

### III.1 Définition

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est reliée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

### III.2 Fonctionnement technique ou scientifique :

#### A) Sous forme d'énergie chimique :

Tout combustible peut être considéré comme un réserve d'énergie sous forme chimique. En brûlant, le composé dégage de l'énergie sous forme de chaleur qui peut être récupérée et valorisée.

##### a) Stockage intrinsèque:

Hydrocarbures exemple: gaz, carbure.

Biomasse exemple: matières organiques (bois, les déché, etc.).

##### b) Production d'hydrogène.

#### B) Sous forme d'énergie thermique :

Actuellement, le stockage thermique est peu exploité. Son usage devrait croître à l'occasion du développement des fermes solaires thermodynamiques.

a) Stockage par chaleur sensible : exemple : l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton.

**b) Stockage par chaleur latente :** changement d'état de matériaux (par exemple solide-liquide).

**C) Sous forme d'énergie mécanique :**

Cette catégorie regroupe les voies les plus connues de stockage à grande échelle : le stockage hydraulique et à air comprimé. Elle inclut aussi les volants d'inertie.

**D) Sous forme d'énergie électrique :** exemple : super condensateurs.

**E) Sous forme d'énergie électrochimique :**

Le stockage de l'énergie dans les batteries électrochimiques est la technique la plus répandue pour les petites quantités d'énergie électrique. En fonction du type de batterie (plomb-acide, lithium-ion, nickel-métal hydrure, etc.), différentes réactions chimiques sont provoquées à partir de l'électricité : il s'agit de la phase de charge de la batterie. Selon la demande, les réactions chimiques inversées produisent ensuite de l'électricité et déchargent le système.

Les batteries électrochimiques sont souvent destinées à des applications portables. De puissance relativement faible, elles présentent une grande capacité de stockage pour des durées de décharge élevées (jusqu'à plusieurs heures) avec un taux de rendement de 70 à 80%. Ces dispositifs peuvent également avoir des fonctions de secours lorsque le réseau électrique est défaillant ou dans le cas d'une production d'électricité issue des énergies renouvelables, avec des valeurs d'énergie stockée de quelques Wh jusqu'à 40 MWh. L'inconvénient majeur est lié à leur durée de vie, limitée par les dégradations chimiques des réactions et leur coût.

### **III.3 Les Caractéristiques principales d'une batterie :**

**A) Capacité en Ampère heure :**

Les ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

**\* Rapports de chargement et déchargement :**

Si la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement.

Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

#### **\*Température :**

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère.

Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés.

Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement.

Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

#### **B) La durée de vie :**

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent.

Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

#### **C) Profondeur de décharge :**

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle.

La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager.

Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

#### **D) La tension d'utilisation :**

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

**E) Le rendement :**

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

**F) Le taux d'autodécharge :**

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

**III.4 Types d'accumulateurs :****a) Les accumulateurs au Nickel- cadmium.****b) Les accumulateurs au lithium-ion.****c) Les accumulateurs au plomb- Acide :**

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique.

La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte [06].

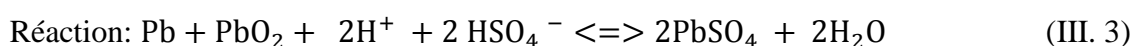
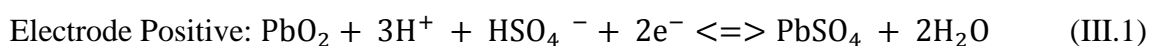
**III.5 Principe de fonctionnement :**

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ses deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons.

L'électrolyte en présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions.

Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes [06] [20].

Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale:



### III.6 Modélisation de stockage :

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie.

Le système de stockage utilisé dans une installation photovoltaïque est une batterie d'accumulateur au plomb.

Cette étude, nous permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur photovoltaïque et la charge demandée.

#### III.6.1 Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps  $t$  peut être décrite par :

$$C_{\text{Bat}}(t) = C_{\text{Bat}}(t-1) \cdot (t - \sigma) + (P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{L}}(t)/\eta_{\text{inv}}) \cdot \eta_{\text{Bat}} \quad (\text{III.4})$$

$C_{\text{Bat}}(t)$  et  $C_{\text{Bat}}(t-1)$  sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps  $(t)$  et  $(t-1)$  respectivement,  $\sigma$  est le taux horaire de la charge spontanée,  $P_{\text{pv}}$  est la puissance du générateur PV,  $P_{\text{L}}$  est la charge demandée au temps  $t$ ,  $\eta_{\text{inv}}$  et  $\eta_{\text{Bat}}$  sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est entre 0.65 et 0.85 selon le chargement, par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1 [06].

#### III.6.2 Modèle de la décharge de la batterie :

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps  $t$  peut être exprimée comme suite :

$$C_{\text{Bat}}(t) = C_{\text{Bat}}(t-1) \cdot (t - \sigma) + (P_{\text{L}}(t)/\eta_{\text{inv}} - P_{\text{pv}}(t)) \quad (\text{III.5})$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{\text{Batmin}} \leq C_{\text{Bat}}(t) \leq C_{\text{Batmax}} \quad (\text{III.6})$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ( $C_{\text{Batmax}} = C_{\text{BatN}}$ ), et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) :

$$C_{\text{Batmin}} = \text{DOD} \cdot C_{\text{BatN}} \quad (\text{III.7})$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge,  $SOC_{\min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%.

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie [06].

Elle peut être estimée par la relation suivante:

$$C_{Bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{dech} \cdot DOD} [Wh] \quad (III.8)$$

$$C_{Bat} [Ah] = \frac{C_{Bat}}{V_b} [Wh] \quad (III.9)$$

$C_{Bat}$ : La capacité de stockage de la batterie.

$E_L$ : le potentiel de l'électrode

$N_a$ : Le nombre de jours d'autonomie.

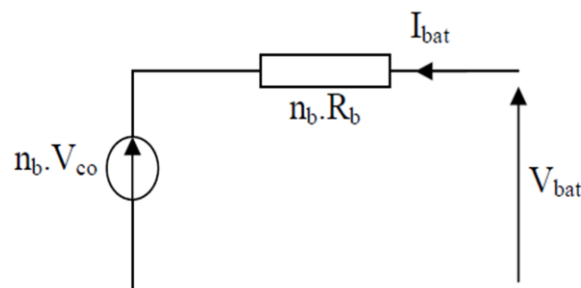
$V_b$ : La tension du système.

**DOD**: La profondeur de décharge

### III.6. 3 La tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, le courant et l'état de charge .

Ce modèle basé sur le schéma électrique de la figure III.1.



**Figure. III.1** Schéma électrique de la batterie.

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation:

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (III.10)$$

Où  $V_{bat}(t)$  est la tension de circuit ouvert au temps  $t$ , et  $R_{bat}(t)$  est la résistance interne de batterie, Ohms ; la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge:

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(SOC(t)) \quad (III.11)$$

Où  $VF$  est la force électromotrice ;  $b$  est une constante empirique.

La variation de la résistance interne d'une batterie,  $R_{bat}(t)$ , est principalement dû à deux composants, à savoir, la résistance d'électrode  $R_{électrode}$ , et la résistance d'électrolyte  $R_{électrolyte}$

$$R_{bat}(t) = R_{électrode} + R_{électrolyte} \quad (III.12)$$

La variation de  $R_{électrode}$  et  $R_{électrolyte}$  en fonction de l'état de charge SOC peut être exprimée par :

$$R_{électrode} = r_1 + r_2 \cdot (SOC(t)) \quad R_{électrolyte} = [r_3 - r_4 \cdot (SOC(t))]^{-1} \quad (III.13)$$

Où  $r_1, r_2, r_3$ , et  $r_4$  sont des constants empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge [16].

Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant:

Paramètres	Mode de charge	Mode de décharge
VF	13.250 V	12.662 V
b	0.810	0.724
$r_1$	0.062 Ohms	0.055 Ohms
$r_2$	0.046 Ohms	-0.010 Ohms
$r_3$	95.638 Ohms <sup>-1</sup>	4.270 Ohms <sup>-1</sup>
$r_4$	52.671 Ohms <sup>-1</sup>	-100.730 Ohms <sup>-1</sup>

**Tableau.** Caractéristique de batterie plomb acide

### III.6.4 Courant de batterie:

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps  $t$  peut être décrit par:

$$I_{Bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} \quad (III.14)$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est:

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} - \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (III.15)$$

### III.7 Simulation de la Batterie

La figure III.2 représente le schéma complet du système pv avec la batterie (plomb-acide)

les batteries les plus couramment utilisées (Plomb-acide, Lithium-Ion, Nickel-cadmium, et Nickel-Metal-Hydrure).

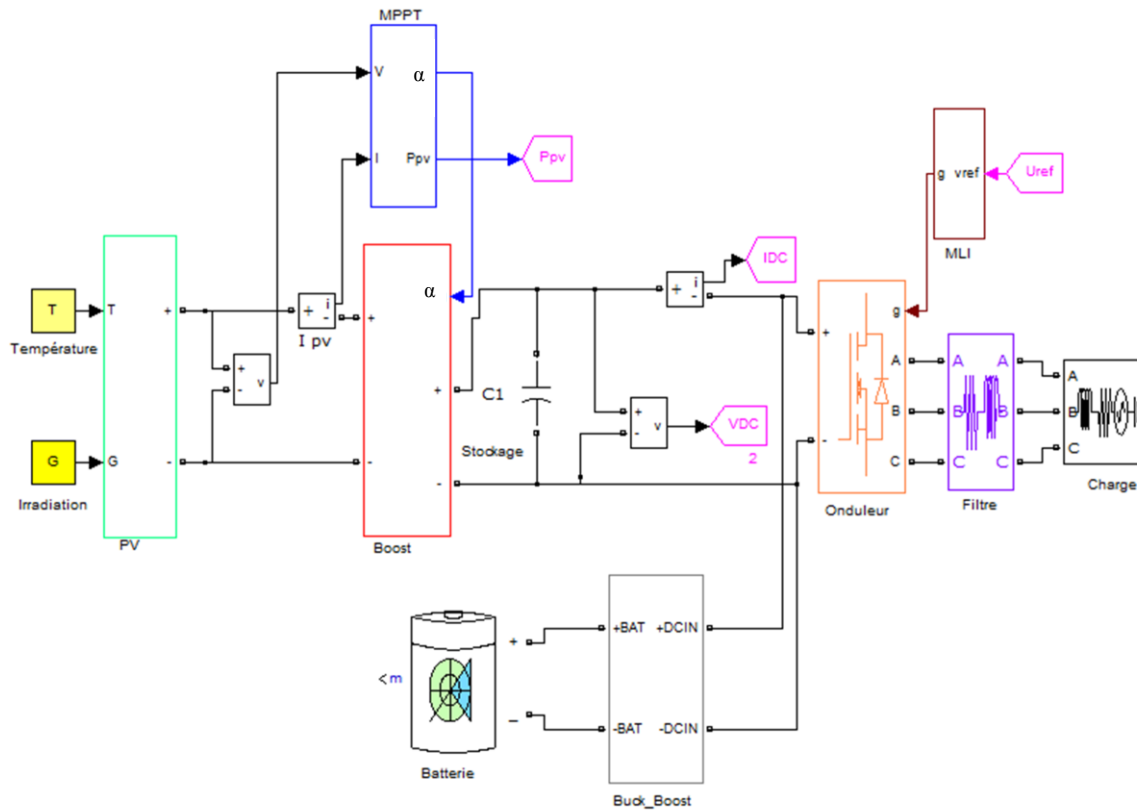


Figure III .2 : Schéma complet du système pv avec la batterie sous Matlab

#### a) Hypothèses

Un certain nombre d'hypothèses sont sous-jacente au modèle « battery » de Simulink.

La résistance interne est supposée être constante pendant la charge et les cycles de décharge, et ne varie pas avec l'amplitude du courant.

Les paramètres du modèle sont déduits des caractéristiques de décharge et sont supposés être les mêmes pendant la charge.

La capacité de la batterie ne change pas avec l'amplitude du courant.

La température n'affecte pas le comportement du modèle.

L'autodécharge de la batterie n'est pas représentée. Elle peut être représentée par l'ajout d'une grande résistance en parallèle aux bornes de la batterie (Rshunt).

La batterie n'a pas d'effet mémoire.



### b) Limites

La tension minimale à vide de la batterie est de 48 V et la tension maximale n'a pas de valeur limite.

La capacité minimale de la batterie est de 6.5 Ah et la capacité maximale n'est pas limitée.

Ainsi, le "SOC" (State Of Charge, niveau de charge) maximal peut être supérieur à 100% si la batterie est surchargée.

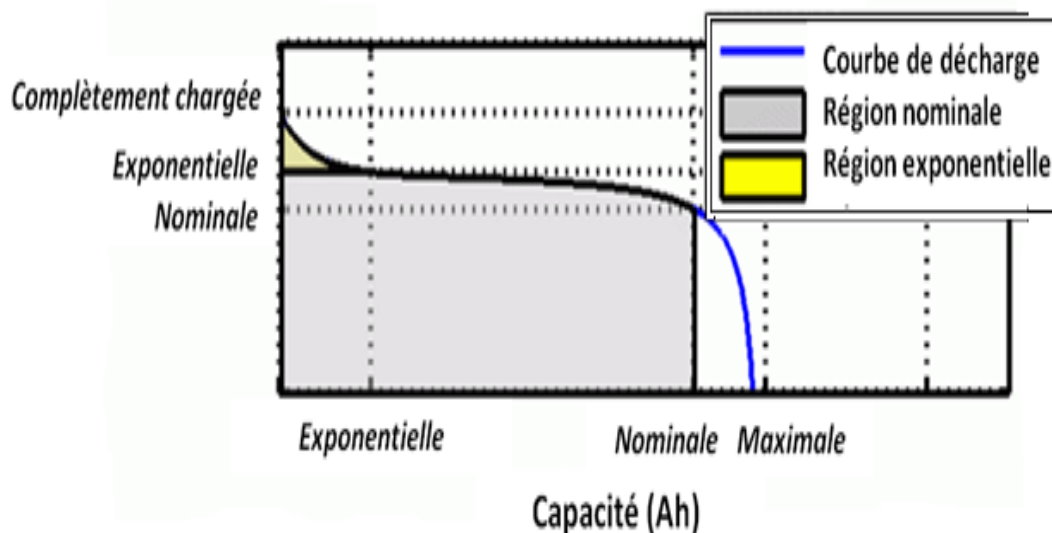
### c) Courbe de charge/décharge

Les paramètres du circuit équivalent peuvent être modifiés en fonction du type de batterie à représenter, en tenant compte de ses caractéristiques de décharge. Une courbe de décharge typique est composée de trois sections, comme le montre la figure III.3

La première partie représente la chute exponentielle de tension lorsque la batterie est chargée. Selon le type de batterie, cette zone est plus ou moins large.

La deuxième partie représente la charge qui peut être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension soit inférieure à la tension nominale de la batterie.

Enfin, la troisième partie représente la décharge totale de la batterie, lorsque la tension chute rapidement.



**Figure III.3** Courbe de décharge d'une batterie.

Le type de la batterie choisi sous Simulink est **plomb-acide (Lead-Acid)**.

Ce choix correspond à la dominance de la technologie des batteries au plomb dans le domaine du stockage photovoltaïque. Même si leur capacité par kilogramme est de 30 à 40 Wh /kg, plus faible

que les autres technologies (nitrure de cadmium (CdNi) : 50 à 70 Wh/kg, Lithium ion (Li-ion) : 150 Wh/kg), leur prix d'achat est de deux à quatre fois moins cher par kWh stocké que le CdNi et dix à vingt fois moins cher que le nickel-hydrure métallique (NiMh) ou lithium .

Les paramètres de la batterie du bloc Simulink ci-dessus sont les suivants :

Tension nominale : 48 V

Capacité nominale : 6.5 Ah

État de charge initial (Soc) : 90 %

En fonction du type de batterie choisi, les paramètres suivants du bloc Simulink restent fixes le courant de décharge nominal (5 % de la capacité nominale), tension de charge complète (108 %), la résistance interne (0,76923  $\Omega$ ), la capacité correspondant à la tension nominale (50 % de la capacité nominale).

### III.8 Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif permet l'adaptation de la tension du bus continue à celle de la tension de la batterie.

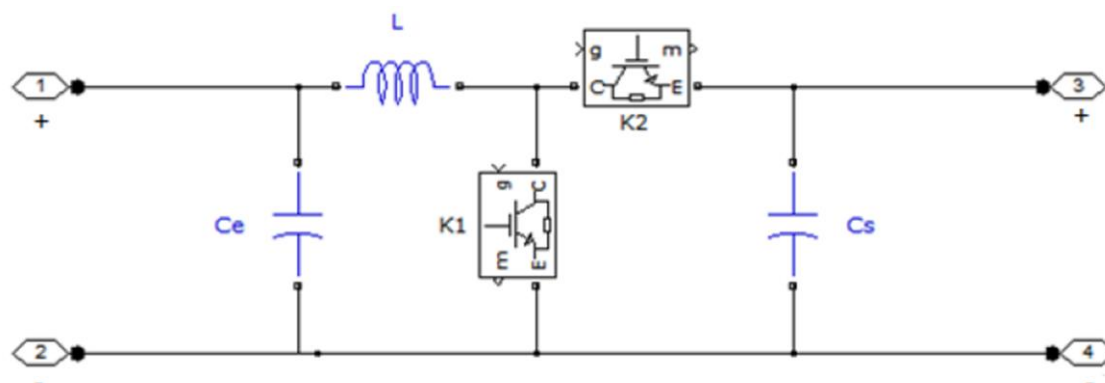


Figure III. 4 Schéma de fonctionnement d'un hacheur buck-boost.

### III.9 Principe de fonctionnement du convertisseur

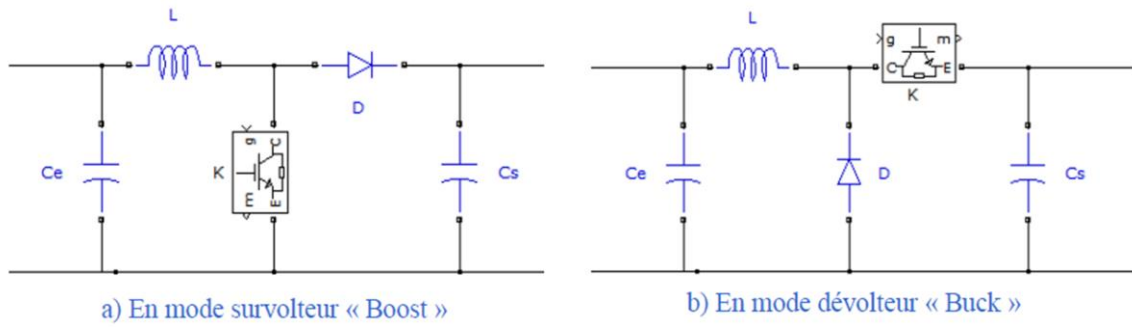
\* En condition normale ( $P_{pv} > P_{charge}$ )

Dans ce cas, le panneau photovoltaïque alimente la charge et l'ensemble {convertisseur\_ Batterie}.

Le maintien en charge de Batterie est géré par la commande « buck » du convertisseur.

\* Perte d'alimentation ( $P_{pv} < P_{charge}$ )

Dans ce cas, le convertisseur assure le maintien sans interruption de l'alimentation aux bornes de la charge, en utilisant comme source l'énergie provenant de la Batterie, par une commande « boost ».



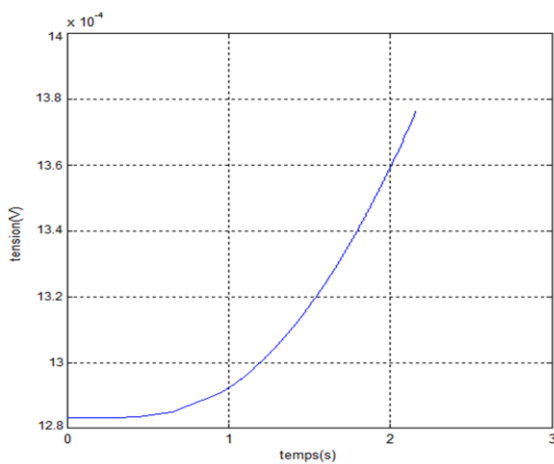
**Figure III.5** Circuit électrique de base du Hacheur survolteur –dévolteur.

Le modèle d'équation du convertisseur dans cette configuration s'écrit de la manière suivante :

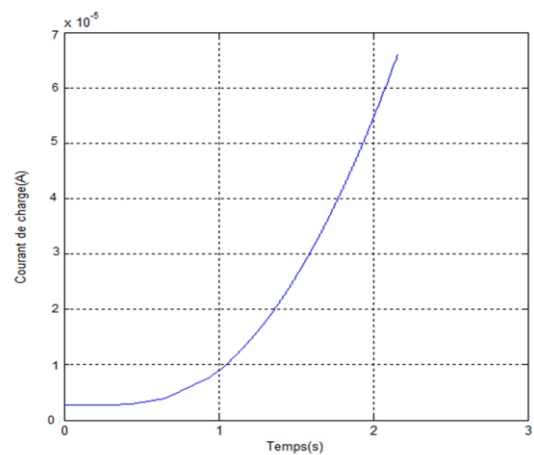
$$a) \begin{cases} \frac{dI_L}{dT} = (1 - \alpha) \frac{V_e}{L} + \frac{V_s}{L} & (III. 16) \\ \frac{dV_e}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_L}{C} - \frac{V_s}{R_C} & (III. 17) \end{cases}$$

$$b) \begin{cases} \frac{dI_L}{dT} = (1 - \alpha) \frac{V_s}{L} + \frac{V_s}{L} & (III. 18) \\ \frac{dV_e}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_L}{C} - \frac{V_s}{R_C} & (III. 19) \end{cases}$$

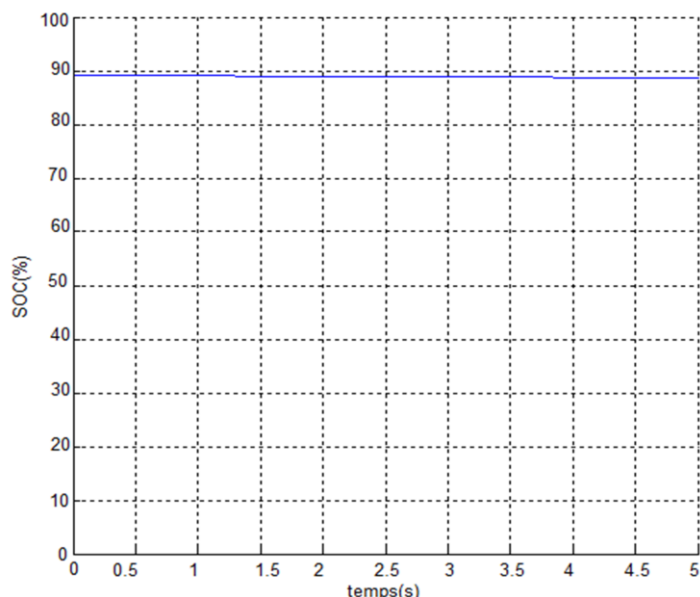
### III.10 Résultats de simulation



**Figure III.6 :** Tension de charge



**Figure III.7 :** courant de charge



**Figure III.8 :** soc% (état de décharge)

D'après les paramètres de la batterie plomb-acide choisie qui sont :

La tension nominale 48 v, la capacité nominale 6,5 Ah et l'état de charge initiale soc (90%)

Et d'après les résultats de simulation on remarque que l'état de charge est décroissant ce qui montre que la batterie est en état de décharge et elle fonctionne bien .

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les batteries de stockage, leur modélisation et les différents types existants. Le comportement dynamique de la batterie pendant les deux régimes (charge et décharge) en utilisant un hacheur bidirectionnel. Les résultats des simulations sont implantés sous l'environnement MATLAB. Les blocs développés ont permis de comprendre les différents phénomènes lors de son branchement.

L'inconvénient majeur de cette batterie vient du fait que l'état de décharge de la batterie (SOC) varie entre 60 et 100% et quand l'état de décharge de la batterie atteint 60% il devient nécessaire de la recharger avant la remise en fonctionnement .