

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : MICROELECTRONIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:

AZZOUZ Wafa et LEBOUKH Bouthaina

Intitulé

**Développement d'un modèle électrique d'une batterie
solaire photovoltaïque à l'aide du logiciel PSpice**

Soutenu devant le jury composé de:

SAIGAA Djamel	Université Mohamed Boudiaf -M'sila	Président
DRIF Mahmoud	Université Mohamed Boudiaf -M'sila	Rapporteur
KOURIKER Mustapha	Université Mohamed Boudiaf -M'sila	Co-Rapporteur
BOUCHELAGHEM Ahmed	Université Mohamed Boudiaf -M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022 / 2023

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 01 : Généralités sur le système photovoltaïque autonome

1.1.	Introduction	3
1.2.	Description du système photovoltaïque autonome	4
1.3.	Le générateur photovoltaïque.....	5
1.3.1	La cellule photovoltaïque.....	5
1.3.1.1	Définition et principe.....	5
1.3.1.2	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	5
1.3.2	Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque.....	7
a)	Le courant de court-circuit.....	8
b)	Tension de circuit-ouvert.....	9
c)	Le courant de saturation de la diode.....	9
1.3. 3.	Module Photovoltaïque.....	9
1.4	Le système de stockage.....	11
1.4.1	Accumulateur au plomb.....	12
1.4.2	Principe de fonctionnement.....	12
1.4.3	Caractéristiques de charge et décharge.....	14
a)	Caractéristique de charge.....	14

b)	Caractéristique de décharge.....	15
1.4.4	Capacité.....	16
1.4.5	Etat de charge.....	16
1.4.6	Durée de vie.....	17
1.4.7	Rendement.....	17
1.4.8	Autodécharge.....	17
1.4.9	Information sur l'état de charge d'un accumulateur.....	17
a)	Densité d'électrolyte.....	17
b)	Tension d'utilisation.....	18
1.5	Le système de conditionnement de la puissance.....	18
1.5.1	Système de régulation de charge.....	18
a)	Régulation à coupure.....	18
b)	Régulation à coupure partielle.....	20
c)	Régulation à modulation de largeur d'impulsion.....	21
d)	Régulation à optimisation de puissance.....	22
1.5.2	Conversion continue/alternative.....	22
1.6	Conclusion.....	23

Chapitre 02 : Modélisation de la batterie au Plomb-acide

2.1.	Introduction	24
2.2.	Modèles usuels de la batterie au Pb-acide.....	25
2.2.1	Modèle de Shepherd.....	25
2.2.2	Modèle de Macomber	26

2.2.3	Modèle de Lasnier	27
2.2.4	Modèle de Coppetti.....	28
2.3.	Conclusion.....	29
Chapitre 03 : Modélisation et simulation de la batterie au Pb-acide en PSpice		
3.1.	Introduction.....	30
3.2.	Outil de simulation orienté circuit – PSpice.....	30
3.2.1.	Aperçu sur PSpice.....	30
3.2.2.	Modélisation analogique comportementale (ABM).....	31
3.2.3.	Exemple introductif sur la modélisation analogique comportementale.....	32
3.3.	Implémentation du modèle de la batterie en PSpice.....	33
	• Modèle de Shepherd	33
	• Modèle de Macomber.....	33
3.4.	Simulation et résultats.....	35
3.4.1	Simulation hors ligne.....	36
3.4.2	Simulation en ligne.....	37
3.5.	Conclusion.....	41

Conclusion générale

Liste des figures

Figure 1.1. Schéma synoptique d'un SPVA	4
Figure 1.2: Schéma d'une cellule photovoltaïque	6
Figure 1.3. Caractéristiques I-V d'une cellule solaire avec courbes d'isopuissance et droite de charge	8
Figure 1.4. Mise en série des cellules solaires en module PV	10
Figure 1.5. Caractéristique de l'association en série de cellules PV	10
Figure 1.6. Caractéristique de l'association en parallèle de cellules solaires	10
Figure 1.7. Caractéristiques I-V et P-V d'une connexion mixte (série-parallèle). Avec N_s est le nombre de modules en série et N_{Pp} est le nombre de branches de modules en parallèle.....	11
Figure 1.8. Eléments constituant une batterie	12
Figure 1.9. Caractéristiques de charge d'une batterie au plomb (à courant constant).....	14
Figure 1.10. Caractéristiques de décharge d'une batterie au plomb acide de 100Ah (à différents courants)	16
Figure 1.11. Structures du dispositif de régulation	19
Figure 1.12. Cycles d'hystérésis de charge et de décharge	19
Figure 1.13. Topologie d'un système de régulation à coupure partielle	20
Figure 1.14. Topologie du système de régulation à modulation de largeur d'impulsion.....	21
Figure 1.15. Topologie d'un système de régulation à optimisation de puissance ...	22
Figure 2.1. Circuit électrique équivalent d'une batterie de n_b éléments	25
Figure 3.1. Schéma fonctionnel du PSpice	31

Figure 3.2. Certains blocs fonctionnels de l'ABM	32
Figure 3.3 Modélisation comportementale d'un redressement monophasé double-alternance	32
Figure 3.4. Signal de sortie $v_o = 2\sin(2\pi \cdot 50t) $	33
Figure 3.5. Schéma blocs du modèle de Shepherd de la batterie au Pb-acide	34
Figure 3.6. Schéma blocs du modèle de Macomber de la batterie au Pb-acide	34
Figure 3.7. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de décharge ($I_d=8A$, $I_d=10A$, $I_d=12A$) selon le modèle de Shepherd	35
Figure 3.8. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de décharge ($I_d=8A$, $I_d=10A$, $I_d=12A$) selon le modèle de Macomber	36
Figure 3.9. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de charge ($I_c=8A$, $I_c=10A$, $I_c=12A$) selon le modèle de Shepherd	36
Figure 3.10. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de charge ($I_c=8A$, $I_c=10A$, $I_c=12A$) selon le modèle de Macomber.....	37
Figure 3.11. Schéma bloc du modèle GPV dans l'environnement PSpice	37
Figure 3.12. Caractéristiques I-V simulées du GPV à différents niveaux d'irradiance	38
Figure 3.13. Caractéristiques P-V simulées du GPV à différents niveaux d'irradiance.....	38
Figure 3.14. Schéma blocs du SPVA modélisé à l'aide du PSpice	39
Figure 3.15. Variation du courant du GPV pendant 24 heures	40
Figure 3.16. Variation de la tension de batterie pendant 24 heures	40
Figure 3.17. Variation du courant de la batterie pendant 24heures	40
Figure 3.18. Variation de l'état de charge SOC de la batterie pendant 24heures ...	41

Figure 3.19. Signaux de commande des switches du régulateur de charge pendant
24 heures 41

Abréviations et symboles

GPV : un générateur photovoltaïque.

SCP : un système de conditionnement de puissance.

SPVA : un système photovoltaïque autonome.

MPPT : recherche du point de puissance maximum.

SOC : L'état de charge, (State Of Charge).

ABM: Analog Behavioral Modeling.

I_{ph} : est le courant photo-généré (en A)

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode (en A)

k : est la constante de Boltzmann ($k = 1.380 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T : est la température effective de la cellule (en K),

q : est la charge de l'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C),

A : est le facteur d'idéalité de la jonction,

I : est le courant fourni par la cellule (en A),

V : est la tension aux bornes de la cellule (en V),

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances des contacts
(en Ω),

I_{sc} : courant de court-circuit.

V_{oc} : la tension de circuit-ouvert.

P_m : la puissance maximale.

$I_{ph,STC}$: est le photo-courant aux STC ($1000\text{W}/\text{m}^2$, AM1.5); en (A).

α : est le coefficient de température du courant de court-circuit ; en ($\text{A}/^\circ\text{C}$)

T : est la température cellule ; en (K)

G : est l'irradiance reçue par la cellule PV ; en (W/m^2)

G_{STC} : est l'irradiance aux STC ($G_{STC}=\text{kW}/\text{m}^2$).

$V_{oc,STC}$: est la tension de circuit-ouvert aux STC ; en (V).

β : est le coefficient de température de la tension de circuit-ouvert ; en (V/°C). La valeur typique est égale à $-2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$.

I_0 : est le courant de saturation inverse à la température T_c

$I_{0,STC}$: est le courant de saturation inverse aux STC

E_g : est l'énergie de la bande interdite. Pour le silicium, elle est égale à 1.12eV

SOC (0) : Etat de charge initial (%) ;

SOC(t) : Etat de charge à l'instant t (%) ;

C_m : Capacité maximale (Wh) ;

n_p : Nombre de cellules de 2 V en série ;

D : Taux d'autodécharge (h^{-1}) ;

k_b : Paramètre adimensionnel exprimant le rendement charge/décharge.

Introduction générale

La batterie joue un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques en stockant l'énergie, ce qui permet de répondre à la demande énergétique en cas de variations d'ensoleillement ou lors de périodes de faible luminosité ou pendant la nuit. Elle améliore l'efficacité et l'autoconsommation de l'énergie solaire, réduisant ainsi la dépendance aux réseaux électriques classiques et offrant une plus grande autonomie énergétique. De plus, les batteries contribuent à la stabilité du réseau en prévenant les surcharges et les coupures brusques. Intégrer une batterie dans un système photovoltaïque est donc essentiel pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et accroître la fiabilité et la durabilité globale du système.

Pour étudier le comportement d'un système photovoltaïque à l'aide d'un simulateur électronique orienté circuit tel que le logiciel PSpice, il est nécessaire de disposer de modèles de circuit équivalents pour les principaux composants tels que le générateur photovoltaïque, les batteries et l'onduleur, etc. Il est crucial de connaître les caractéristiques électriques de ces composants pour une analyse de simulation précise. **Dans le cadre de ce projet de Master, l'objectif est de développer un modèle électrique de la batterie au plomb en utilisant l'option de la modélisation comportementale analogique (ABM : Analog Behavioral Modelling) disponible dans le logiciel de simulation PSpice.** Ce modèle pourrait servir comme un outil d'aide à la conception de certains dispositifs électroniques de la chaîne photovoltaïque, à l'image du régulateur de charge, du MPPT, de l'onduleur, etc. Alors, ***Comment développer un tel modèle de batterie au plomb-acide dans le logiciel de simulation PSpice et quels modèles de batterie sont utilisés dans la simulation ?*** Pour répondre au problème posé, nous avons scindé mémoire en trois chapitres.

Dans le chapitre 1, nous aborderons des généralités sur le système photovoltaïque (SPVA). Nous explorerons les principes de base de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur les composants clés tels que les modules, les onduleurs et les dispositifs de gestion de l'énergie. Ce chapitre fournira une compréhension approfondie des caractéristiques techniques du système photovoltaïque.

Dans le chapitre 2, nous présenterons les quatre modèles des batteries au Pb-acide à usage solaire photovoltaïque les plus couramment utilisés. Il s'agit plus précisément du : **Modèle de Shepherd, modèle de Macomber, modèle de Lasnier et enfin modèle de Copetti**, Sachant que chaque modèle exprime la tension de sortie analytique lors des phases de charge et de décharge. Ces modèles permettent d'analyser en détail les performances et l'efficacité énergétique des batteries dans les systèmes photovoltaïques

Généralités sur le système photovoltaïque autonome

1.1. Introduction

L'énergie électrique provenant d'une conversion photovoltaïque à partir de l'énergie solaire est devenue une alternative incontournable aux autres sources énergétiques en voie d'épuisement tel que le pétrole. Cette nouvelle source énergétique a montré par sa grande souplesse et son aptitude au fonctionnement en milieu hostile d'être la solution intéressante aux moyens de production conventionnels. De même, son exploitation est loin d'être préjudiciable à l'environnement que les combustibles fossiles et aussi d'avoir une portabilité et flexibilité inégalée par rapport aux autres ressources hydraulique, géothermique.

La conversion de cette nouvelle forme énergétique en électricité fut possible grâce à la découverte de nouveaux systèmes faits à base de cellules photovoltaïques. Ces dernières sont faites de matériaux constituant le siège du phénomène de Conversion photovoltaïque dont l'essentiel sera discuté à travers ce chapitre.

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques : les systèmes **autonomes**, les systèmes **hybrides** et les systèmes **connectés à un réseau** [1] Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

1.2. Description du système photovoltaïque autonome

Le système photovoltaïque autonome (SPVA) est un système énergétique utilisant la conversion de l'énergie solaire par l'effet photovoltaïque en une énergie électrique pour subvenir aux besoins de l'utilisation et pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de SPVA décrits sur la figure 1.1.

Deux catégories d'applications terrestres autonomes existent [2] :

- Les panneaux de signalisation routiers, les bornes de secours sur autoroute, les balises maritimes ou balises aéroportuaires, les commutateurs de Télécommunications, etc. représentent les applications professionnelles.
- Les autres applications sont liées à l'électrification des sites de particuliers comme les refuges, les habitations dispersées, les hôpitaux et divers établissements publics des pays en voie de développement, etc.

En effet, le SPVA se compose de quatre principales parties :

- Un générateur photovoltaïque (GPV),
- Un système de stockage d'énergie,
- Un système de conditionnement de puissance (SCP),
- Et éventuellement une source auxiliaire.

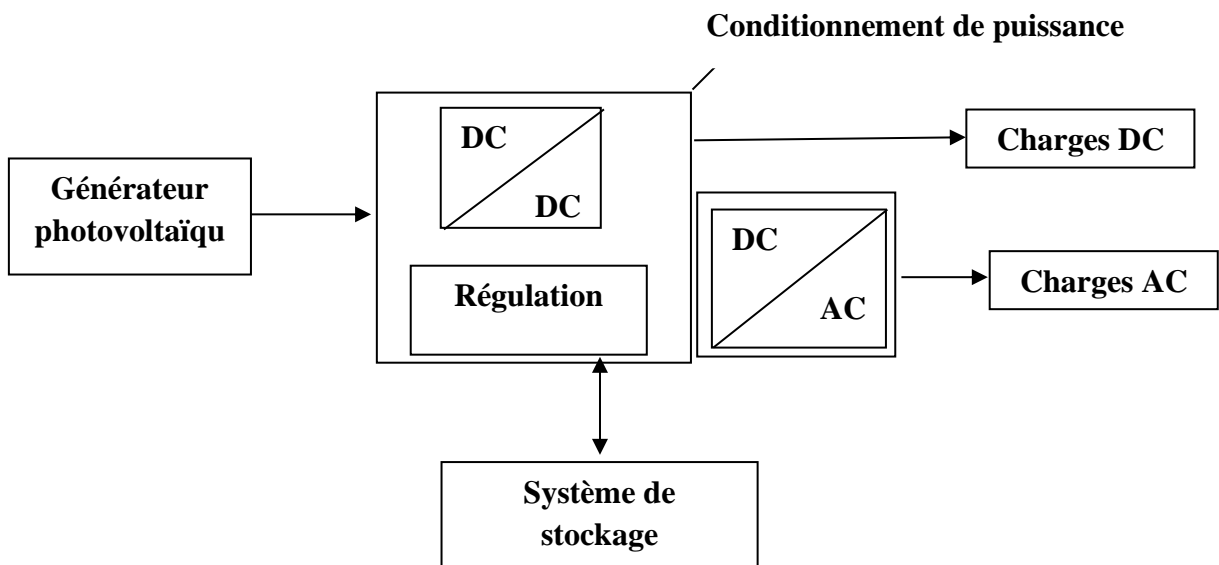


Figure 1.1. Schéma synoptique d'un SPVA

1.3. Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque (GPV) est composé par un assemblage de cellules élémentaires associées en module, lui-même associé en série/parallèle à plusieurs autres modules pour divers besoins en énergie électrique.

1.3.1 La cellule photovoltaïque

1.3.1.1 Définition et principe

La cellule photovoltaïque est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La cellule la plus répandue est réalisée à base de silicium monocristallin. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu. Le processus de transformation du rayonnement solaire en électricité est appelé l'effet photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est donc un dispositif transformant une partie de l'énergie lumineuse, issue du soleil par exemple, en énergie électrique. La proportion d'énergie transformée constitue le rendement de conversion de cette cellule. Certaines cellules photovoltaïques utilisent d'autres types de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium multicristallin et amorphe, l'arséniure de gallium ou un matériau en couches minces, qui produisent des porteurs de charge (électrons et trous) en absorbant des photons.

Si l'on applique une tension aux bornes d'un matériau photoconducteur éclairé, un courant circulera et sera sensible à la longueur d'onde du rayonnement lumineux : le matériau se comporte comme un dipôle passif.

Pour réaliser un dispositif actif, tel qu'une cellule PV, il est nécessaire de réaliser, à la surface du semi-conducteur, une jonction P-N (ou diode de surface). Le champ électrique sépare les porteurs de charge, entraînant les trous dans le sens du champ et les électrons en sens inverse.

La tension interne de la diode constitue la source de potentiel, et les photo-porteurs, la source de courant. La tension de sortie, de l'ordre du $\frac{1}{2}$ volt, et les densités de courant étant faibles, expliquent l'intérêt de réaliser des modules photovoltaïques regroupant différentes cellules élémentaires [3].

1.3.1.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour une représentation physique adéquate, les sources de tension ou de courant doivent toujours être utilisées en connexion avec : [4]

- Une résistance série dans le cas d'une source de tension (Figure 1.2a).
- Une résistance shunt dans le cas d'une source de courant (Figure 1.2b).

Chacune de ces deux résistances représente la résistance interne de la source correspondante.

La structure simple d'une cellule PV éclairée est par contre celle de la jonction PN ou NP. En fonctionnement, la cellule solaire s'identifierait à un générateur de courant de lumière (I_{ph}) auquel il faut soustraire le courant de la diode en polarisation directe (I_D). En pratique, on introduit une résistance shunt R_{sh} qui rend compte de certains effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule et une résistance série R_s traduisant les phénomènes de contact (métallisation de grille et de face arrière) entre la couche de base et la zone avant (Figure 1.2 .c).

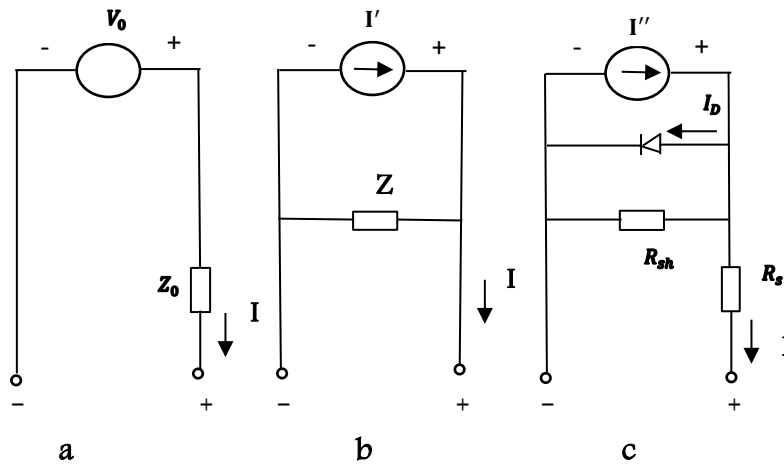


Figure 1.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque

a) Source de tension, b) Source de courant, c) Générateur photovoltaïque

C'est le modèle le plus simple et le plus employé. Comme le montre la figure 1.2.c le circuit électrique équivalent du modèle à une diode comprend une source de courant I_{ph} modélisant l'irradiance solaire et une diode en parallèle pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction. Pour tenir compte des propriétés résistives de la cellule, la résistance série R_s est ajoutée pour modéliser les pertes ohmiques dues à la résistivité du matériau et aux contacts électriques. La résistance shunt appelée aussi résistance de fuite sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les bords. Le courant fourni par la cellule est donné par la relation suivante (Eq. 1.1).

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(q \frac{V + R_s I}{A k T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Où :

- I_{ph} est le courant photo-généré (en A),
- I_o est le courant de saturation inverse de la diode (en A),
- k est la constante de Boltzmann ($k = 1.380 \cdot 10^{-23}$ J/K),
- T est la température effective de la cellule (en K),

- q est la charge de l'électron ($q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C),
 A est le facteur d'idéalité de la jonction,
 I est le courant fourni par la cellule (en A),
 V est la tension aux bornes de la cellule (en V),
 R_s est la résistance série représentant les diverses résistances des contacts (en Ω),
 R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction (en Ω).

Sous obscurité, la cellule photovoltaïque n'est pas un élément actif. Elle fonctionne comme une jonction P-N, c'est-à-dire comme une diode, elle ne produit donc ni courant, ni tension.

Dans ce cas, si on la connecte à un élément externe, la théorie montre que la tension et le courant sont reliés par l'expression suivante :

$$I_D = I_o \left(\exp \left(q \frac{V + R_s I}{A k T} \right) - 1 \right) \quad (1.2)$$

Dans le cas d'un GPV, qui se compose de n_s cellules identiques en série et de n_p branches identiques en parallèle, c'est-à-dire constitué en un certain nombre de modules interconnectés entre eux en série/parallèle, la caractéristique courant-tension résultante peut être obtenue à partir de la caractéristique d'une seule cellule et ce, en multipliant point par point, chacune des valeurs de la tension par le coefficient n_s et chacune des valeurs du courant par le coefficient n_p .

1.3.2 Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure 1.3, décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

La courbe de la cellule PV $I=f(V)$ passe par les trois points importants, à savoir :

- Le courant de court-circuit I_{sc} .
- La tension de circuit-ouvert V_{oc} .
- La puissance maximale P_m .

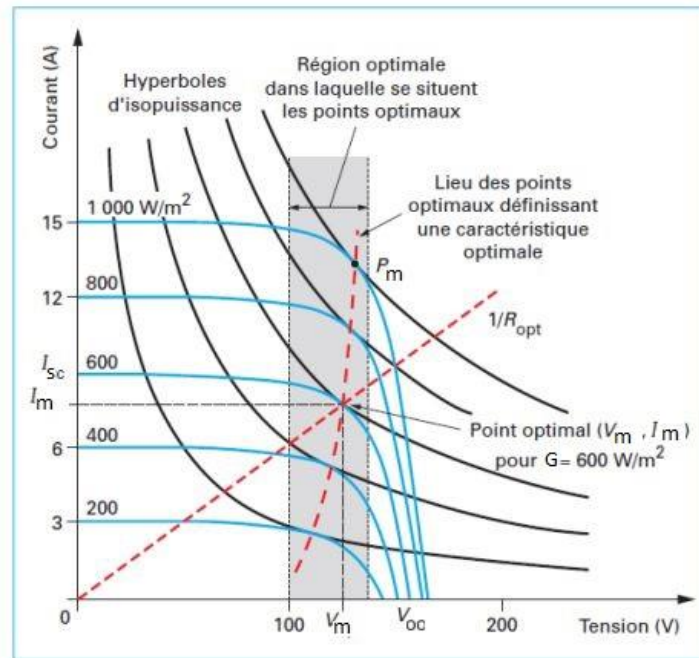


Figure 1.3. Caractéristiques I-V d'une cellule solaire avec courbes d'isopuissance et droite de charge

La figure 1.3 montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de tension ou générateur de courant).

On peut la considérer comme un générateur à tension constante dans la partie verticale de sa caractéristique et comme une source de courant constant dans la partie horizontale de cette caractéristique.

a) Le courant de court-circuit

Le courant de court-circuit I_{sc} de la cellule PV est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V = 0$) :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(q \frac{V + R_s I_{sc}}{A kT} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

A un niveau d'irradiance standard ($G_{STC} = 1 \text{ kWm}^{-2}$), l'effet de la résistance série est négligeable. Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} , qui dépend de la température et de l'irradiance ainsi que du coefficient de température du court-circuit ; (α). Qui est généralement fourni par le constructeur. Le courant I_{sc} peut s'écrire comme suit :

$$I_{ph} = \left(I_{ph.STC} + \alpha (T - 298) \right) \frac{G}{G_{STC}} \quad (1.4)$$

Où :

$I_{ph.STC}$: est le photo-courant aux STC ($1000W/m^2$, AM1.5) ; en (A).

α : est le coefficient de température du courant de court-circuit ; en ($A/^\circ C$)

T : est la température cellule ; en (K)

G : est l'irradiance reçue par la cellule PV ; en (W/m^2)

G_{STC} : est l'irradiance aux STC ($G_{STC}=kW/m^2$).

b) Tension de circuit-ouvert

Dans le cas du circuit-ouvert, la tension de circuit-ouvert peut être exprimée analytiquement suivant la formule :

$$V_{oc} = V_{oc.STC} + \beta (T - 298) + \frac{kT}{q} \ln \frac{G}{G_{STC}} \quad (1.5)$$

Où :

$V_{oc.STC}$: est la tension de circuit-ouvert aux STC ; en (V).

β : est le coefficient de température de la tension de circuit-ouvert ; en ($V/^\circ C$). La valeur typique est égale à $-2.3mV/^\circ C$.

c) Le courant de saturation de la diode

Le courant de saturation inverse, I_o , de la diode qui représente la valeur asymptotique du courant I en polarisation inverse, dépend de la température et de largeur de bande d'énergie du matériau de la cellule solaire.

$$I_o = I_{o.STC} \left(\frac{T}{298} \right)^3 \exp \left(\frac{q E_g}{A k} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (1.5)$$

Où :

I_o : est le courant de saturation inverse à la température Tc

$I_{o.STC}$: est le courant de saturation inverse aux STC

E_g : est l'énergie de la bande interdite. Pour le silicium, elle est égale à 1.12eV

1.3. 3. Module Photovoltaïque

Les cellules PV sont généralement connectées en série dans les modules couramment commercialisés. La mise en série des cellules permet d'augmenter la puissance. Le courant reste identique, tandis que la tension est multipliée par le nombre de cellules en série.

Un module photovoltaïque « classique » contient 36 ou 72 cellules. La figure 1.4 montre un module contenant 36 cellules interconnectées en série.

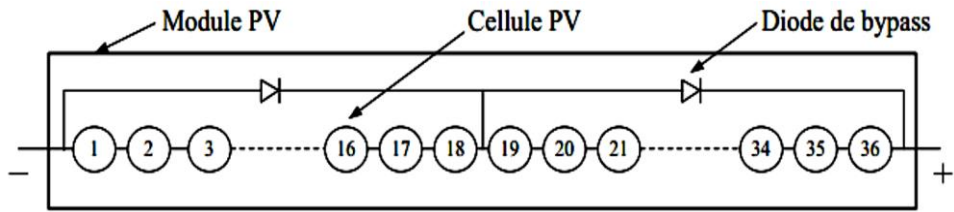


Figure 1.4. Mise en série des cellules solaires en module PV

Les caractéristiques I-V et leur caractéristique de l'association en série et en parallèle sont représentées en figures 1.5 et 1.6.

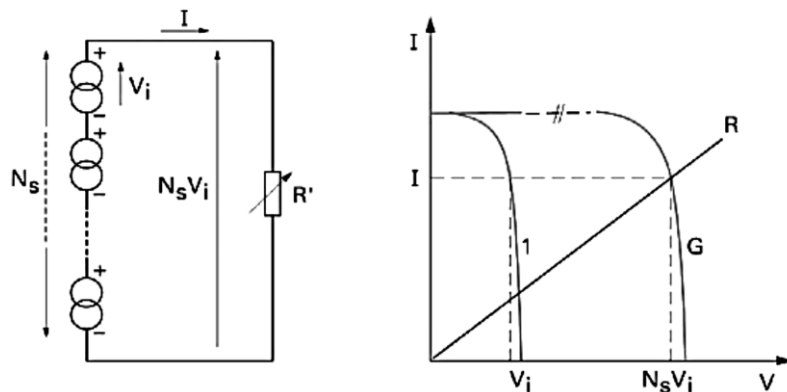


Figure 1.5. Caractéristique de l'association en série de cellules PV

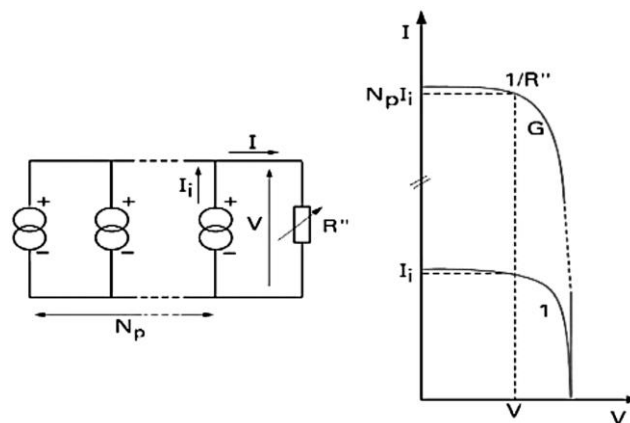


Figure 1.6. Caractéristique de l'association en parallèle de cellules solaires

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est parfois obligé d'utiliser un groupement mixte de modules PV, c'est-à-dire série-parallèle, la figure 1.7 montre les caractéristiques I-V et P-V pour un branchement mixte.

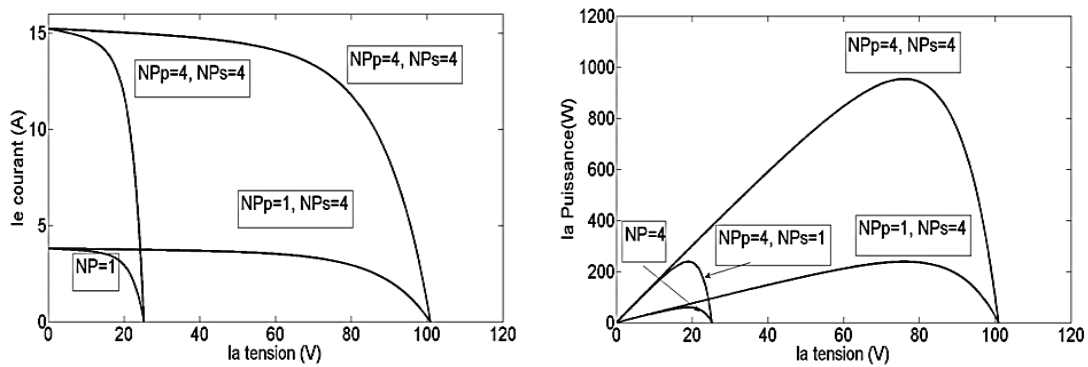


Figure 1.7. Caractéristiques I-V et P-V d'une connexion mixte (série-parallèle). Avec N_s est le nombre de modules en série et NP_p est le nombre de branches de modules en parallèle.

1.4 Le système de stockage

Une certaine quantité d'énergie électrique doit être mise en réserve pour pallier au caractère intermittent de l'énergie solaire reçue et à l'irrégularité de la puissance requise pour une utilisation ultérieure. Le stockage d'énergie dans les SPVA est en général assuré par des batteries, Seules quelques applications utilisant l'énergie au fil du soleil comme par exemple du pompage ou de la ventilation peuvent se passer d'accumuler l'énergie ; aussi, la maîtrise des batteries est un élément essentiel au succès des SPVA.

Dans ces systèmes, le stockage d'énergie représente environ 13 à 15% des investissements initiaux mais sur une durée d'exploitation de vingt ans, ce coût peut atteindre 50 % des frais totaux ; il est donc primordial d'essayer de réduire ce prix en augmentant la durée de vie des batteries. En effet, elle est toujours inférieure à celles des modules PV, il faut donc les remplacer plusieurs fois au cours de la durée de service du système (tous les deux, cinq ou dix ans selon le cas). Le stockage le plus approprié est effectué par l'intermédiaire d'éléments de batterie ou d'accumulateurs au plomb.

Les batteries cadmium-nickel (NiCd) ne sont plus que rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé et elles contiennent du cadmium (toxique). Leurs remplaçantes, les batteries nickel-métal-hydrure (NiMH) sont intéressantes et on en donnera quelques paramètres typiques, leur emploi étant plus fréquent dans les applications professionnelles haut de gamme, ou de très petite taille (< 2 Ah). D'autres batteries sont en développement principalement chez les constructeurs s'intéressant à la voiture électrique. On peut citer également un développement qui utilise de l'air comprimé comme accumulateur d'énergie, l'intérêt potentiel de ce procédé étant la grande durée de vie prévue et l'absence de composants chimiques à recycler.

1.4.1 Accumulateur au plomb

La batterie au plomb est un composant développé depuis le XIX^e siècle et son fonctionnement est bien connu. L'élément d'accumulateur au plomb est constitué d'un faisceau de plaques positives constituées de bioxyde de plomb (PbO_2), d'un faisceau de plaques négatives à base de plomb spongieux (Pb), et baignant dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 .

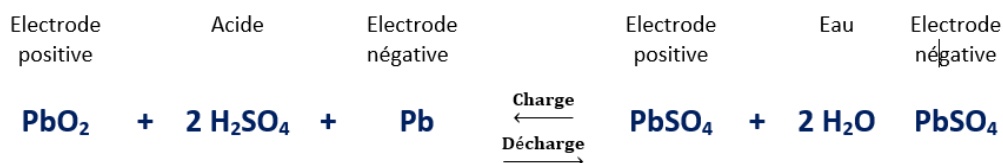
Deux électrodes de plomb et d'oxyde de plomb sont plongées dans un électrolyte composé d'acide sulfurique dilué. En reliant les deux électrodes à un récepteur externe consommant du courant, elles se transforment en sulfate de plomb et l'acide se dilue, phénomène qui permet d'évaluer l'état de charge de la batterie en mesurant la densité d'acide. En fournissant un courant opposé au système, l'acide se concentre et les deux électrodes retournent à leurs états initiaux.



Figure 1.8. Eléments constituant une batterie

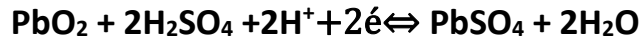
1.4.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire.



Si cette réaction est décomposée en deux réactions partielles, simultanées, distinctes dans l'espace, dont l'une donne lieu à une capture et l'autre à une libération d'électrons, l'échange de ces électrons s'effectue alors par un courant extérieur et fournit de l'énergie électrique.

A l'électrode positive:



A l'électrode négative :



L'électrolyte doit avoir une conductibilité électronique nulle (sous peine de court-circuiter les électrodes) et être dissocié en ions porteurs de charges électriques. Le passage du courant dans l'électrolyte est dû au déplacement des ions sous l'influence du champ électrique existant entre les électrodes. Durant la charge, l'acide est éliminé des plaques. Les pores en premier temps absorbent l'acide, ce qui entraîne une plus grande densité de l'acide interne aux pores à l'acide externe. Donc il va avoir un gradient de concentration de l'intérieur vers l'extérieur. Le chemin de la diffusion devient plus long, la conversion chimique déplace de plus en plus vers l'intérieur donc la densité de l'acide interne augmente ainsi que la tension de l'élément. Quand la tension de charge atteint **2,35 – 2,40 V**, il se produit en plus de la transformation (du sulfate de plomb en **PbO₂** à l'électrode positive ; une décomposition de l'eau sur l'électrode négative. La tension augmente jusqu'à une valeur stable, la grandeur de cette valeur dépend du courant de charge, de la température, de la conception et de l'âge de l'élément. Des particules de la masse active sont arrachées par le fort dégagement gazeux de la dernière étape de charge. Des résidus s'accumulent dans la cellule. Le courant de charge ne doit pour cela en aucun cas être dépasser. L'effet principal durant la décharge réside dans la réduction du **PbO₂** à l'électrode positive et l'oxydation du **Pb** à l'électrode négative. La sulfatation résulte de ces deux effets. La densité est le paramètre le plus simple pour définir l'état de charge et de santé d'un élément. La densité de l'électrolyte dans un accumulateur au plomb-acide est fonction de la concentration d'acide sulfurique, de l'état de charge et de la température. Pour les batteries à usage solaire, la densité haute peut varier de 0,4 V pour les batteries stationnaires à 1,30 V pour les batteries à plaques planes (type démarrage à proscrire pour des installations photovoltaïques, car elles ne supportent pas les cyclages). En fin de décharge, la densité peut avoisiner 1,15. Arrivée à 1.10, la batterie n'est plus rechargeable (Fig. 2). Le relevé de la densité, facile d'apparence, peut poser des problèmes. Au moment de la mesure, la température de l'électrolyte doit être relevée pour avoir des valeurs comparatives, les densités nominales étant annoncées

pour une température de référence (la densité décroît lorsque la température monte). Avant d'effectuer la mesure, il faut homogénéiser l'électrolyte soit par brassage mécanique (on envoie des bulles d'air par le bas de l'élément) soit en provoquant une surcharge (production massive de gaz). Ces conditions de relevés maîtrisées, il faut tenir compte de l'âge de la batterie car en vieillissant, une partie de l'acide absorbé par la sulfatation irréversible et l'oxydation des grilles, n'est plus restitué à l'électrolyte. Il s'ensuit une baisse de densité qui s'accroît au fur et à mesure que la batterie vieillit.

1.4.3 Caractéristiques de charge et décharge

a) Caractéristique de charge

On représente à la figure 1.10 l'allure de la courbe de charge à courant constant d'une batterie au plomb pour différentes températures. Durant la charge, le courant entre dans la batterie par l'anode, ce qui produit une fabrication d'acide et augmente ainsi la densité de l'électrolyte. En conséquence, la densité d'ions augmente également, ce qui fait baisser la résistance série R_{Bi} et augmenter la tension V_{Bi} . Vers la fin de charge, la densité du matériau actif baisse et une partie du courant n'est plus absorbée. Ce courant tend alors à électrolyser l'eau, produisant l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 sur l'électrode négative). Ce phénomène, appelé gazéification, a des avantages et des inconvénients

— **Les désavantages** incluent la perte d'eau et la corrosion de la plaque positive par l'oxygène. Si la surcharge est très intense, du matériau actif peut être délogé par les bulles de gaz.

— **Les avantages** sont principalement que les bulles brassent l'électrolyte et rendent plus homogène, évitant la stratification de l'électrolyte : s'il n'est remué (comme dans une batterie de véhicule par les secousses) l'électrolyte tend à se concentrer au fond de la batterie, ce qui entraîne une corrosion plus rapide du bas des plaques.

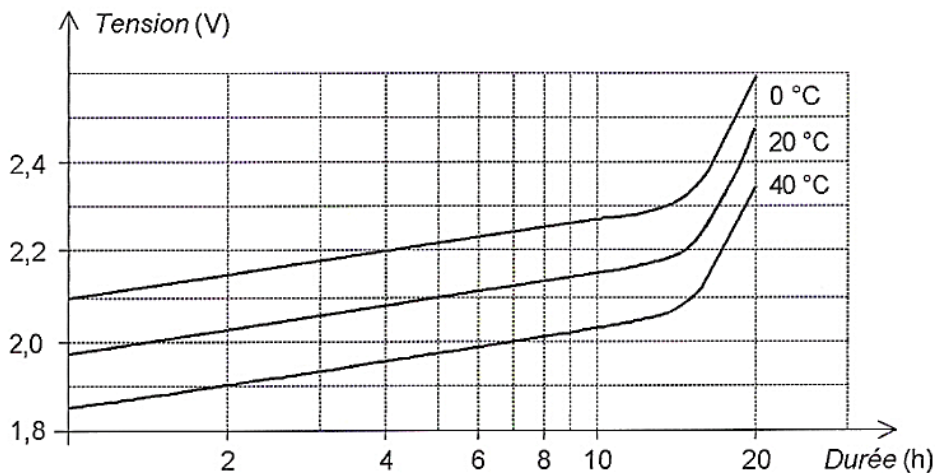


Figure 1.9. Caractéristiques de charge d'une batterie au plomb (à courant constant)

En cas de surcharge, la batterie perdra de l'eau qui devra être remplacée. Si une partie des plaques n'est pas recouverte d'électrolyte, des dommages irréversibles peuvent apparaître. Durant la gazéification, la résistance interne augmente considérablement, ce correspond à une brusque augmentation de la tension (voir les courbes ci-dessous), ceci facilite la conception de régulateurs, la fin de charge étant facile à mesurer. D'autre part, les courbes en températures suivent des parallèles régulières et peut déterminer une dépendance linéaire de la tension maximale en T° qui vaut par élément de 2 V : $\frac{dV}{dT} = -5\text{mV/K}$

Pour les installations photovoltaïques, le régime de courant est très souvent faible et l'on peut considérer que la batterie reste à la température ambiante (la dissipation interne due à R_{Bi} est négligeable). Les contrôleurs peuvent ainsi simplement mesurer la température ambiante pour respecter ces conditions de charge. Lorsque la température ambiante augmente, l'électrolyte se dilate, ce qui baisse la concentration d'acide. En conséquence, la densité et V_B (tension de batterie) baissent. Mais l'augmentation de température donne aux ions une plus grande mobilité et cet effet surpasse la dilatation, ce qui en définitive abaisse R_B . À haute température.

La proportion de masse active par capacité emmagasinée est de 11.97g/Ah . Comme la tension d'un élément est de l'ordre de 2 V , la densité énergétique maximale théorique de la batterie est environ de 170 Wh/kg . En pratique cette valeur est beaucoup plus faible car les grilles en plomb, le boîtier et l'électrolyte pèsent aussi et la densité est ramenée en général entre 20 et 40 Wh/kg .

b) Caractéristique de décharge

On représente à la figure 1.11 les courbes de décharge à différents courants. L'équation électrique de la décharge est :

$$V_B = V_{Bi} - R_{Bi} \cdot I \quad (1.5)$$

La décharge est la transformation du PbO_2 et du Pb , les matériaux actifs en PbSO_4 accompagné par l'absorption d'acide de l'électrolyte. Cette absorption d'acide augmente R_{bi} ce qui contribue à faire baisser V_B . Cette caractéristique varie avec l'âge de la batterie : les courbes données ci-dessous seront plus basses avec une batterie âgée, la résistance interne ayant augmenté. Lorsque la batterie est fortement déchargée, le matériel actif, fortement gonflé, bloque les pores, ce qui empêche l'électrolyte d'atteindre en profondeur la masse active. À ce moment la tension chute brutalement, ce qui permet également de dimensionner facilement un régulateur qui coupe les consommateurs. Cependant, si la décharge est très profonde et si la batterie reste dans cet état longtemps, le sulfate des plaques tend à former de grands cristaux permanents qui empêcheront le

courant de passer. Ce phénomène, s'il est partiel, va faire baisser la capacité de la batterie, mais s'il est important peut alors complètement bloquer tout courant : on parle alors de batterie sulfatée.

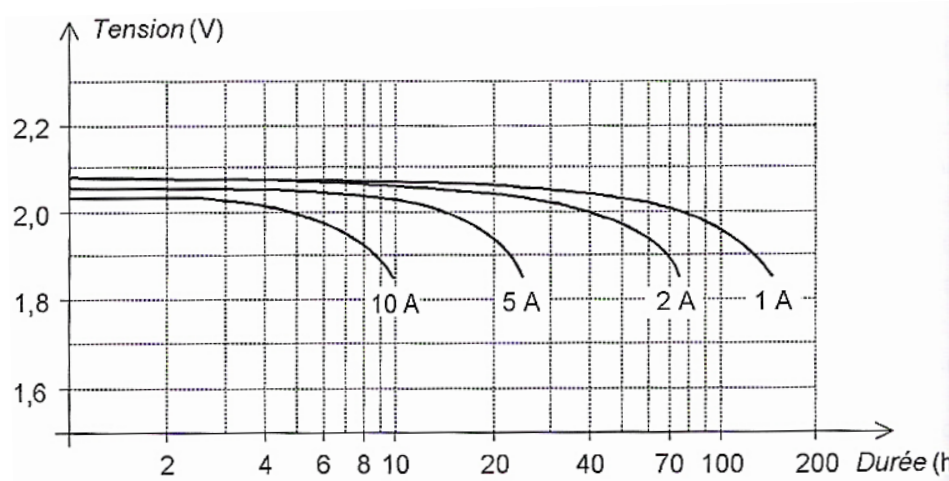


Figure 1.10. Caractéristiques de décharge d'une batterie au plomb acide de 100Ah (à différents courants)

1.4.4 Capacité

La capacité nominale C_B d'une batterie est la quantité d'Ah qui peut être extraite en un temps donné quand elle est totalement chargée. Typiquement la fin de décharge nominale pour les applications PV est une tension de 1.85 V/élément.

La capacité est proportionnelle à la quantité de matière active mise en jeu. Elle varie selon le régime de charge et de décharge, et surtout de la température

Les batteries professionnelles (par exemple tubulaires) sont souvent données pour une décharge en 10 heures alors que pour de petits systèmes photovoltaïques, la valeur de capacité pour une décharge de 20 heures est assez pratique : c'est souvent le niveau de courant d'utilisation de la batterie. On parle alors de capacité C_{10} , $C/10$ ou $0,1 C$ (pour 10 h), et C_{20} , $C/20$ ou $0,05C$ (pour 20 h).

1.4.5 Etat de charge

L'état de charge d'une batterie **SOC** (State Of Charge) est le rapport entre la quantité d'électricité encore disponible en et la capacité nominale de la batterie :

- $0 < SOC < 1$
- **SOC=1** : Batterie est totalement chargée
- **SOC=0** : Batterie est totalement déchargée

1.4.6 Durée de vie

La durée de vie d'un élément d'accumulateur est le nombre de cycles de charge et de décharge. Le rôle de la batterie est de pouvoir être chargée, et puis déchargée un certain nombre de fois, avant que ses caractéristiques se détériorent. Elle peut s'exprimer en année ou en nombre de cycles.

1.4.7 Rendement

On distingue deux rendements :

- **Le rendement en quantité d'électricité (ou rendement faradique)** : C'est le rapport entre le nombre d'ampères-heures fournis par un accumulateur et celui qu'il faut restituer pour la remise à l'état initial de l'élément. Ce rendement varie pratiquement de 0.7 à 0.95 suivant le type de la batterie [5].

- **Le rendement énergétique** : C'est le rapport entre l'énergie électrique exprimée en wattheures restituée et l'énergie électrique fournie. Il est toujours inférieur au rendement faradique et varie suivant les types de batterie entre 0,45 et 0,8.

1.4.8 Autodécharge

L'autodécharge représente la perte de capacité, donc d'énergie en laissant l'élément de batterie au repos (sans charge) pendant un temps donné. Elle est due à la présence de systèmes parasites, qui s'ajoutent au système électrochimique de base.

L'autodécharge croît : - avec le vieillissement naturel de l'accumulateur, - à la suite d'erreurs de manipulation (décharge trop profonde avec inversion de polarité, recharge à l'envers...) - à la suite de la rareté de l'entretien, d'une concentration d'acide non conforme, - en fonction de la température, - avec l'adjonction d'eau non distillée.

L'autodécharge est trop variable, mais la valeur type s'échelonne entre 2 et 3 % par mois.

1.4.9 Information sur l'état de charge d'un accumulateur

Deux paramètres permettent la connaissance de l'état de charge d'un élément d'accumulateur :

a) Densité d'électrolyte : C'est le rapport entre la masse d'une quantité donnée d'électrolyte et la masse d'une même quantité d'eau. La densité varie selon le régime de charge ou de décharge. Lors de décharge la concentration de l'acide décroît et lors de la charge elle croît. Elle dépend de la température ambiante. Le facteur correctif à prendre en considération est le suivant :

$$d_{T^{\circ}} = d_{20^{\circ}C} (1 + k_{T^{\circ}} (20 - T)) \quad (1.6)$$

Où

k_T : est le facteur de correction. La valeur typique est de 0.007 kg/1/°C

La densité d'électrolyte est l'indicateur approprié pour la connaissance de l'état de charge. Mais il s'avère non utile sur le plan pratique, car sa valeur caractéristique n'apparaît qu'après un certain temps.

b) Tension d'utilisation

C'est la tension aux bornes d'un élément d'accumulateur à laquelle l'énergie est stockée et restituée normalement. Les limites de la tension de l'élément sont respectivement de 2.3-2.5 V pour la fin de charge et de 1.7-1.8 V pour la décharge, cela pour une température de 20 °C.

1.5 Le système de conditionnement de la puissance

Suivant la nature du système photovoltaïque, le système de conditionnement de puissance (SCP) permet d'assurer plusieurs fonctions, telles que :

- **La régulation et le contrôle de l'état de charge** de la batterie d'accumulateurs : deux procédés sont envisagés :
- **La conversion de l'énergie électrique continue en alternative (DC/AC)**

1.5.1 Système de régulation de charge

De nombreux travaux relatifs aux techniques de régulation et contrôle dans un système photovoltaïque autonome sont rapportés dans la littérature [8-17]. La plupart de ces techniques s'appuient sur la tension mesurée aux bornes de la batterie d'accumulateurs comme étant le seul indicateur de l'état de charge de la batterie.

Les principales techniques de régulation de charge utilisées dans les systèmes photovoltaïques, sont les suivantes : a) **Régulation à coupure** 'On/Off régulation' • Stratégie, - b) **Régulation à coupure partielle** ' Multistep régulation', - c) **Régulation à modulation de largeur d'impulsion** 'Chopper régulation, - d) **Régulation à couplage optimal** 'MPPT régulation'

a) Régulation à coupure

Cette technique consiste en la commande en 'tout ou rien' des deux interrupteurs, qui assurent le couplage direct respectivement entre le générateur photovoltaïque et la batterie d'une part et entre la batterie et la charge d'autre part. Le premier interrupteur peut être monté soit en série, soit en parallèle, comme le montre la figure suivante (figure 1.12).

Le principe de fonctionnement de ce système de régulation à coupure se base sur les deux hystérésis correspondantes aux processus de charge et de décharge de la batterie comme il est montré sur la figure 1.13.

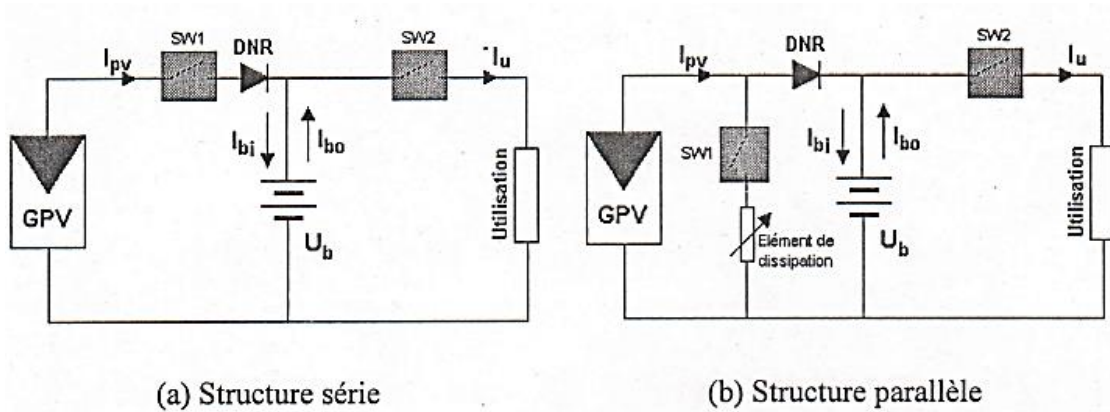


Figure 1.11. Structures du dispositif de régulation

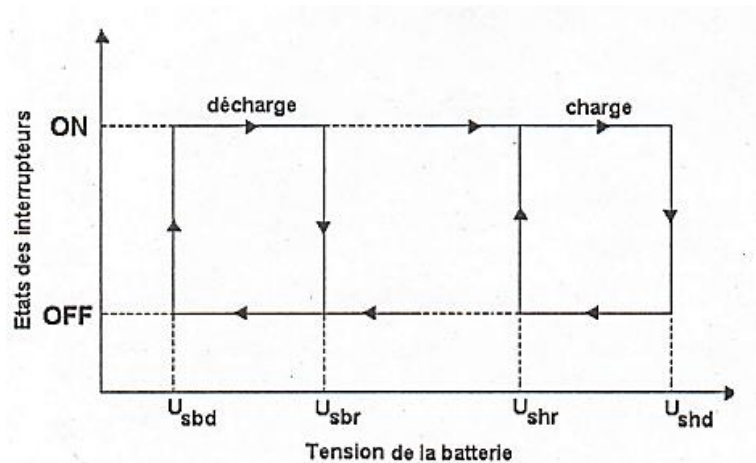


Figure 1.12. Cycles d'hystérésis de charge et de décharge

Cas de la charge : Lors de la charge, le premier interrupteur SW1 est à l'état fermé (ON), la connexion **GPV-batterie** est établie. Le GPV débite un courant et sans interruption. Le système de régulation mesure donc la tension aux bornes de la batterie. Lorsque cette dernière atteint la valeur du seuil haut V_{shd} (tension de fin de charge ou tension de seuil haut de déconnexion), et pour protéger la batterie contre les surcharges, cet interrupteur SW1 s'ouvre (Off), ce qui permet la déconnexion du GPV de la batterie. La liaison **GPV-batterie** ne se rétablit que lorsque la tension redevient inférieure à la valeur du seuil haut V_{sbc} (tension de seuil haut de reconnexion).

Cas de la décharge : Lors de la décharge, le deuxième interrupteur SW2 se ferme (ON), la batterie restitue régulièrement l'énergie stockée à la charge, tant que l'énergie

fournie par le générateur est faible. Afin d'éviter que la batterie ne se décharge profondément, c'est-à-dire dans le cas où la tension est en dessous du seuil de décharge V_{sbd} (tension de décharge ou tension de seuil bas de déconnexion), la liaison **batterie-utilisation** est interrompu en mettant cet interrupteur SW2 à l'état ouvert (OFF) et ce qui permet à nouveau la reconnexion de la charge lorsque la tension atteint la valeur du seuil bas de reconnexion V_{sbc} .

Les avantages de cette technique peuvent être résumés comme suit : - une consommation propre faible, - une implémentation simple de cette technique. Par contre, cette technique présente des inconvénients, à savoir : une adéquation dans la charge de la batterie due à la coupure brusque du courant de charge ; une nécessité d'ajouter des éléments pour que l'énergie excédentaire se dissipe (régulation parallèle), limitant ainsi son utilisation aux systèmes solaires de faible puissance ; une mauvaise adaptation entre le générateur photovoltaïque et la batterie.

b) Régulation à coupure partielle

Le principe de cette technique de régulation consiste à fractionner le générateur photovoltaïque en plusieurs branches identiques associées en parallèle et connectées à la batterie par des interrupteurs placés également en parallèle (figure 1.13). En vue de réaliser une fin de charge complète de la batterie avec un courant décroissant, la régulation à coupure partielle est mise en œuvre pour permettre d'atteindre la pleine charge de la batterie.

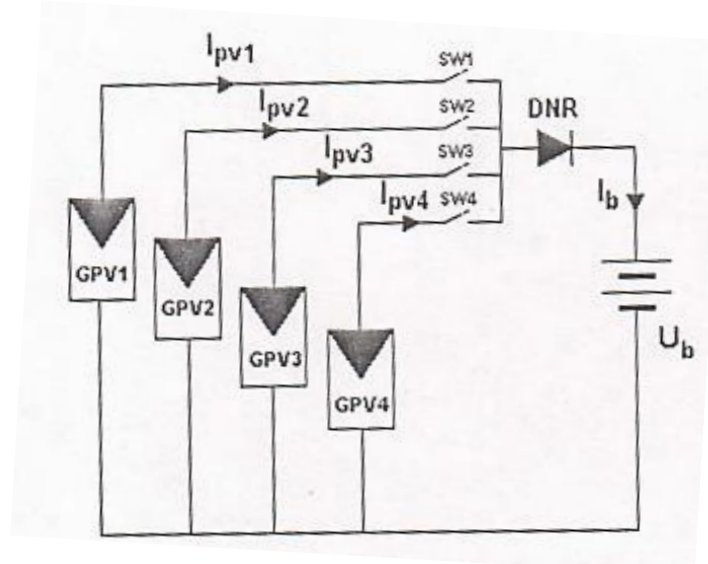


Figure 1.13. Topologie d'un système de régulation à coupure partielle

Le fonctionnement de chacun de ces interrupteurs se fait selon un cycle d'hystérésis préalablement défini, permettant ainsi la déconnexion ou la connexion graduelle du GPV, tenant compte de l'état de charge de la batterie.

En début de la charge, le GPV débite en entier. En phase de fin de charge, le courant commence à décroître par palier et ce, par la déconnexion graduelle des branches du générateur successivement, jusqu'à l'annulation du courant. Quant à la décharge, il s'effectue de la même manière, en gardant le même procédé qu'en régulation à coupure décrite précédemment.

La technique de régulation à coupure partielle présente deux principaux avantages : la simplicité d'implémentation autour de circuits analogiques, et la consommation propre faible. Néanmoins, elle présente certains inconvénients, comme : son utilisation limitée aux SPV de grande puissance, et la présence de plusieurs éléments de coupure (relais) rendant le système encombrant.

c) Régulation à modulation de largeur d'impulsion

Dans le cas de la technique de régulation à modulation de largeur d'impulsion (PWM), la phase de fin de charge de la batterie se fait avec une intensité de courant réduite et continue pour une approche permettant une charge idéale de la batterie. [6] Son principe de fonctionnement se base sur la commande PWM d'un convertisseur DC/DC de type parallèle intercalé entre le générateur et la batterie.

Le schéma de principe d'un tel dispositif est représenté en figure 1.15.

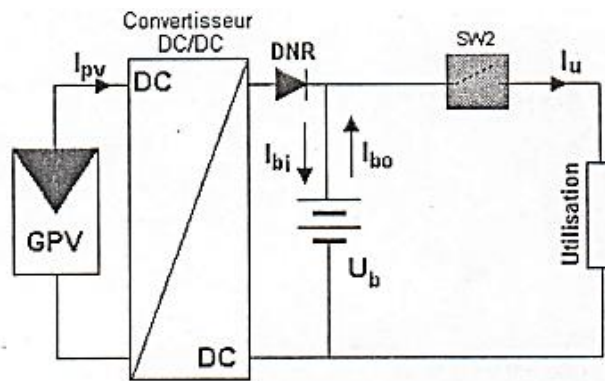


Figure 1.14. Topologie du système de régulation à modulation de largeur d'impulsion.

Au début de la charge, le convertisseur DC/DC n'est pas opérationnel, la liaison **GPV-batterie** est assurée par l'intermédiaire d'un relais électromagnétique en tout ou rien. Le courant entrant dans la batterie est égal au courant délivré par le générateur de courant. Lorsque la tension de batterie atteint la valeur de 2,28 V/élément, le relais coupe la

liaison **GPV-batterie**, et le convertisseur DC/DC entre en fonctionnement. Ce convertisseur est asservi pour délivrer à la batterie une tension en mode flottant et un courant décroissant.

L'obtention du signal de commande PWM est effectué en comparant un signal en dent de scie avec un signal continu, qui est l'image de la tension de la batterie. Il présente un rapport cyclique variable, dont les impulsions sont larges au début puis deviennent étroites au fur et à mesure de l'augmentation de la tension de la batterie. Le deuxième interrupteur Q est un relais électromagnétique, qui assure la décharge de la batterie vers la charge.

d) Régulation à optimisation de puissance

Contrairement aux techniques de régulation données précédemment, la technique à optimisation de puissance permet de gérer au mieux l'énergie disponible à la sortie du générateur photovoltaïque. Ce type de régulation assure une fonction d'adaptation d'impédance, en transférant la puissance électrique maximale issue du GPV à la batterie, quelles que soient les variations d'irradiance et de température.

Il est recommandé d'incorporer un dispositif électronique, dont la fonction principale est la poursuite du point de puissance maximale du GPV, appelé couramment MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce dispositif est un convertisseur DC-DC de type série ou parallèle (figure 1.15).

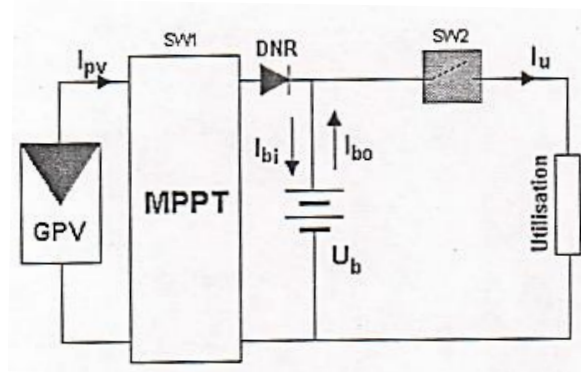


Figure 1.15. Topologie d'un système de régulation à optimisation de puissance

1.5.2 Conversion continue/alternative

Les charges alimentées en courant alternatif nécessitent donc un convertisseur de type continu/alternatif (DC/AC) adapté à leurs caractéristiques. Ce convertisseur transforme en énergie électrique alternative, une énergie de type continu provenant soit de la batterie d'accumulateurs, soit directement du GPV via le régulateur de charge.

Le convertisseur DC/AC est appelé couramment 'onduleur'. C'est un dispositif électronique qui utilise les composants de puissance, tels que les MOSFET, BJT, IGBT etc.

Il doit délivrer un signal le plus proche possible du signal sinusoïdal et avec une fréquence fixe. En effet pour les fonctionnements de la plupart des charges, la présence de certains harmoniques est néfaste. A cet effet, toute approche de commande doit prendre en compte les contraintes suivantes :

- La distorsion harmonique en régime permanent doit être rigoureusement minimisée,
- Le terme fondamental de la tension de sortie doit être réglé à une valeur de référence.

Dans les systèmes de pompage photovoltaïque, fonctionnant au fil du soleil, on utilise dans la plupart des cas, un onduleur triphasé, dont l'entrée est connectée à un GPV et à la sortie une motopompe d'exhaure d'eau. Quant aux autres systèmes photovoltaïques, l'onduleur peut être de type monophasé.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux éléments constituant un système PV autonome, à savoir : le GPV, la batterie de stockage et le système de conditionnement de la puissance (SCP). Comme travail porte sur la modélisation du système de stockage électrochimique dédiée au simulateur orienté-circuit (PSPice), une attention particulière a été consacrée aux accumulateurs au Pb-acide et au système de régulation de charge. Ces informations sont d'une importance certaine pour la suite de l'étude, quant à la modélisation de la batterie et la simulation des divers éléments, à mener dans le prochain chapitre

Modélisation de la batterie au Plomb-acide

2.1. Introduction

De nos jours, le stockage sur batterie a considérablement augmenté, vers une utilisation grand public, en croissance exponentielle parallèlement aux technologies renouvelables. Les batteries de stockage utilisées dans les SPVA sont des éléments clés qui assurent l'adaptation de la charge pendant toutes les périodes prévues [7]. Les batteries électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique et la libèrent lorsque cela est nécessaire ont été largement utilisées dans les applications photovoltaïques. En fait, la fiabilité et la disponibilité du SPV sont fortement liées au choix correct des batteries de stockage en termes de capacité disponible et de certains paramètres technologiques associés. Dans la plupart des cas, ces choix sont basés sur le nombre de cycles de charge/décharge [8], la plage de température de fonctionnement, la tension nominale, la capacité disponible en ampères-heures, les exigences de maintenance, le prix et la disponibilité sur le marché [9]. Les batteries au plomb-acide sont les plus couramment utilisées dans le domaine des applications photovoltaïques [8], grâce à leur fiabilité et à leur coût attractif [10]. Cependant, le comportement de la batterie est fortement influencé par l'environnement interne et externe tels que les réactions chimiques et la température, A cet effet, elle devrait avoir un bon modèle,

permettant non seulement de mieux comprendre son comportement dans des conditions de fonctionnement spécifiques, mais aussi une prédiction précise des performances du SPV [11]. En conséquence, il existe plusieurs une grande variété de modèles de batterie avec divers degrés de complexité [12].

Dans cette section, la modélisation des batteries est présentée selon les quatre modèles électrochimiques les plus couramment utilisés pour les applications PV ; **Modèle de Shepherd**, **modèle de Macomber**, **modèle de Lasnier** et **modèle de Coppetti**, respectivement. Ainsi, pour chaque modèle de batterie, l'expression de la tension de sortie analytique est mise en évidence lors des phases de charge et de décharge. Il est également présenté, dans cette section, une brève description des trois modèles ainsi que leurs principales caractéristiques.

2.2 Modèles usuels de la batterie au Pb-acide

Les modèles suscités sont considérés comme des modèles des batteries au plomb-acide les plus détaillés. Ils ont été élaborés pour prendre en considération toutes les conditions de fonctionnement existantes (charge, décharge et surcharge). En effet, le circuit électrique équivalent de la batterie est décrit par une source de tension et sa résistance interne variables (figure 2.1).

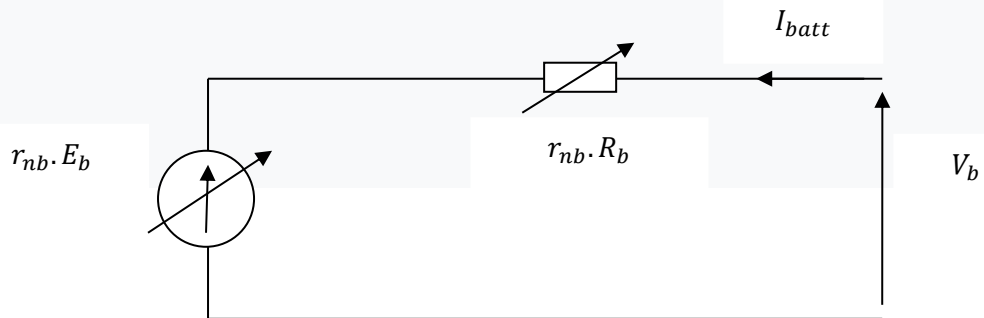


Figure 2.1. Circuit électrique équivalent d'une batterie de n_b éléments

2.2.1 Modèle de Shepherd

Le modèle de Shepherd [13] décrit la variation de la tension de sortie de la batterie en fonction du courant de charge/décharge. Il peut être utilisé pour tous les types de batteries avec un minimum de données expérimentales. L'équation de tension de sortie de la batterie est donnée pour les modes de décharge et de charge par les équations (2.1-2.6), donnés ci-dessous.

• **Mode de décharge**

$$V_d = 2.0030 - 0.0189 \left(\frac{58.31}{58.31 - I_d \cdot t} \right) \cdot I_d - 0.015 \cdot I_d \quad (2.1)$$

L'équation est caractérisée par trois termes distincts. Le premier terme représente la tension en circuit-ouvert, le second est associé à la tension de polarisation ohmique, tandis que le troisième terme est lié à la perte ohmique due à la résistance interne [13].

• **Mode de charge**

Le mode de charge est décrit par l'équation suivante :

$$V_c = 2.0030 + 0.0189 \left(\frac{58.31}{58.31 + I_c \cdot t} \right) \cdot I_c + 0.015 \cdot I_c \quad (2.2)$$

2.2.2 Modèle de Macomber

Dans ce modèle, la tension en circuit-ouvert et la résistance interne sont considérées comme une fonction de la température. De plus, les paramètres du mode décharge sont identiques à ceux utilisés pour le mode charge [14]. Ci-après, les équations décrivant le mode de charge et de décharge dans le modèle de Macomber sont mises en évidence.

• **Mode de décharge**

Pendant le mode décharge, le courant et la tension sont décrits en fonction du SOC, qui varie entre zéro et un. La tension de décharge pour ce modèle est donnée par l'équation suivante :

$$V_d = 2.094 (1 - 0.001(T - 25)) - \frac{I_d}{C} \left(\frac{0.189}{\text{SOC}} - 0.15(1 - 0.02(T - 25)) \right) \quad (2.3)$$

• **Mode de charge**

Pendant le mode de charge, la tension de la batterie est donné par :

$$\begin{aligned}
 V_c &= 2.094 (1 - 0.001(T - 25)) \\
 &+ \frac{I_c}{C} \left(\frac{0.189}{1.142 - SOC} + 0.15(1 - 0.02(T - 25)) \right) \\
 &+ \underbrace{(SOC - 0.9) \ln \left(\frac{300 \cdot I}{C} + 1.0 \right)}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

et l'état de charge SOC en fonction de l'état de charge initial SOC(0) est donné par l'expression suivante :

$$SOC = SOC(0) \pm \frac{I_b \cdot \Delta t}{C} \tag{2.5}$$

Où :

I est le courant batterie de charge ($I= I_c$) ou de décharge ($I=I_d$) et Δt est l'intervalle du temps de charge ou de décharge (en heures). Le terme souligné n'est inclus que si la somme des deux premiers termes est supérieure à 2,28 volts. Pendant la période de repos (ni en charge ni en décharge), l'état de charge diminue selon l'équation.

$$SOC = SOC(0) \cdot \exp \left(- \left(300 \cdot \exp \left(- \frac{4400}{T} \right) \right) \cdot t \right) \tag{2.6}$$

2.2.3 Modèle de Lasnier

Le second modèle de la batterie au plomb, a été mis en œuvre sur la base du modèle dit PSpice [15]. Il dispose de deux modes de fonctionnement de charge et de décharge. Lorsque le courant de batterie est positif, alors celle-ci se trouve dans le mode charge. Tandis qu'elle se trouve dans le mode décharge, si ce courant est négatif.

Les paramètres cités ci-dessous ont été utilisés pour la modélisation de la batterie au plomb.

- SOC (0) : Etat de charge initial (%) ;
- SOC(t) : Etat de charge à l'instant t (%) ;
- C_m : Capacité maximale (Wh) ;
- n_b : Nombre de cellules de 2 V en série ;
- D : Taux d'autodécharge (h^{-1}) ;
- k_b : Paramètre adimensionnel exprimant le rendement charge/décharge.

Comme le SOC varie linéairement avec la tension en circuit-ouvert de la batterie V_{ocb} , la relation entre la tension en circuit-ouvert de la batterie et état de charge SOC peut être déterminée en utilisant le tableau suivant [16].

Selon ce modèle, la tension aux bornes de la batterie au plomb est alors donnée par :

$$V_b = V_1 \pm R_1 I_b \quad (2.7)$$

V_1 et R_1 dépendent du mode de fonctionnement de la batterie à un instant donné ; I_b est positif lorsque la batterie est en mode de charge et négatif quand elle est en mode de décharge.

En mode de charge, les équations de la résistance ($R_1=R_{ch}$) et la tension ($V_{ch}= V_1$) peuvent s'écrire comme suit :

$$V_1 = V_{ch} = \left(2 + 0.148 \frac{SOC}{SOC_m} \right) \cdot n_{bs} \quad (2.8)$$

$$R_1 = R_{ch} = \frac{0.758 + \frac{0.1309}{1.06 - \frac{SOC}{SOC_m}}}{SOC_m} \quad (2.9)$$

En mode de décharge, les équations de la résistance ($R_1=R_{déch}$) et la tension ($V_{déch}= V_1$) s'écrivent alors de la manière suivante :

$$V_1 = V_{déch} = \left(1.926 + 0.124 \frac{SOC}{SOC_m} \right) \cdot n_{bs} \quad (2.10)$$

$$R_1 = R_{déch} = \frac{0.19 + \frac{0.124}{\frac{SOC}{SOC_m} - 0.14}}{SOC_m} \quad (2.11)$$

L'estimation de la valeur du SOC(t), peut être décrit par l'équation suivante :

$$SOC(t + dt) = SOC(t) \left(1 - \frac{D}{3600} dt \right) + k_b \left(\frac{V_b I_b - R_1 I_b^2}{3600} \right) dt \quad (2.12)$$

2.2.4 Modèle de Coppetti

Ce modèle est considéré comme l'un des modèles des batteries au plomb-acide les plus détaillés. Il a été élaboré par Coppetti et al. (13) pour prendre en considération toutes les conditions de fonctionnement existantes (charge, décharge et surcharge). En effet, le circuit électrique équivalent de la batterie est décrite par une source de tension et sa résistance interne variables. Ci-après, les zones de travail d'une batterie plomb-acide sont décrites.

Pour un nombre de cellules n_b , les équations de la tension de charge, de surcharge et de décharge de la batterie sont données par les relations suivantes :

- **Mode de décharge**

La décharge de la batterie est régie par l'équation suivante :

$$V_b = n_b(2.085 - 0.12(1 - SOC)) - n_b \frac{I_b}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_b^{1.3}} + \frac{0.27}{SOC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (2.13)$$

$$\Delta T = T - 25 \quad (2.14)$$

Dans ce cas l'état de charge SOC fonction de la capacité C et l'état de charge initial SOC(0). Il est donné par cette expression :

$$SOC = SOC(0) - \frac{Q}{C} \quad (2.15)$$

- **Mode de charge**

$$V_b = n_b(2.00 - 0.16 SOC) + n_b \frac{I_b}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I_b^{0.86}} + \frac{0.27}{(1 - SOC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.0025 \cdot \Delta T) \quad (2.16)$$

Dans ce cas l'état de charge SOC fonction du rendement de conversion η_c , la capacité C et l'état de charge initial SOC(0). Il est donné par cette expression :

$$SOC = SOC(0) + \frac{\eta_c Q}{C} \quad (2.17)$$

2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les expressions analytiques de la tension de sortie de la batterie au Pb-acide lors des phases de charge et de décharge des quatre modèles électrochimiques les plus couramment utilisés pour les applications PV, il s'agit plus particulièrement du modèle de Shepherd, du modèle de Macomber, du modèle de Lasnier et du modèle de Coppetti,

Modélisation et simulation de la batterie au Pb-acide en PSpice

3.1. Introduction

Comme le présent chapitre porte sur le développement d'un modèle électrique d'une batterie solaire photovoltaïque dédié au fameux logiciel orienté circuit, dénommé PSpice, Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu un aperçu sur cet outil de simulation, tout en focalisant sur l'approche de la modélisation comportementale (ABM : Analog Behavioural Modeling) offerte par PSpice, ensuite, nous présenterons les deux parties d'implémentation et de simulation du modèle développé. A cet effet deux modèles usuels ont été sélectionnés à mettre en œuvre (modèle de Shepherd et modèle de Macomber).

3.2. Outil de simulation orienté circuit – PSpice

3.2.1. Aperçu sur PSpice

PSpice (acronyme de Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) est un outil essentiel dans la simulation de circuits analogiques et numériques. Introduit dans les années 1970, il reste un logiciel de référence dans le domaine du génie électrique. Développé par MicroSim Corporation, plus tard acquis par Orcad, PSpice est la version PC du simulateur Spice et est considéré comme l'un des premiers et des principaux simulateurs analogiques/numériques.

En outre, il permet de simuler des montages complexes avec un réalisme étonnant. L'utilisation de Windows permet de le rendre plus convivial, toutefois seules des machines puissantes (au minimum un Pentium) permettent de travailler dans des conditions acceptables. PSpice est couramment utilisé dans l'industrie électronique et dans les établissements d'enseignement pour la conception et la validation de circuits électroniques.

Le logiciel PSpice comprend plusieurs modules :

- **Schematics** : Module de saisie de schéma
- **PSpice** : Module de simulation
- **Probe** : Module de traçage de courbe.

La figure 3.1 illustre l'interaction entre ces modules.

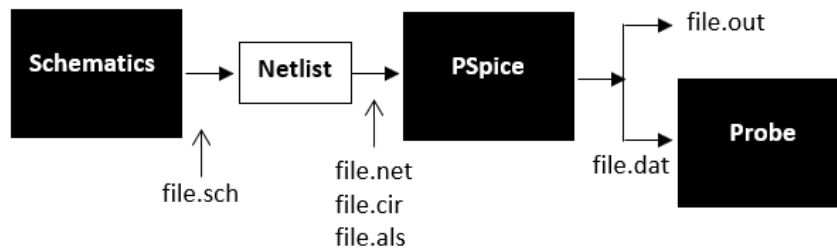


Figure 3.1. Schéma fonctionnel du PSpice

3.2.2. Modélisation analogique comportementale (ABM)

PSpice dispose d'une option particulière l'ABM (Analog Behavioral Modelling) qui permet d'utiliser des blocs synoptiques dans les simulations. C'est cette option que nous exploitons dans notre travail.

L'ABM permet l'analyse du comportement des circuits électriques à partir de leurs modèles mathématiques. Elle peut être utilisée pour résoudre les équations des systèmes linéaires et non linéaires, même pour les systèmes les plus complexes dans leurs formes implicite et explicites. Ces équations vont être converties en circuits électriques et résolues par PSpice en utilisant l'analyse DC, l'analyse temporelle ou bien l'analyse fréquentielle.

L'ABM a aussi la possibilité d'évaluer des expressions représentant des circuits à fonctions variables (tension, courant, temps de simulation) utilisant des sources de tension et de courant contrôlés.

L'utilisation de l'option ABM du PSpice signifie qu'un système n'est plus étudié à partir de sa description structurelle, mais à partir des équations qui régissent son fonctionnement. Ainsi, on trouvera dans la librairie ABM les **blocs fonctionnels** (additionneurs, soustracteurs, dérivateurs, intégrateurs, filtres, fonctions mathématiques et trigonométriques, transformée de Laplace, table de correspondance, etc) nécessaires à une description comportementale. En voici quelques-uns :

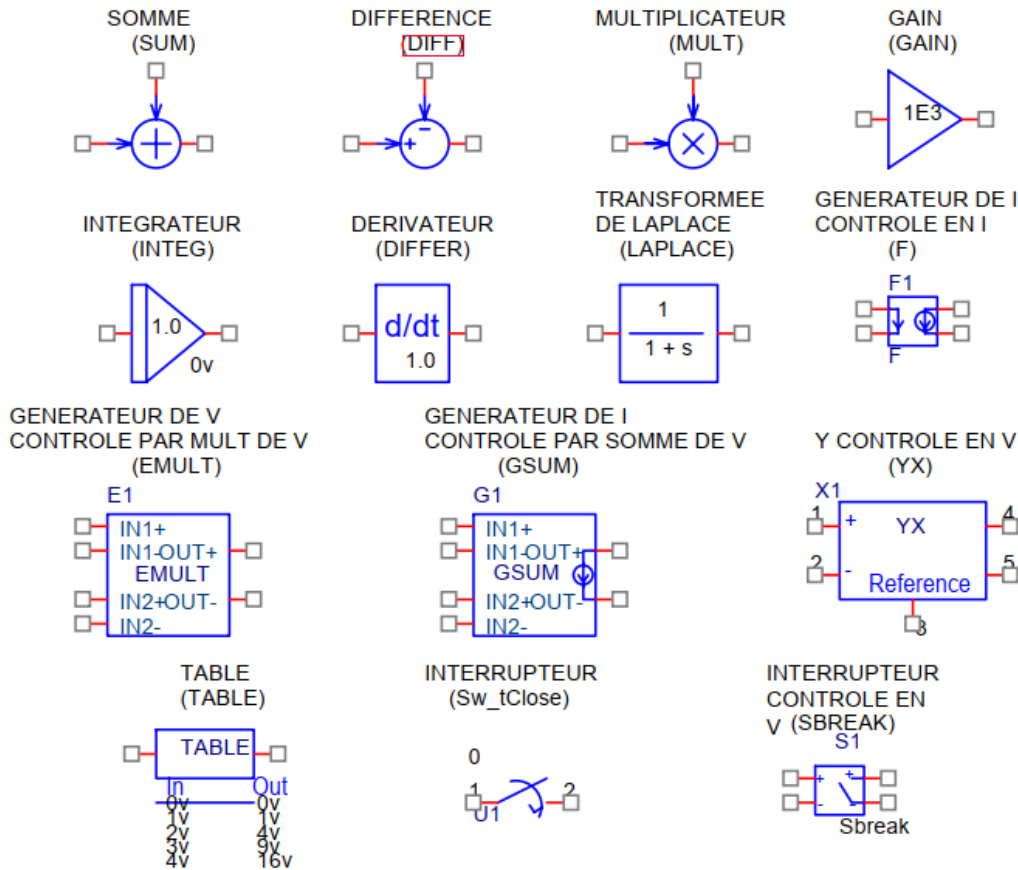


Figure 3.2. Certains blocs fonctionnels de l'ABM

3.2.3. Exemple introductif sur la modélisation analogique comportementale

L'exemple ci-dessous (figure 3.3, 3.4) illustre un exemple sur le redressement monophasé double alternance d'un signal sinusoïdal $v_i = u(t) = 2\sin(2\pi \cdot 50t)$. Comme le signal de sortie v_o n'est autre que la valeur absolue du signal de sortie, i.e. : $v_o = |u(t)|$, donc il suffit d'introduire la fonction ABS (absolue) dans le bloc EVAL.

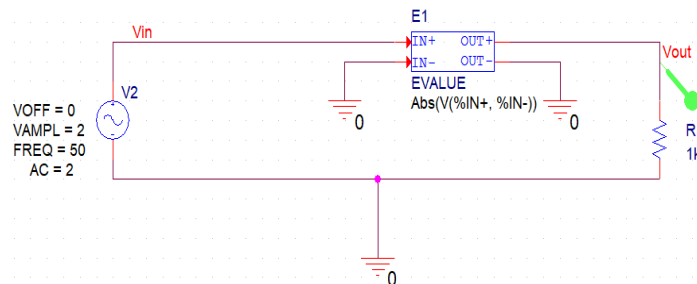


Figure 3.3 Modélisation comportementale d'un redressement monophasé double-alternance

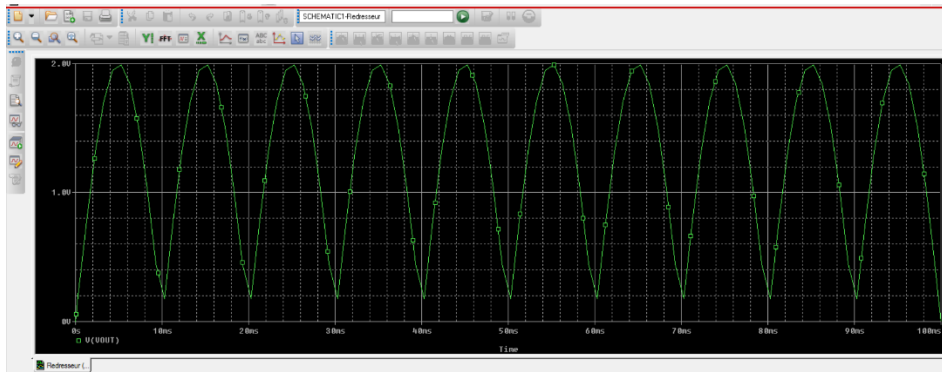


Figure 3.4. Signal de sortie $v_o = |2\sin(2\pi \cdot 50t)|$

3.3. Implémentation du modèle de la batterie en PSpice

Le principe de mise en œuvre consiste à trouver une solution du modèle de batterie afin de déterminer les tensions de charge ou de décharge. Pour ce faire, l'option Modélisation Analogique Comportementale (ABM) reste la seule alternative pour obtenir une solution du fait de la non linéarité des équations. L'utilisation de l'ABM facilite également l'évaluation des expressions mathématiques au moyen de différentes sources de tension ou de courant (G, E, H, F ...). Le modèle dans PSpice est converti en différents blocs, chacun représentant un paramètre principal tels que : SOC, Voc, etc. pour les deux processus de charge et de décharge de la batterie. Les modèles choisis pour cette étude sont ceux de Shepherd et Macomber.

- **Modèle de Shepherd (Eqs (2.1)-(2.2))**

$$V_B = \begin{cases} 2.0030 - 0.0189 \left(\frac{58.31}{58.31 - I_B \cdot \Delta t} \right) \cdot I_B - 0.015 & \text{Si } I_B < 0 \text{ (Mode de décharge)} \\ 2.0030 + 0.0189 \left(\frac{58.31}{58.31 + I_B \cdot \Delta t} \right) \cdot I_B + 0.015 & \text{Si } I_B > 0 \text{ (Mode de charge)} \end{cases}$$

- **Modèle de Macomber (Eqs(2.3)-(2.4))**

$$V_B = \begin{cases} 2.094 (1 - 0.001(T - 25)) - \frac{I_B}{C} \left(\frac{0.189}{SOC} - 0.15(1 - 0.02(T - 25)) \right) & \text{Si } I_B < 0 \text{ (Mode de décharge)} \\ 2.094 (1 - 0.001(T - 25)) + \frac{I_B}{C} \left(\frac{0.189}{1.142 - SOC} + 0.15(1 - 0.02(T - 25)) \right) & \text{Si } I_B > 0 \text{ (Mode de charge)} \end{cases}$$

L'état de charge SOC en fonction de l'état de charge initial SOC(0) est donné par: $SOC = SOC(0) \pm \frac{I_B \cdot \Delta t}{C}$, et Δt représente l'intervalle du temps de charge ou de décharge (en heures).

La mise en circuits des deux modèles mathématiques ci-haut dans l'environnement PSpice sont illustrés par les figures 3.5 et 3.6.

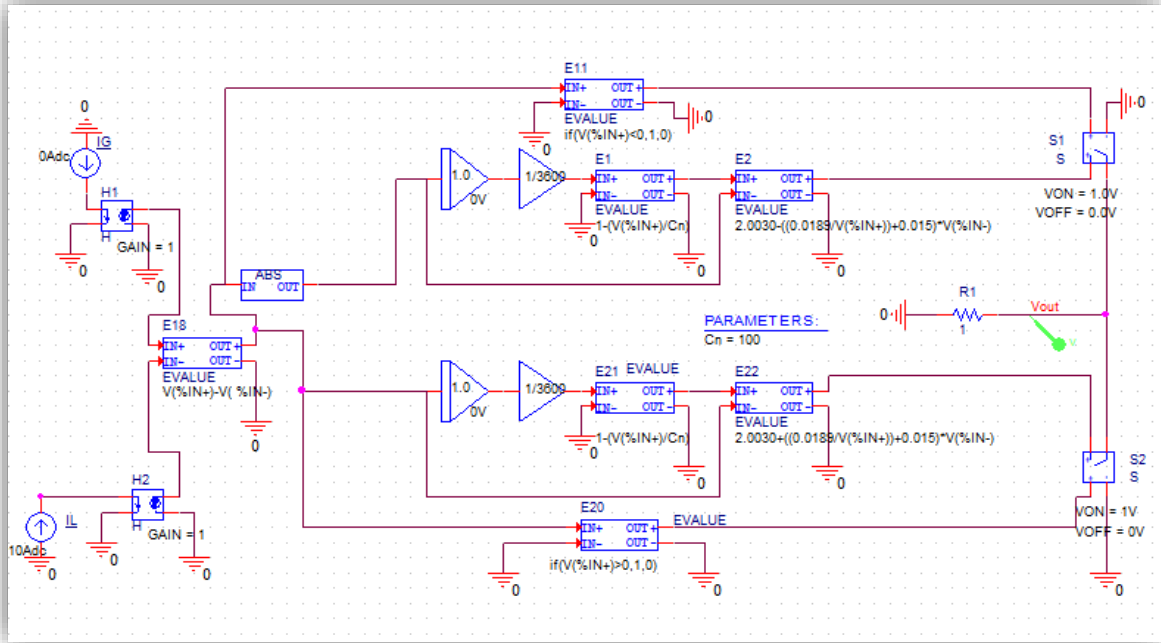


Figure 3.5. Schéma blocs du modèle de Shepherd de la batterie au Pb-acide.

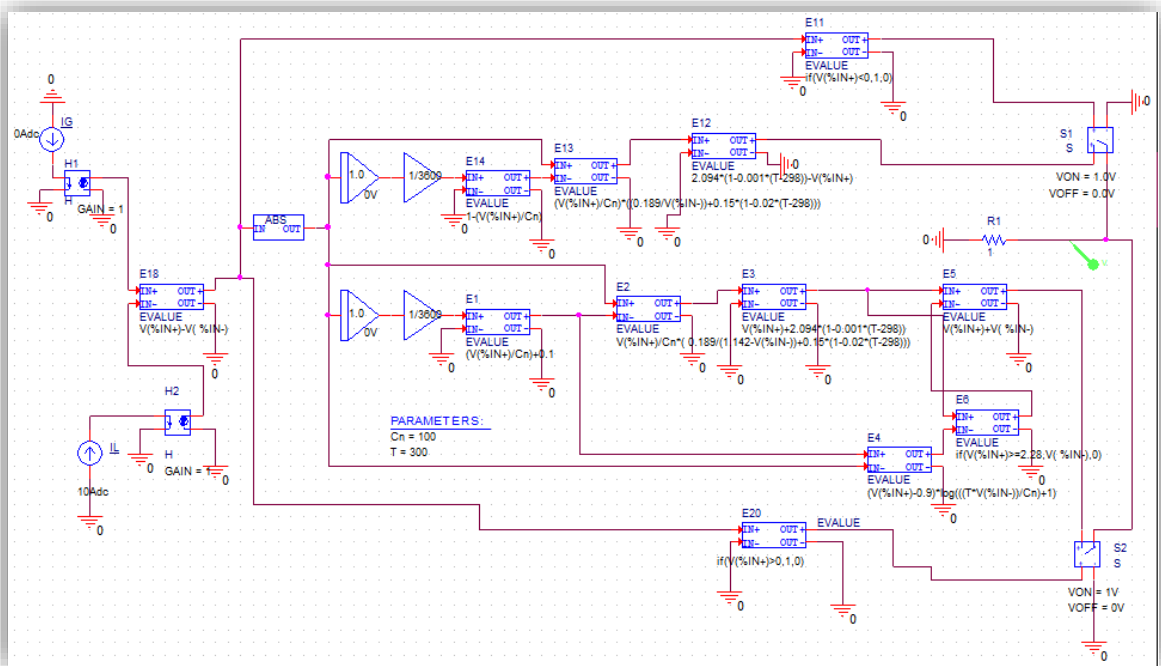


Figure 3.6. Schéma blocs du modèle de Macomber de la batterie au Pb-acide.

3.4. Simulation et résultats

Afin d'étudier le comportement d'une batterie moyennant ces deux modèles électriques développés, deux cas d'étude ont été envisagés :

- **Modèle hors ligne** : cyclage (charge/décharge) d'une batterie hors SPVA
- **Modèle en ligne** : cyclage (charge/décharge) d'une batterie en SPVA

Les données de la batterie sont relatives à un élément accumulateur d'une tension nominale de 2V et une capacité $C=100\text{Ah}$. Dans cette étude de simulation, nous avons considéré que la température de fonctionnement est invariable ($T=25^\circ\text{C}$)

3.4.1 Simulation hors ligne

Dans cette partie les figures 3.7-3.10 illustrent les résultats de la simulation des deux modèles Shephred et Macomber respectivement pour différents régimes de charge ($I_c=8\text{A}$, $I_c=10\text{A}$ et $I_c=12\text{A}$) et de décharge ($I_d=8\text{A}$, $I_d=10\text{A}$ et $I_d=12\text{A}$).

- **En régime de décharge** (figures 3.7 et 3.8) l'état de charge varie entre $\text{SOC}_{\min}=30\%$ et $\text{SOC}_{\max}=100\%$. Il est à noter que plus le courant de décharge d'une batterie est élevé, plus la tension de la batterie diminuera rapidement au fil du temps. Cela est dû à la relation inverse entre le courant de décharge et la tension de la batterie.

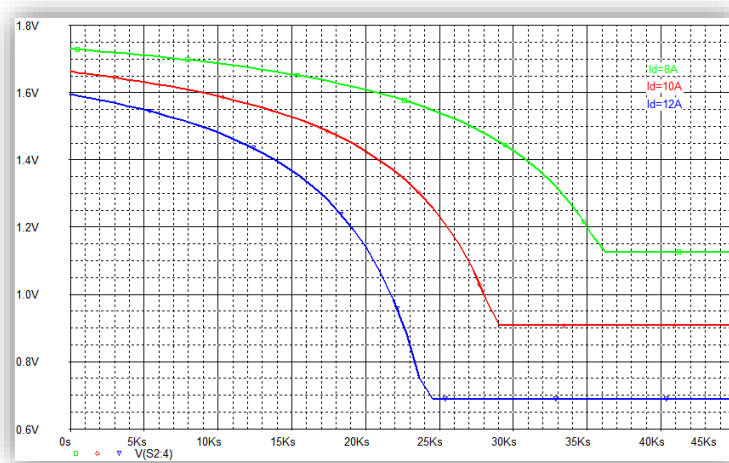


Figure 3.7. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de décharge ($I_d=8\text{A}$, $I_d=10\text{A}$, $I_d=12\text{A}$) selon le modèle de Shepherd

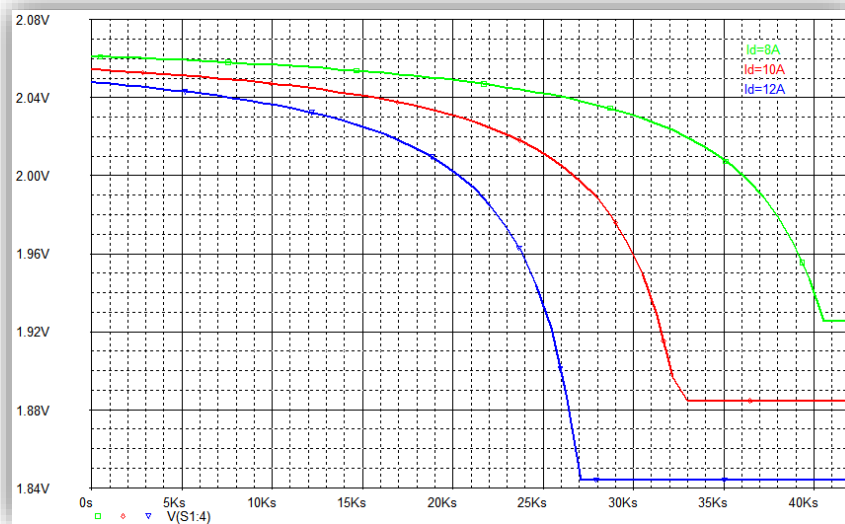


Figure 3.8. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de décharge ($I_d=8A$, $I_d=10A$, $I_d=12A$) selon le modèle de Macomber

- **En régime de charge** (figures 3.9 et 3.10) l'état de charge varie entre $SOC_{max}=100\%$ et $SOC_{min}=30\%$. Il est à noter que les variations de tension d'une batterie en fonction du temps dépendent du courant de charge appliqué. Des courants de charge plus élevés entraînent généralement une augmentation plus rapide de la tension de la batterie. Cependant, il est essentiel de respecter les spécifications de charge de la batterie pour garantir un fonctionnement sûr et optimal.

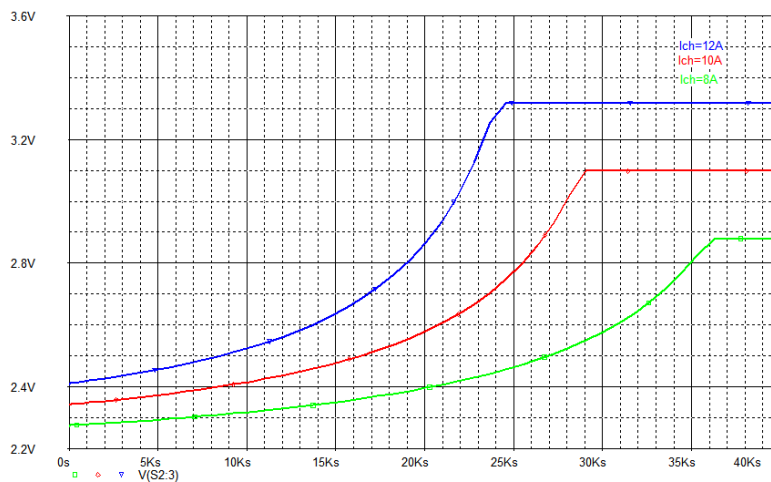


Figure 3.9. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de charge ($I_c=8A$, $I_c=10A$, $I_c=12A$) selon le modèle de Shepherd

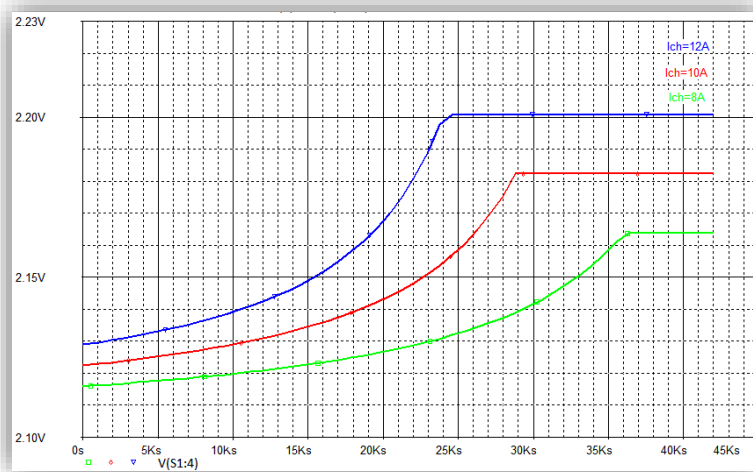


Figure 3.10. Courbes de tension d'un accumulateur de batterie au Pb-acide à différents régimes de charge ($I_c=8A$, $I_c=10A$, $I_c=12A$) selon le modèle de Macomber

3.4.2 Simulation en ligne

Pour réaliser une simulation en ligne, i.e. la batterie est au sein d'un système photovoltaïque, nous avons conçu un SPVA intégrant les composants suivants : **un GPV, une batterie et un régulateur de charge de type on-off**. Pour ce faire, nous avons conçu un modèle électrique d'un GPV à l'aide du PSpice (figure 3.11) en se basant sur le modèle mathématique à une diode décrit le chapitre 1. Ses caractéristiques I-V et P-V obtenues par simulation sont données en figures 3.12 et 3.13 Le régulateur de charge modélisé est conçu par deux switches commandés en ouverture (off) et en fermeture (on) selon le SOC de la batterie (Si $SOC > SOC_{max}$, SW1(ON) et SW2(OFF), Si $SOC < SOC_{min}$, SW1(OFF) et SW2(ON)). Quant à la charge est une résistance $R_l=11\Omega$ connectée aux bornes de la batterie par le biais du SW2 du régulateur de charge.

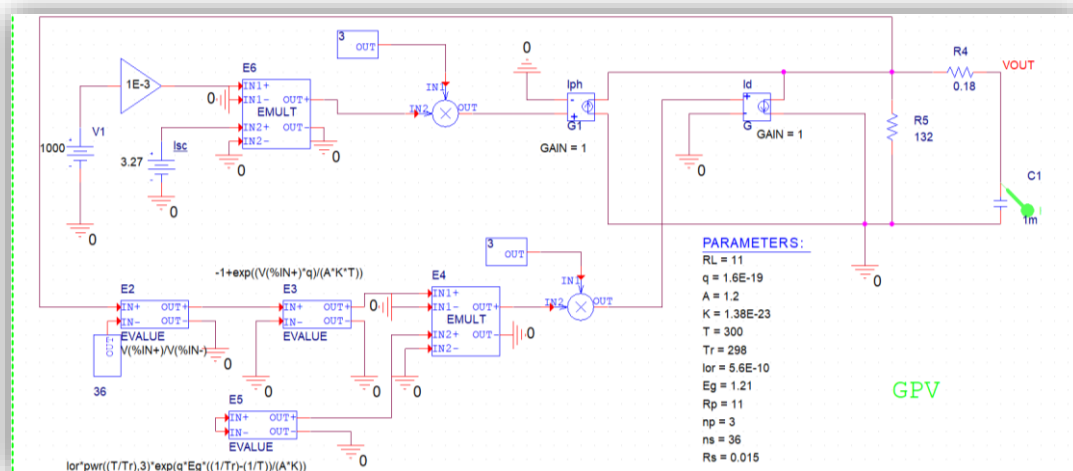


Figure 3.11. Schéma bloc du modèle GPV dans l'environnement PSpice.

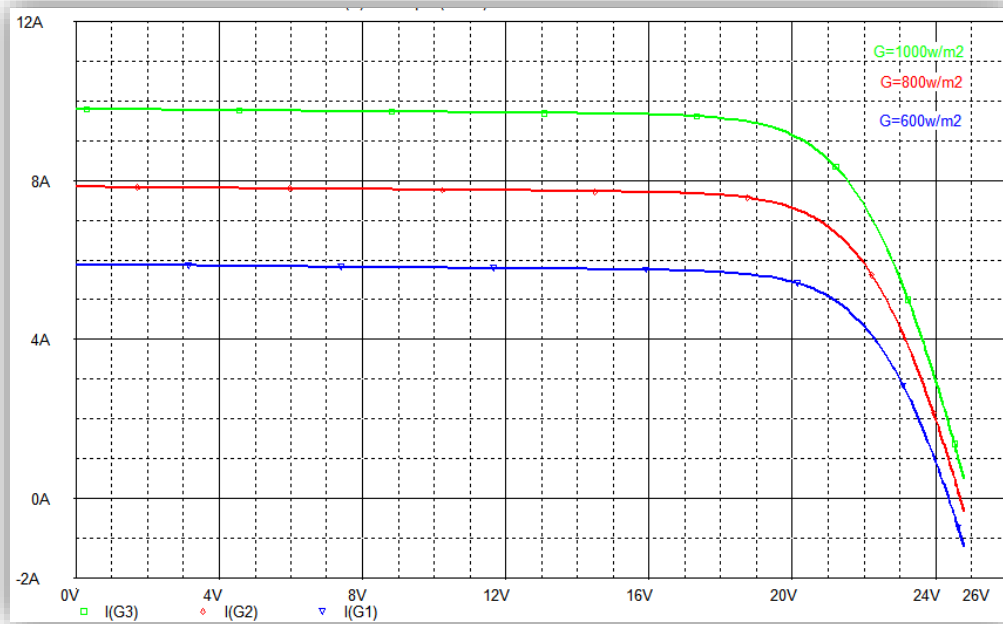


Figure 3.12. Caractéristiques I-V simulées du GPV à différents niveaux d'irradiance.

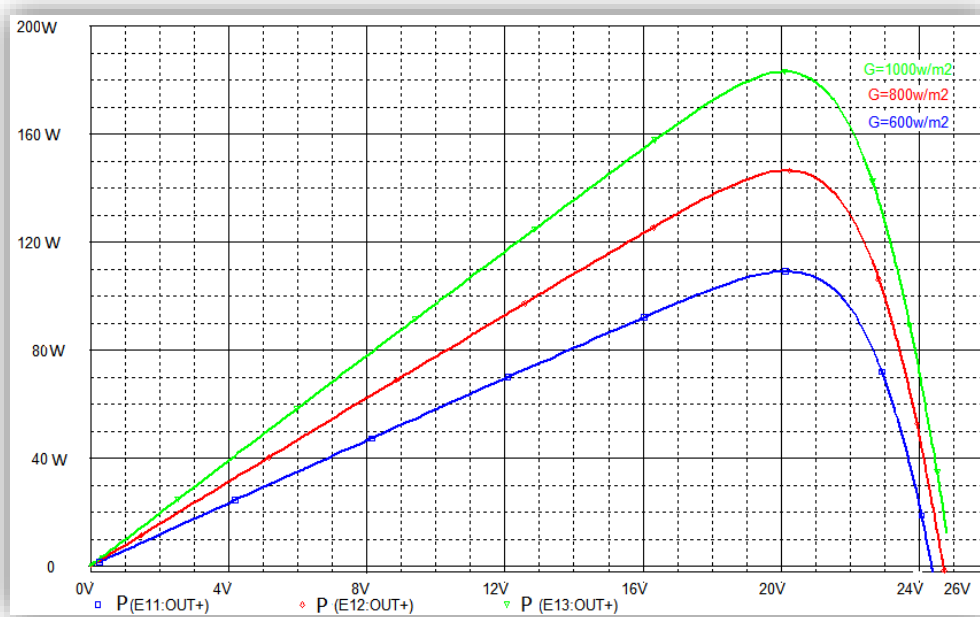


Figure 3.13. Caractéristiques P-V simulées du GPV à différents niveaux d'irradiance

Le schéma blocs du SPVA modélisé par PSpice est illustré par la figure 3.14.

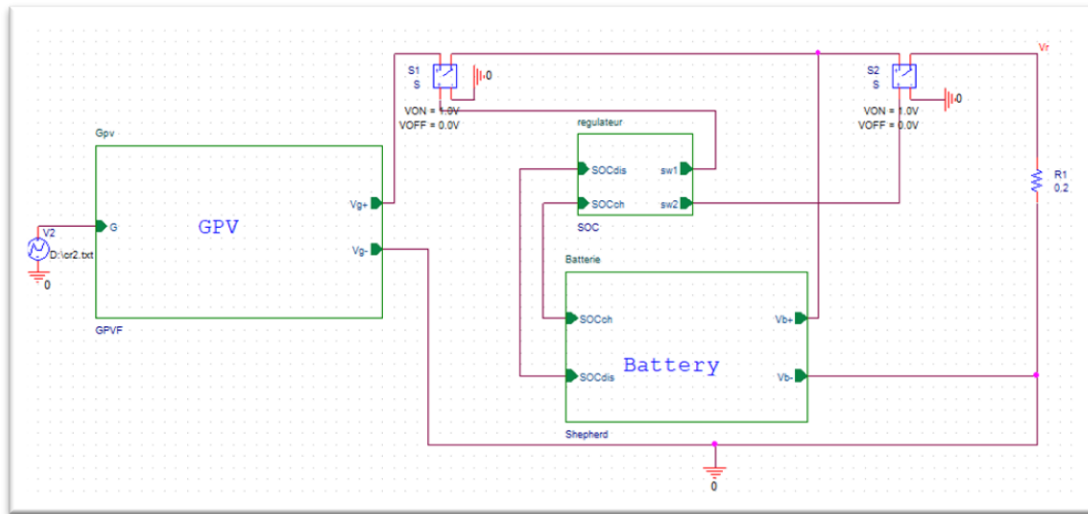


Figure 3.14. Schéma blocs du SPVA modélisé à l'aide du PSpice

Pour la mise en évidence de l'influence de l'irradiance, la méthodologie adoptée pour la réalisation de la simulation du comportement de la batterie au sein d'un SPV est la suivante : Le GPV est assujetti à une irradiance variable (entre 0 à 900 kWm^{-2}), d'une durée d'une complète (24heures). Les résultats obtenus sont relatifs aux variations de(s) :

- Courant de sortie du GPV, I_G (figure 3.15)
- La tension de sortie de la batterie, V_B (figure 3.16)
- Le courant de la batterie, I_B (figure 3.17)
- L'état de charge de la batterie, SOC (figure 3.18)
- Signaux de commande des switches du régulateur de charge (figure 3.19)

Au vu des résultats obtenus, il est à fait évident que la variation du courant de la batterie pendant 24 heures dépend en premier lieu du courant du GPV (qui dépend à son tour de de l'intensité de l'irradiance solaire), du courant de charge R_1 et de son état de charge initial SOC (0). Comme il s'agit d'un régulateur de type on-off, le courant est pulsé, i.e. il s'annule brusquement si la batterie est complètement chargée. Quant à la tension de la batterie, elle dépend pertinemment de son courant de charge/décharge. A titre d'exemple, elle décroît sans cesse pendant la nuit.

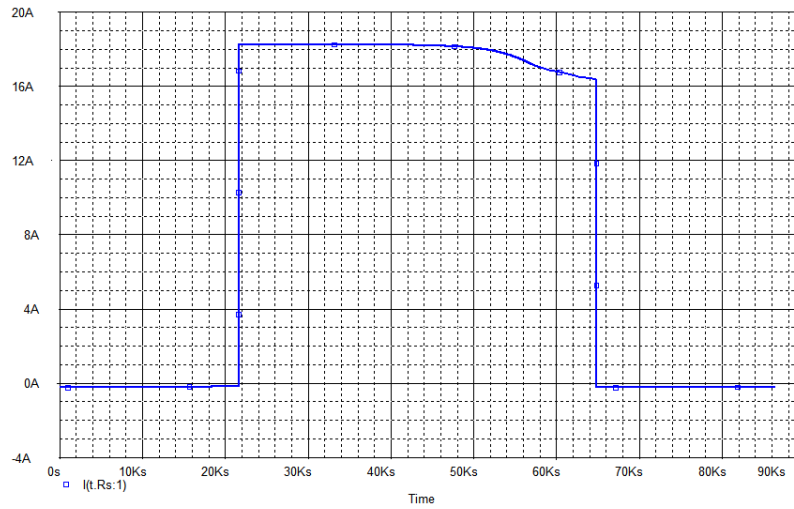


Figure 3.15. Variation du courant du GPV pendant 24 heures

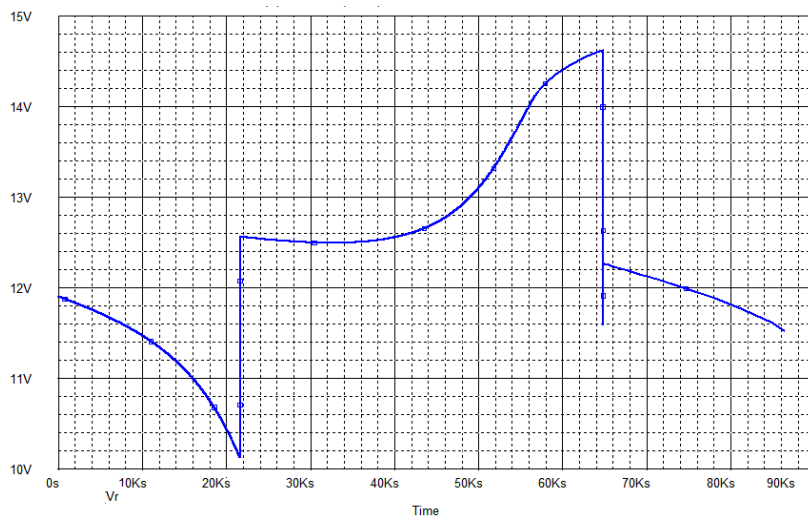


Figure 3.16. Variation de la tension de batterie pendant 24 heures

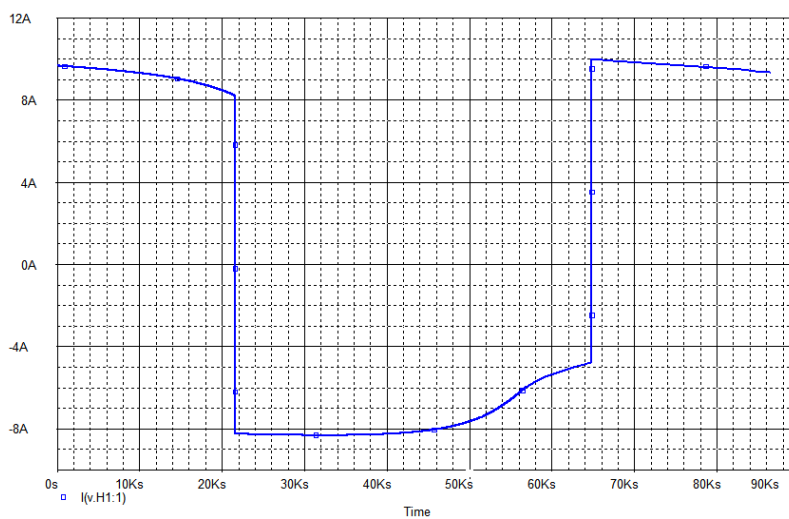


Figure 3.17. Variation du courant de la batterie pendant 24 heures.

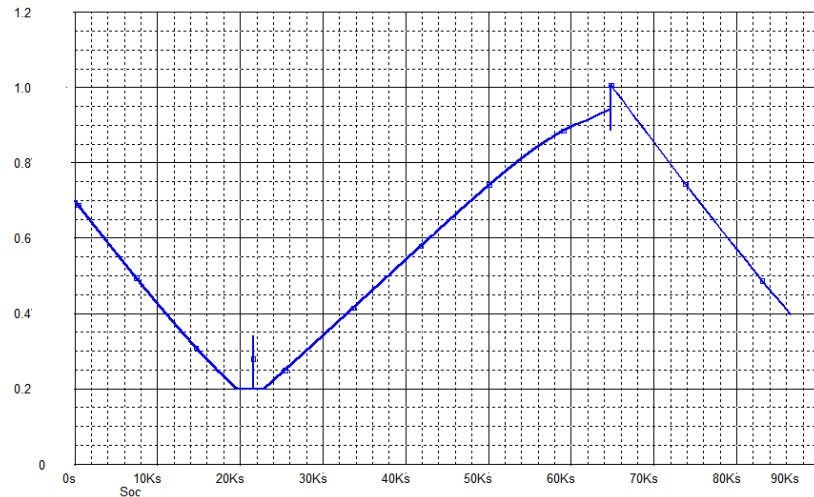


Figure 3.18. Variation de l'état de charge SOC de la batterie pendant 24heures.

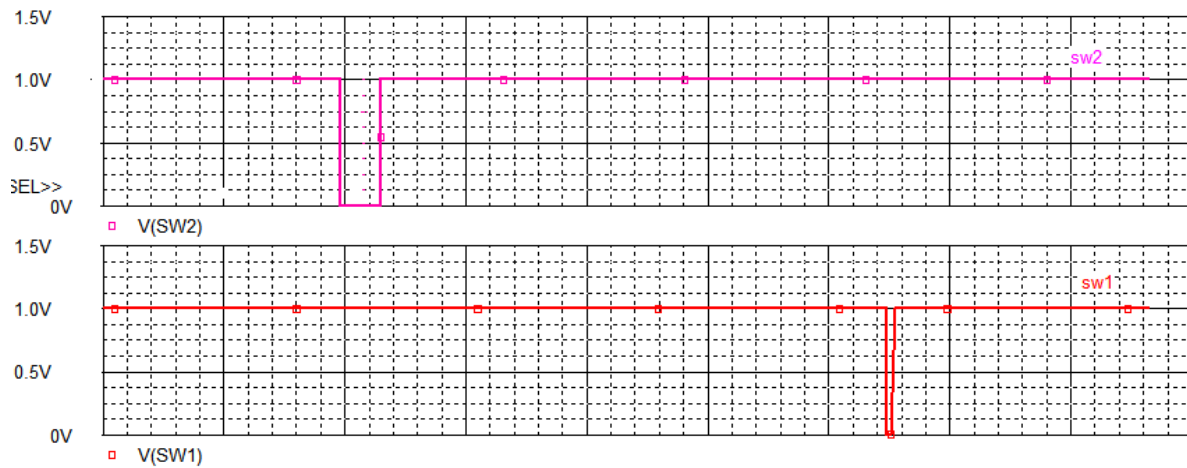


Figure 3.19. Signaux de commande des switches du régulateur de charge pendant 24 heures

3.5. Conclusion

Ce chapitre présente la conception et la simulation et d'un modèle électrique de la batterie dédié au logiciel PSpice. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes fonctionnalités du logiciel PSpice en focalisant beaucoup plus sur l'option de la modélisation comportementale analogique (ABM). Le modèle de batterie utilisé est spécifique à la technologie de l'acide de plomb et intègre des composants représentant l'efficacité de charge et la tension de la batterie.

Le chapitre expose également l'implémentation des modèles mathématiques de Shepherd et de Macomber, ainsi que la simulation du comportement de la batterie hors ligne et en ligne sous différentes conditions du rayonnement solaire.

Conclusion générale

Le travail du présent mémoire de Master se veut une contribution pour le développement de modèles électriques des batteries à usage solaire photovoltaïque dédiées au fameux simulateur orienté-circuit, dénommé PSpice. Il s'agit plus particulièrement de mettre à la disposition des concepteurs des dispositifs électroniques d'un SPVA (SCP), comme le régulateur de charge, le MPPT, l'onduleur, ...etc., un composant de stockage électrochimique d'énergie (batterie d'accumulateurs au Pb-acide) qui pourrait servir d'outil pour la simulation et l'analyse du comportement de leurs dispositifs ainsi développés.

Tout d'abord, on s'est astreint à une recherche bibliographique portant sur les différents modèles mathématiques qui peuvent décrire convenablement le comportement des batteries au sein d'un SPVA. En effet, deux modèles ont été sélectionnés (modèle de Shepherd et modèle de Macomber) faisant l'objet de cette étude. Ensuite, une étude de modélisation et simulation a été menée en utilisant le logiciel Pspice avec l'option 'A.B.M.'.

Enfin, pour aboutir aux résultats prévus dans le cadre de ce PFE, l'étude de simulation du comportement de la batterie en ligne établie dans le troisième chapitre, nous a permis de bien décrire le comportement d'un tel composant.

Résumé :

Le développement d'un modèle électrique de batterie solaire photovoltaïque à l'aide de PSpice est essentiel pour comprendre et optimiser son fonctionnement. Les modèles de Shepherd et de Macomber sont pertinents pour la modélisation, avec Shepherd représentant le comportement électrochimique et électrique, et Macomber prenant en compte l'influence de la température. Nous avons modélisé ces deux modèles hors-ligne, analysé les résultats, puis les avons combinés avec d'autres composants du système photovoltaïque en ligne pour tester la modélisation. L'utilisation de ces modèles dans PSpice permet d'analyser et d'optimiser facilement l'ensemble du système photovoltaïque en considérant les interactions entre la batterie, les panneaux solaires et les autres éléments du circuit électrique.

Mots clés : batterie, photovoltaïque, modélisation, PSpice, modèle de Shepherd, modèle de Macomber

Abstract

The development of an electrical model of a photovoltaic solar battery using the PSpice software is an important process to understand and optimize the operation of this battery. In this context, Shepherd and Macomber models are relevant choices for modeling. Shepherd's model uses a circuit equivalent to accurately represent the electrochemical and electrical behavior of the battery, while Macomber is a thermal model that takes into account the influence of temperature. This model allows us to evaluate the impact of temperature on the performance and life of the battery. We modeled these two models (offline) and analyzed the modeling results, then combined these two models with other components of the photovoltaic system (online) to test the modeling and see how it matches the actual system. By using these models in the PSpice software, we can easily analyze and optimize the entire photovoltaic system by taking into account the interactions between the battery, solar panels, and other elements of the electrical circuit.

Keywords: battery, photovoltaic, modeling, PSpice, Shepherd model, Macomber model

ملخص

يعد تطوير نموذج كهربائي للبطارية الشمسية الكهروضوئية باستخدام برنامج PSpice عملية مهمة لفهم وتحسين تشغيل هذه البطارية. في هذا السياق، يعد نموذجا Shepherd و Macomber خيارين مهمين لوضع النماذج. يستخدم نموذج Shepherd دائرة مكافئة لتمثيل السلوك الكهروكيميائي والكهربائي للبطارية بدقة، في حين أن Macomber هو نموذج حراري يأخذ في الاعتبار تأثير درجة الحرارة. يسمح هذا النموذج بتقييم تأثير درجة الحرارة على أداء البطارية وعمرها. قمنا بنمذجة هذين النموذجين (غير متصل بالنظام) وقمنا بتحليل نتائج النمذجة، ثم قمنا بدمج هذين النموذجين مع مكونات أخرى من النظام الكهروضوئي (متصل بالنظام) لاختبار النمذجة ومعرفة كيفية مطابقتها للنظام الحقيقي. باستخدام هذه النماذج في برنامج PSpice، يمكننا بسهولة تحليل وتحسين النظام الكهروضوئي بأكمله من خلال مراعاة التفاعلات بين البطارية والألواح الشمسية والعناصر الأخرى للدائرة الكهربائية.

الكلمات الرئيسية: بطارية، كهروضوئية، نمذجة، PSpice، نموذج Shepherd، نموذج Macomber