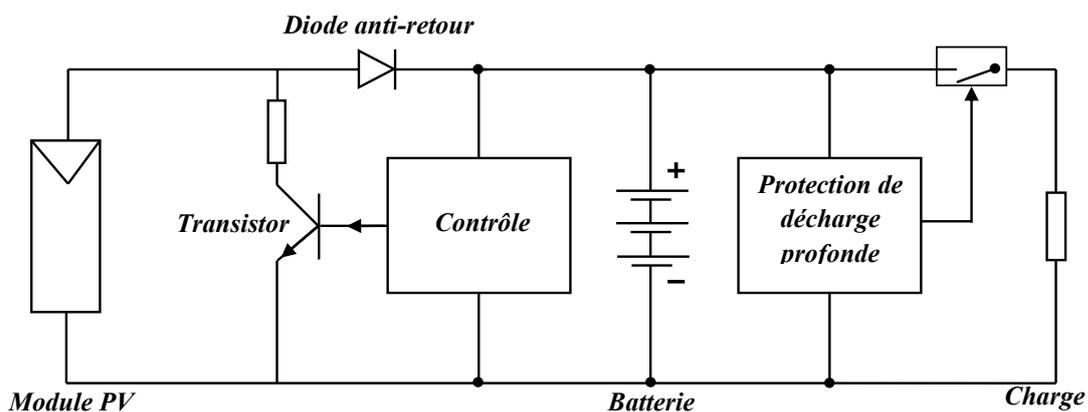


FIGURE 3.6 – Chargeur solaire parallèles.

3.7.2 Chargeur à suivi de point de puissance maximum

De nos jours, le contrôleur de charge solaire le plus avancé disponible est le chargeur MPPT. C'est plus sophistiqué et plus cher. Il a plusieurs avantages

sur le chargeur PWM. Il est 30 à 40% plus efficace à basse température [75]. Le chargeur MPPT est basé sur convertisseur DC/DC, dans notre cas on a utilisé le convertisseur SEPIC comme le montre la Figure. 3.7. Il fait passer la tension du panneau solaire plus élevée à la tension de charge de la batterie. Il ajustera sa tension d'entrée pour récolter la puissance maximale du panneau solaire, puis transformera cette puissance pour répondre aux exigences de tension variables de la batterie. Le contrôleur de charge MPPT est un convertisseur continu-continu qui peut transformer l'énergie d'une tension plus élevée en énergie à une tension inférieure. La quantité de puissance ne change pas, donc, si la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, le courant de sortie sera plus élevé que le courant d'entrée, de sorte que le produit $P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv}$ reste constant. Par conséquent, afin d'extraire le maximum d'un panneau PV, le contrôleur de charge devrait pouvoir choisir le point de fonctionnement optimal. Le panneau solaire n'utilise pas son point de puissance maximale dans les deux dernières phases de chargement [76][77][78][79].

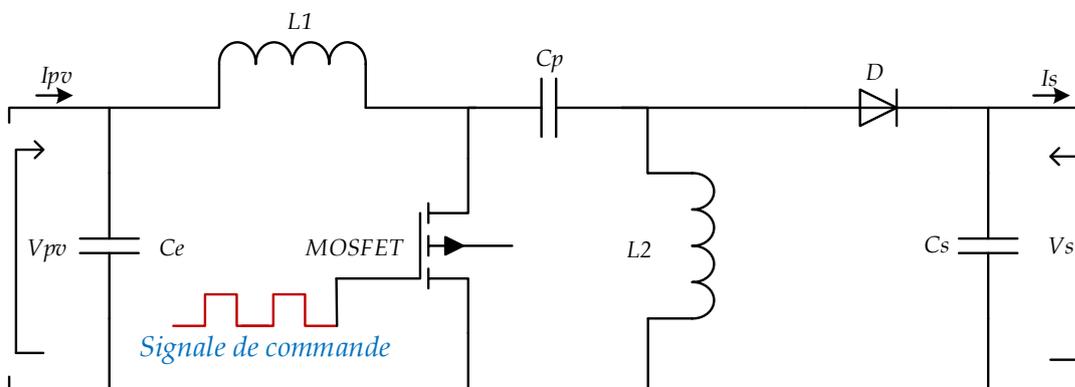


FIGURE 3.7 – Convertisseur SEPIC.

Le chargeur MPPT présente les avantages suivants :

- Efficacité de charge plus élevée.
- Plus longue vie de la batterie.
- Minimise le stress sur la batterie. Comparaison entre le
- Réduction de la surchauffe de la batterie.

3.8 Comparaison entre le chargeur MPPT et PWM

Le chargeur de batterie le plus basique surveille simplement la tension de la batterie et ouvre le circuit, arrêtant la charge, lorsque la tension de la batterie atteint un certain niveau. Les anciens contrôleurs de charge utilisaient un relais mécanique pour ouvrir ou fermer le circuit, arrêtant ou démarrant l'alimentation des batteries.

Les chargeurs de batterie les plus modernes utilisent la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour réduire lentement la quantité d'énergie appliquée aux batteries lorsque les batteries se rapprochent à leur pleine charge. Ce type de contrôleur permet aux batteries d'être complètement chargées avec moins de contraintes sur la batterie, ce qui prolonge la durée de vie de la batterie. Il peut également garder les batteries dans un état complètement chargé indéfiniment. Le plus récent et le meilleur type de chargeur solaire est appelé MPPT. Les contrôleurs MPPT sont fondamentalement capables de convertir l'excès de tension en ampérage. Cela a des avantages dans plusieurs domaines différents. La plupart des systèmes d'énergie solaire utilisent des batteries de 12 volts, comme vous trouvez dans les voitures. Les panneaux solaires peuvent fournir une tension plus élevée que celle requise par la batterie. En transformant essentiellement la tension excédentaire en ampères, la tension de charge peut être maintenue à un niveau optimal tandis que le temps requis pour charger complètement les batteries est réduit. Cela permet au système d'énergie solaire de fonctionner de manière optimale à tout moment.

Un autre domaine qui est amélioré par un contrôleur de charge MPPT est la perte de puissance. Une tension faible dans les fils entre les panneaux solaires et le contrôleur de charge entraîne une perte d'énergie plus élevée dans les fils qu'une tension plus élevée. Avec un chargeur PWM utilisé avec des batteries 12V, la tension du panneau PV délivrée au contrôleur de charge doit généralement être de 18 V. L'utilisation d'un contrôleur MPPT permet des tensions beaucoup plus élevées dans les câbles entre les panneaux et le contrôleur de charge solaire. Le

contrôleur MPPT convertit ensuite la surtension en ampères. En faisant passer une tension plus élevée dans les câbles des panneaux solaires au contrôleur de charge, la perte de puissance dans le câble est considérablement réduite. Lorsque vous utilisez des panneaux haute tension supérieures à 35 V pour charger une batterie de 12 V , la seule option de contrôleur est un contrôleur de charge MPPT.

La fonction finale des contrôleurs de charge solaire modernes empêche le courant inverse, lorsque les panneaux PV ne produisent pas de l'électricité, l'électricité des batteries peut effectivement s'inverser à travers le module PV. On peut charger les batteries en utilisant l'énergie solaire toute la journée ; Le contrôleur de charge peut détecter quand aucune énergie provient à partir des panneaux solaires et ouvrir le circuit, déconnecter les panneaux solaires et arrêter le courant inverse [80].

Chargeur solaires PWM	Chargeur solaires MPPT
Les Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> • Les contrôleurs PWM sont construits sur une technologie éprouvée par le temps. Ils ont été utilisés pendant des années dans les systèmes solaires, et sont bien établis. • Ces contrôleurs sont peu coûteux. • Ces contrôleurs sont disponibles en plusieurs dimensions pour des applications différentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les chargeurs MPPT offrent une augmentation potentielle de l'efficacité de charge jusqu'à 30%. • Ces contrôleurs offrent également la possibilité d'avoir un panneau PV avec une tension d'entrée plus élevée que la batterie. • Le chargeur MPPT est le seul moyen de réguler le générateur solaire pour le chargement de la batterie. • Le chargeur MPPT offre une grande flexibilité pour le développement du système. • Les garanties des chargeurs MPPT sont plus longues que les chargeurs PWM.
Les Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> • La tension nominale d'entrée solaire doit correspondre à la tension nominale de la batterie. • Ne peut pas être utilisé avec des modules PV à haute tension. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les chargeurs MPPT sont plus chers, parfois deux fois plus chers qu'un chargeur PWM

TABLEAU 3.2 – Comparaison entre le chargeur MPPT et le chargeur PWM.

3.9 Conception d'un chargeur MPPT

En utilisant une technique de tension ascendante, le contrôleur peut charger la batterie jusqu'à ce qu'elle atteigne $13,8\text{ V}$. Notez que la valeur du courant dépend de la différence de potentiel entre la source et la charge. Cette technique est appelée charge flottante et elle est utilisée pour fournir à la batterie une quantité proportionnelle de courant et de tension en fonction de son état de charge. La Figure. 3.8 représente le schéma de principe du système. La tension désirée et le courant maximum autorisé sont déterminés. Le système lit le courant et la tension réels et les compare à ceux qui sont désirés en se basant sur l'algorithme de chargement (Figure. 3.9).

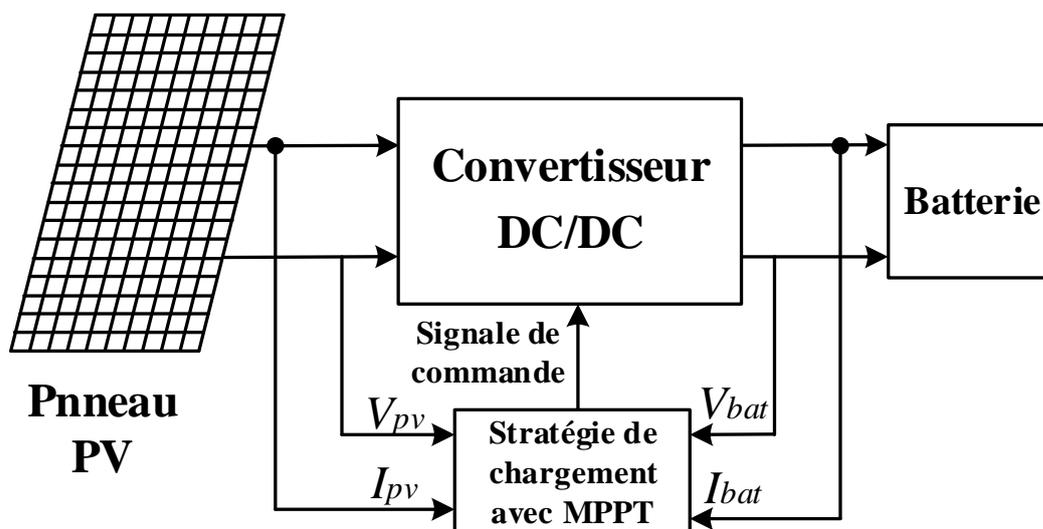


FIGURE 3.8 – le schéma de principe du chargeur MPPT.

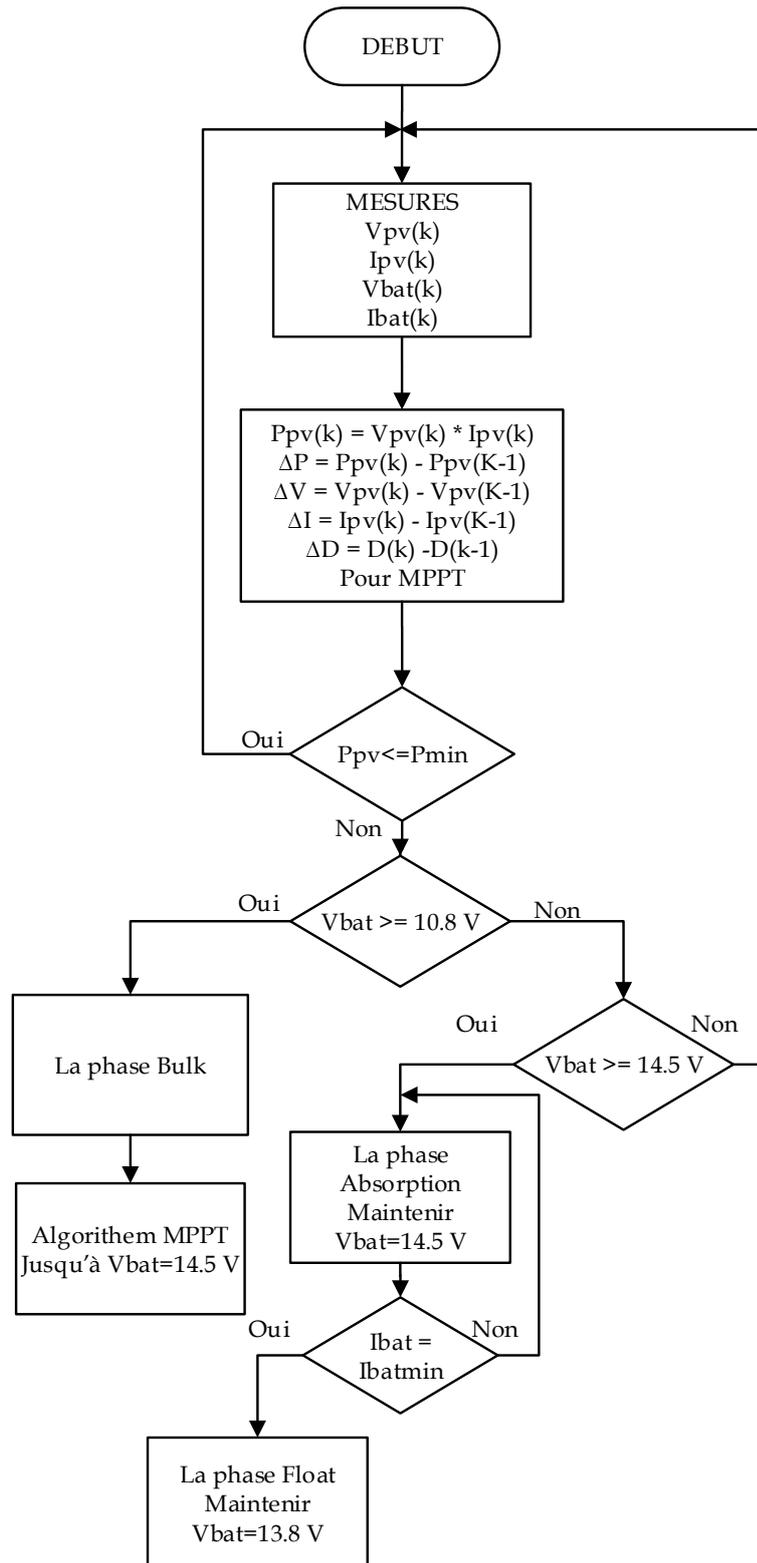


FIGURE 3.9 – Organigramme de la stratégie de contrôle pour le chargeur de batterie.

En fait, le rôle du microcontrôleur est de lire le courant réel de la batterie et de le comparer au courant maximum autorisé. Si le courant de consommation de

batterie élevée, le signal du rapport cycle PWM diminue. Si ce n'est pas le cas, la tension de la batterie est lue et comparée à la tension désirée. La tension désirée est limitée à $13,8V$ dans notre cas expérimental. Si la tension de la batterie est inférieure à la tension désirée, le rapport cycle est augmenté en augmentant la tension aux bornes de la batterie. Lorsque la tension réelle de la batterie dépasse la limite souhaitée, le rapport cycle diminue. En outre, une égalisation entre les tensions désirées et les tensions réelles maintient à une erreur égale zéro. Par conséquent, le rapport cycle conserve son ancienne valeur [81].

3.10 Résultats expérimentaux

Le chargeur Solaire MPPT se compose d'un panneau PV, convertisseur SEPIC, microcontrôleur PIC16F877A et la batterie. Le convertisseur SEPIC (Figure. 3.10) est commandé par le rapport cyclique, les composants du convertisseur SEPIC sont dans le Tableau.3.3. Le microcontrôleur PIC16F877A est programmé avec l'algorithme classique proposé. Le courant et la tension du module PV et la batterie sont mesurés respectivement à l'aide de l'ACS712 (capteur de courant) et du diviseur de tension.

Paramètres	Variable	Valeur
Capacité d'entrée	C_e	$2200 \mu F$
Capacité de sortie	C_s	$2200 \mu F$
Inductance	$L_1=L_2$	$184 \mu H$
Capacité de couplage	C_P	$1000 \mu F$
Fréquence de commutation	f_{SW}	$10 kHz$

TABLEAU 3.3 – Composants du convertisseur DC-DC SEPIC.

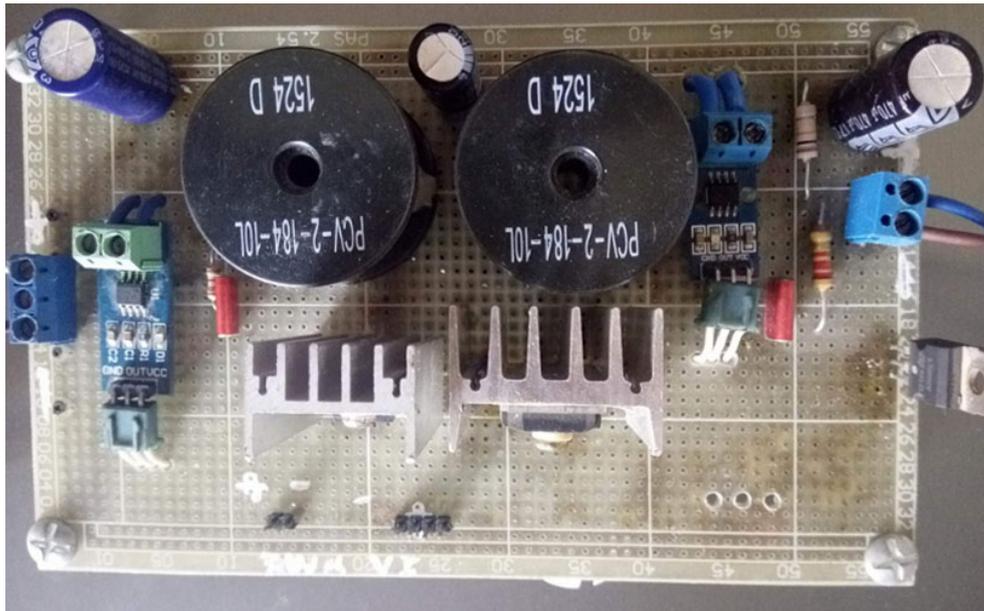


FIGURE 3.10 – Convertisseur SEPIC.

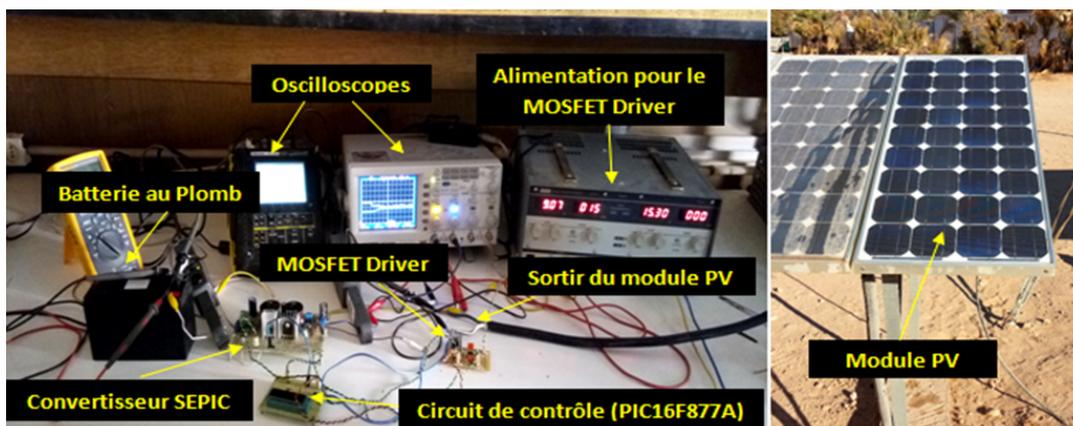


FIGURE 3.11 – Le système global de test expérimental installé dans l'unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, Adrar, Algeria.

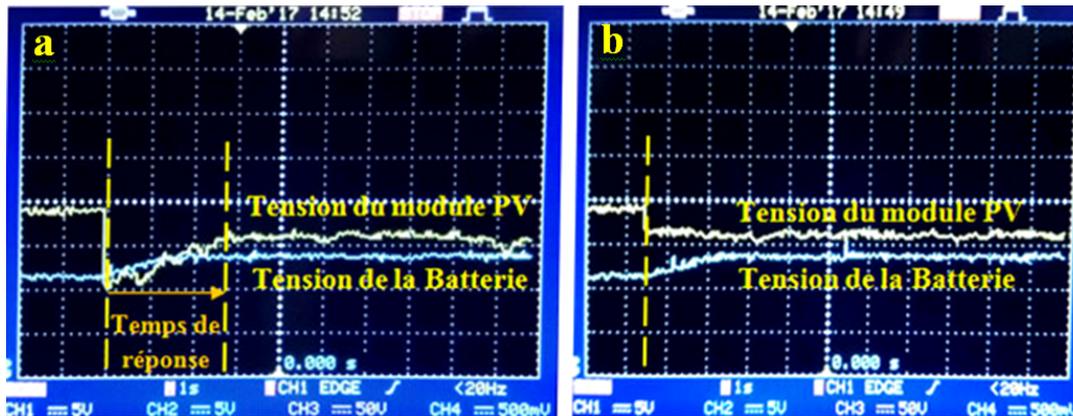


FIGURE 3.12 – Tension du panneau PV et tension de la batterie, a) Algorithme IncCond classique, b) Algorithme $P\&O$ proposé.

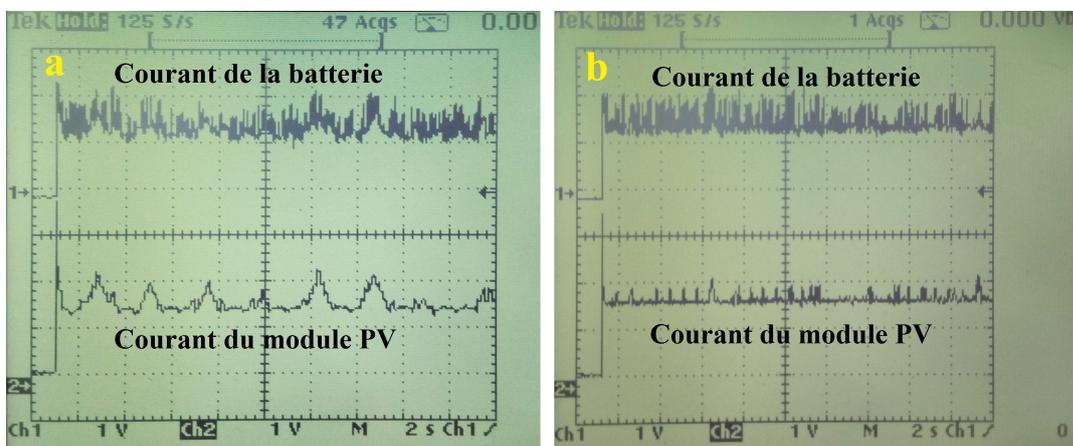


FIGURE 3.13 – Tension du panneau PV et tension de sortie du convertisseur, a) Algorithme IncCond classique, b) Algorithme IncCond proposé.

Afin de valider la stratégie de contrôle MPPT du système, un test final a été effectué consistant à charger la batterie au plomb. Le but principal est de tester le fonctionnement du contrôle de charge. On peut voir sur les Figure. 3.12 et Figure. 3.13, l'algorithme MPPT extrait la puissance maximale de panneau PV, l'algorithme proposé a une réponse dynamique plus rapide que l'algorithme conventionnel qui garantit un rendement supérieur.

3.11 Conclusion

Ce chapitre présente la conception d'une stratégie de contrôle MPPT implémentée dans un microcontrôleur, un convertisseur SEPIC utilisé comme chargeur solaire efficace pour les batteries au plomb. Les résultats et les tests expérimentaux pour un prototype de système photovoltaïque de puissance nominale 75W, valident la stratégie de contrôle. La puissance électrique produite par les panneaux photovoltaïques est maximisée, en utilisant la technique MPPT IncCond qui garantit un rendement supérieur et une réponse dynamique rapide. Le chapitre suivant présente l'étude du système de pompage solaire.