

*République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen.
Facultés des Sciences, Département Physique*



*Mémoire de Master en Physique
Spécialité : Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables*

Thème

Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome

Présenté par :

Bencherif Mohammed

Encadré par :

Mr A. Benyoucef

MCB Université de Tlemcen

Soutenu le 25 juin 2015 devant la commission de jury :

Mr N. Bibi-Triki

Président

Pr

Université de Tlemcen

Mr L. Merad

Examineur

MCA

Université de Tlemcen

Mme C. Zidani

Examineur

MCB

Université de Tlemcen

Année universitaire : 2014-2015

Dédicaces à

- Mes chers parents

- Mes chers frères

- Toute ma famille

- Mes fidèles amis

- Tous les étudiants de la 2^{ème} année Master
Physique Energétique et matériaux



Remerciements

Je remercie en premier lieu notre Dieu le tout puissant qui nous a dotés de la Merveilleuse faculté de raisonnement, de m'avoir donné le courage et la volonté de mener à terme le présent travail.

*Je remercie vivement en premier lieu Monsieur **Abdellah Benyoucef**, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, et mon directeur de mémoire de master, qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral, a su m'informer, me conseiller, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.*

*Mes chaleureux remerciements vont à **Mr Nasreddine Bibi-Triki**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour m'avoir honoré de présider ce jury.*

Mes plus vifs remerciements s'adressent également aux examinateurs,

***Mr Laaredj Merad** et **Mme Chafika Zidani**, maîtres de conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce modeste mémoire.*

*Mes remerciements vont enfin à **Mr Tayeb Benouaze** professeur à l'université de Tlemcen, pour ses conseils fructueux et ses encouragements.*



Sommaire

Liste des figures	01
Liste des tableaux.....	02
Nomenclature	03
Introduction générale.....	04

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

I.1 Introduction.....	08
I.2 Etat de l'Art sur les batteries plomb-acide.....	08
I.3 Historique.....	08
I.4 Définition d'une batterie Plomb-Acide.....	09
I.5 Place de l'accumulateur au Plomb aujourd'hui	09
I.6 Système de stockage.....	10
I.7 Types d'accumulateurs.....	11
a. Les Accumulateurs au plomb acide.....	12
a.1 Composition d'une batterie solaire Plomb- Acide.....	12
a.2 Principe de fonctionnement.....	14
a.2.1 La charge	15
a.2.2 La décharge	15
b. Les Accumulateurs au Nickel- Cadmium.....	16
c. Les accumulateurs au lithium	16
I.8 Durée de vie des batteries.....	17
I.9 Le processus de vieillissement.....	18
I.10 Conclusion.....	19

Chapitre II : Les batteries Plomb-Acide dans un système photovoltaïque

II.1 Introduction.....	21
II.2 Energie photovoltaïque.....	21
II.3.Autonomie	22
II.4 Technologies d'accumulateurs.....	23
II.5 L'état de charge des batteries d'accumulateur.....	24
II.6 La batterie dans un système photovoltaïque.....	24
II.6.1 Système photovoltaïque	25
II.6.2 Conditions de fonctionnement des batteries dans les systèmes photovoltaïques.....	26
II.6.3 Conditions environnementales.....	26
II.6.4 Stockage, transport et maintenance.....	26
II.6.5 Contraintes opératoires.....	27
II.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	29
II.7.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque.....	29
II.7.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	30
II.8 Conclusion	30

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

III.1 Introduction.....	32
III.2 Aspects théoriques de la modélisation.....	32
III.3 Modélisation de stockage	33
a. Modèle de la charge de la batterie.....	33
b. Modèle de la décharge de la batterie	33
c. Tension de batterie	34
d. Le courant de batterie	36
e. Rendement de la Batterie.	36
III.4 Extraction des cycles de fonctionnement par l'algorithme Rainflow.....	37
III.5 Modélisation du cycle de vie de la batterie.....	37
III.6 Modélisation du vieillissement des batteries	39
III.7 Conclusion	41

**Chapitre IV : Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système
PV**

IV.1 Introduction	43
IV.2 Dimensionnement énergétique du système Photovoltaïque	43
IV.2.1 Dimensionnement du champ PV	44
IV.2.2 Autonomie du système	44
IV.3 Modélisation des composants du système	45
IV.3.1 Le générateur photovoltaïque	45
IV.3.2 Les convertisseurs d'énergie	46
IV.3.3 Le dispositif de stockage	48
IV.4 Résultats du dimensionnement	50
IV.4.1 Système photovoltaïque.....	50
IV.4.2 Système de stockage.....	52
IV.5 Simulation sur MATLAB/ Simulink.....	52
IV.5.1 Capacité.....	53
IV.5.1.1 Influence de la température	53
IV.5.1.2 Influence du DOD.....	53
IV.5.1.3 Influence du besoin énergétique B_j	55
IV.5.2 Etat de charge de batterie.....	55
IV.5.2.1 Influence du temps.....	55
IV.5.2.2 Influence de la température.....	57
IV.6 Conclusion.....	57
Conclusion générale	58
Références bibliographiques.....	61

Liste des figures

Figure (I.1) : Batterie au Plomb-Acide

Figure (I.2) : Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb

Figure (I.3) : Construction d'une batterie monobloc

Figure (I.4) : Principe de fonctionnement de l'accumulateur au Plomb.

Figure (I.5) : Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb

Figure (I.6) : Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb

Figure (I.7) : Résistance à la corrosion du Plomb dans l'acide sulfurique

Figure (II.1) : Système photovoltaïque autonome

Figure (II.2) : Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques

Figure (II.3) : Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries

Figure(II.4): Système PV

Figure (II.5) : Exemple de production photovoltaïque pour deux journées types, données d'irradiation mesurées sur le site de Cadarache (13), rendement supposé des panneaux photovoltaïques 15%

Figure (III.1) : Schéma électrique de batterie.

Figure (III.2) : Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge.

Figure (III.3) : Variation de nombre de cycle en fonction de DOD

Figure (III.4) : Modèle de vieillissement de la batterie

Figure (IV.1) : Modèle de la cellule PV

Figure (IV.2) : Hacheur boost avec sa commande

Figure (IV.3) : Schéma équivalent de n_b éléments en série

Figure (IV.4) : Nombre totale de modules

Figure (IV.5) : Nombre de batteries utilisées

Figure (IV.6) : Influence de la température sur la capacité

Figure (IV.7) : Influence de la profondeur de décharge sur la capacité nominale des batteries

Figure (IV.8) : Influence de besoin énergétique sur la capacité de batterie

Figure (IV.9) : Influence de temps sur l'état de charge d'une batterie

Figure (IV.10) : Influence de la température sur l'état de charge

Liste des tableaux

Tableau (III.1) : Caractéristique d'une batterie Plomb-Acide.

Tableau (III.2) : Nombre de cycle des batteries en fonction de la profondeur de décharge DOD.

Tableau (III.3) : Taux de vieillissement pour plusieurs profondeurs de décharge avec une capacité $C=220$ Ah

Tableau (IV.1) : Récapitulatif des paramètres du système

Tableau (IV.2) : Détermination du nombre total des modules

Tableau (IV.3) : Détermination du nombre de batteries

Nomenclature

P_{pv} : La puissance du générateur PV [w]

P_L : La charge demandée au temps t [c]

η_{ond} : Le rendement de l'onduleur

η_{Bat} : Le rendement de la batterie

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie [Ah]

DOD : La profondeur de décharge

SOC : l'état de charge

N_a : Le nombre de jours d'autonomie

V_b : La tension du système [V]

$V_{bat}(t)$: La tension de circuit ouvert au temps t [V]

$R_{bat}(t)$: La résistance interne de batterie [Ω]

VF : la force électromotrice [N]

P_{incid} : Puissance du générateur [W]

B_j : Les besoins énergétiques journaliers [Wh]

P_c : Puissance crête des panneaux PV [W]

E_j : Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable [$kWh/m^2/j$],

η_b : Rendement électrique des batteries,

η_i : Rendement électrique de l'installation (tenant compte des différentes pertes et des convertisseurs).

C_b : La capacité nominale des batteries [Ah]

U_{bat} : La tension nominale des batteries [V]

Q_d : La quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

Introduction Générale

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les énergies renouvelables, sont des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie solaire photovoltaïque.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro-turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV) avec un système de stockage, le stockage est assuré par des batteries. Ce système est appelé système PV-Batteries. Le type de stockage généralement utilisé dans ce système est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales. L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leurs durées de vie.

Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus rapidement que cette capacité installée est faible. Afin de protéger les batteries contre une recharge excessive, on doit les déconnecter de l'installation. Il est alors impossible d'utiliser la totalité de la ressource renouvelable. Finalement, le dimensionnement du champ photovoltaïque est surestimé par rapport aux besoins réels de l'utilisateur final.

Introduction Générale

Le dimensionnement du stockage optimal est basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système ainsi que de la charge de l'utilisation. A cet effet nous nous intéressons aux modèles de ces composants, c'est à dire la modélisation du champ photovoltaïque, batterie, régulateur et convertisseur.

Le but poursuivi dans le cadre de ce mémoire est de chercher les modèles mathématiques les plus précis afin d'obtenir un dimensionnement optimal du système PV/Batteries.

Au premier chapitre, nous faisons une description générale des batteries plomb-acide. Les différents paramètres caractérisant la batterie seront détaillé, comme la capacité, la profondeur de décharge, la tension d'utilisation, le rendement ainsi que l'autodécharge. Aussi les paramètres de durée de vie et de vieillissement seront abordés puisqu'ils constituent une étape clé dans la modélisation d'un système contenant des batteries.

Le second chapitre présente des informations importantes sur les conditions de coupage des batteries dans un système photovoltaïque, et montre l'intérêt du stockage électrochimique dans un système photovoltaïque fluctuant par sa source.

Le troisième chapitre consiste en une étude sur le modèle le plus pratique pour les batteries couplées au système PV. La batterie est modélisée par un schéma électrique, des équations caractéristiques, des paramètres essentiels de la batterie.

Le quatrième chapitre est consacré au dimensionnement du système PV/Batteries par la méthode simulation matlab.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et sa partie de simulation.

Chapitre I :

Les batteries Plomb-Acide

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

I.1 Introduction

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vu l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries (voir figure I.1).



Figure (I.1) : Batterie au Plomb-Acide

I.2 Etat de l'Art sur les batteries plomb-acide

Pour bien situer les objectifs associés à l'amélioration des propriétés d'un accumulateur plomb-acide, il est important de comprendre son fonctionnement ainsi que les différents éléments qui les constituent [2].

I.3 Historique

C'est en 1799 que volta a découvert la première pile électrique en réalisant des empilements successifs d'une lame de zinc, d'une lame de feutre imbibée d'eau vinaigrée et d'une lame de cuivre [4].

Bien que le système plomb-acide ait d'abord été découvert par Sinstedenen en 1854. L'histoire des accumulateurs au plomb industriel ne commence qu'en 1859 lorsque Gaston Planté a construit la première batterie rechargeable. Celle-ci se composait de deux lames de plomb spiralées par une toile de lin plongées dans une solution d'acide sulfurique [5]. L'histoire se poursuit en 1880 quand Camille Faure met au point une technique pour faciliter la fabrication des accumulateurs au plomb. [6]

Depuis cette époque, Les progrès techniques se sont multipliés pour faire de l'accumulateur plomb-acide l'un des systèmes électrochimiques le plus répandue et utilisé dans le monde [4].

I.4 Définition d'une batterie plomb-acide

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance.

Ces plaques sont recouvertes de matières actives-bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative. Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface, ainsi que la quantité d'acide disponible dans l'électrolyte (composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges d'une batterie) sont des paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour une batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères heure, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définies) [7].

I.5 Place de l'accumulateur au Plomb aujourd'hui

Bientôt 150 ans d'études sur l'accumulateur au Plomb et pourtant, loin d'être un produit suranné, il continue de faire l'objet de diverses recherches et reste l'accumulateur le plus vendu dans le monde. Les principales raisons de cet engouement sont le faible coût et la maturité de cette technologie, mais aussi son aptitude à être recyclé à plus de 97% [8,9]. Aujourd'hui il existe différents types d'accumulateurs au Plomb, et différentes technologies pour mieux répondre aux spécificités des applications qui l'emploient.

La batterie au Plomb s'est améliorée au fil des ans, et continuera de l'être. Elle est notamment utilisée pour le démarrage des véhicules (secteur le plus porteur actuellement), la traction (chariots de manutention), les alimentations de secours, le photovoltaïque. A ces domaines sont adaptées des technologies d'accumulateurs au plomb, qui se caractérisent notamment par l'épaisseur et les alliages des grilles, un électrolyte liquide ou immobilisé, des plaques planes ou tubulaires... Le marché mondial des batteries (toutes technologies confondues) regroupe trois catégories : Les batteries portables, de démarrage et industrielles (de traction et stationnaire). La croissance du marché mondial des batteries au plomb amène le chiffre d'affaires à 12 milliards d'euros en 2002 ce qui représente 65% de la production totale [10].

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

L'importance de ce chiffre s'explique par le fait que, malgré la forte augmentation de la part des technologies lithium-ion (Li-ion), nickel-métal hydrure (Ni-MH)... Associées au marché des batteries portables, la technologie de l'accumulateur au plomb reste majoritairement employée dans les domaines du démarrage, de la traction et du stationnaire. Pour ces domaines en dehors de l'encombrement, la batterie au plomb sera souvent préférée en raison de son faible coût d'investissement.

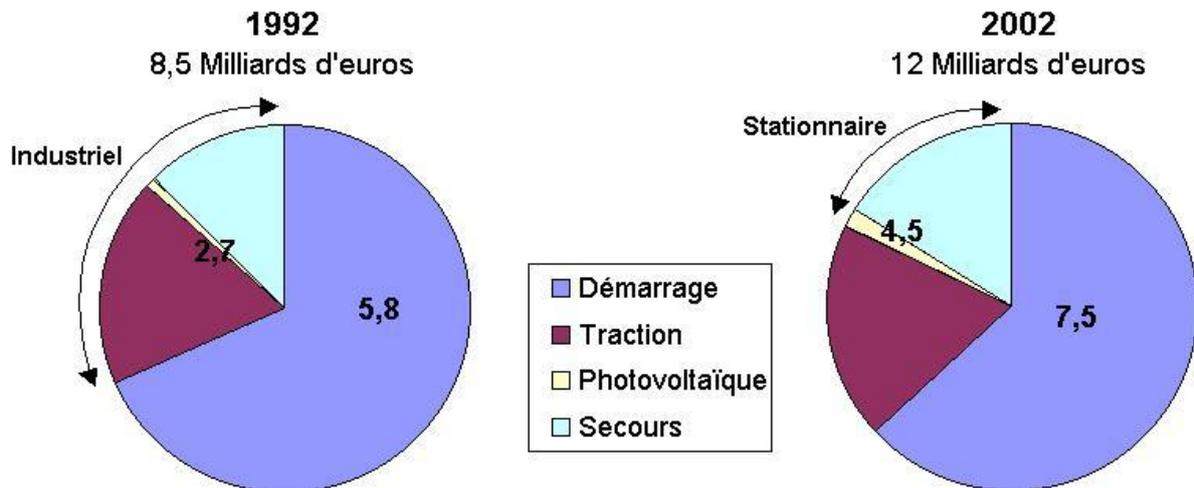


Figure (I.1) : Marché mondial des batteries d'accumulateurs au plomb [10]

I.6 Système de stockage

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [11] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :

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 [11] :

- Rapports de charge et décharge : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

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 [11].
- 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, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [13].
- 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.

La profondeur de décharge : Cependant, affecte même les batteries de cycle profond. plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.

La tension d'utilisation : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

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

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

I.7 Types d'accumulateurs

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

le stockage électrochimique. Les deux principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans le système photovoltaïque sont [14] :

a. Les Accumulateurs au Plomb-Acide :

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [15].

a.1 Composition d'une batterie solaire Plomb- Acide ^[16] :

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

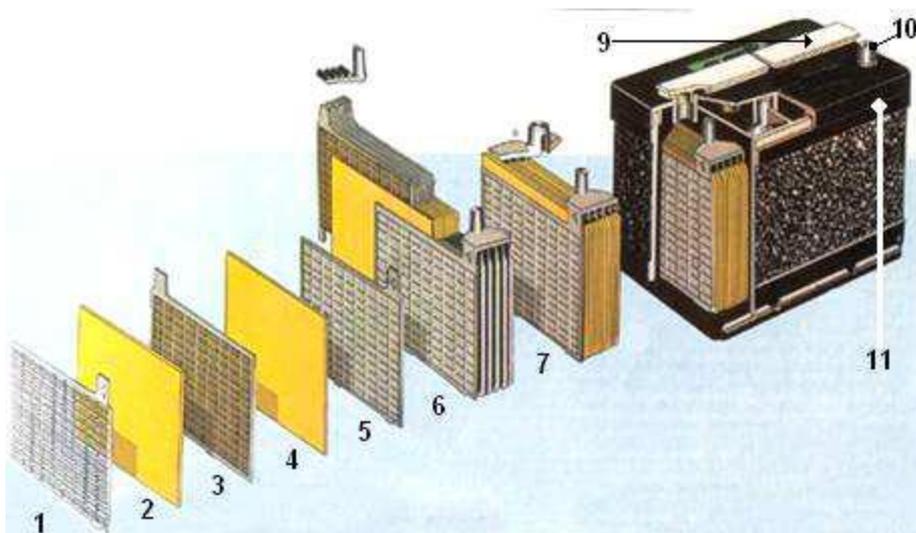


Figure (I.3) : Construction d'une batterie monobloc ^[16]

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1 : Grille | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive | 9 : Rampe de bouchons |
| 4 : Plaque négative | 10 : Borne |
| 5 : Barrette | 11 : Bac |
| 6 : Faisceau négatif | |

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la Batterie. [16] L'alliage en question est en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

contenance en Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge.

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui implique une plus grande durée de vie des batteries. Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées. Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes".

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un container plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie. Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie peut fournir. Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge en conductions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%.(pour plomb- Acide)

Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou des éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6. Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de terminaux externes dans la partie supérieure de la batterie.

Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

de l'électrolyte. Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quel que soit le régime [11].

a.2 Principe de fonctionnement :

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces 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. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale [2] :

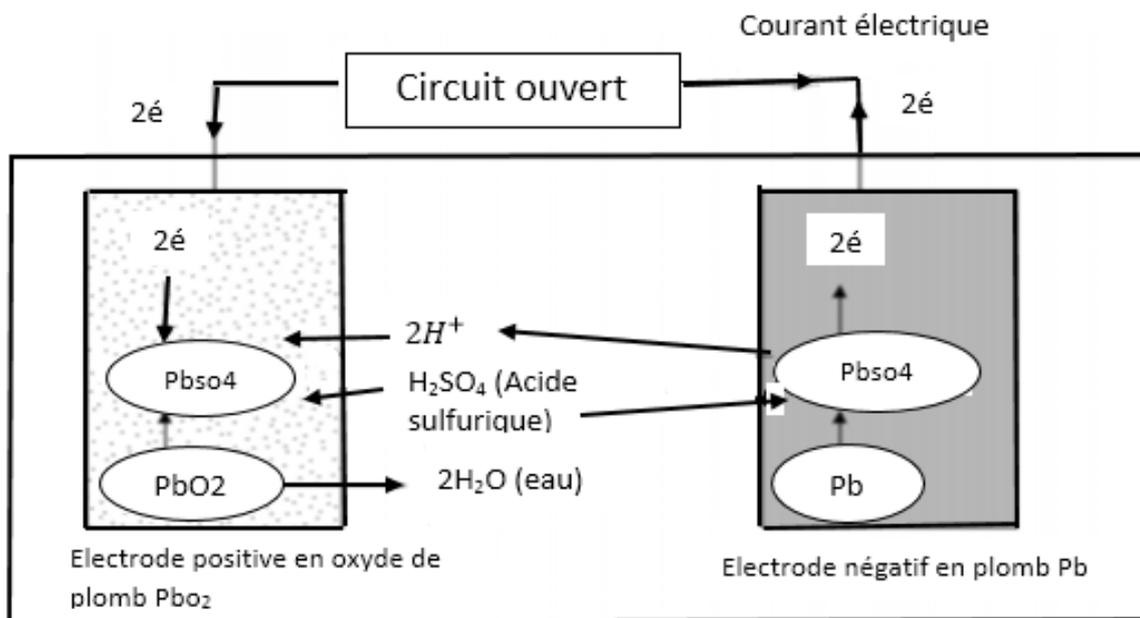
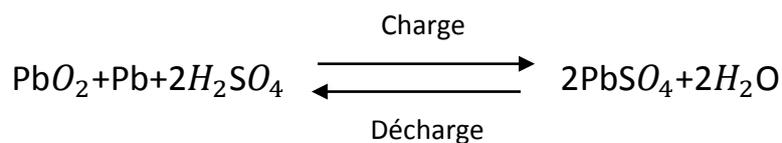
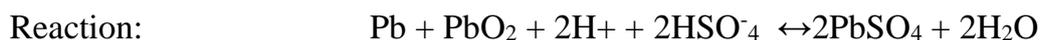
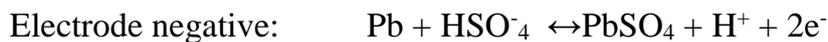


Figure (I.4) : Principe de fonctionnement de l'accumulateur au Plomb



Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

a.2.1 La charge

Pendant la charge, les ions sulfates, du sulfate de Plomb, sont progressivement libérés sous forme d'ions HSO_4^- dans l'électrolyte. Il en résulte une augmentation de la concentration d'acide sulfurique dans l'électrolyte. La concentration d'acide croît rapidement à proximité de l'interface réactionnelle. Ce phénomène est amplifié, côté positif, par une consommation d'eau. En fin de charge (point M), on note un accroissement rapide de la tension, Les plaques complètement polarisées ne retiennent plus de courant, car la densité de matériel actif baisse. Ce courant tend alors à électrolyser l'eau, produisant de l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 sur l'électrode négative). Ce phénomène est appelé gazéification [12].

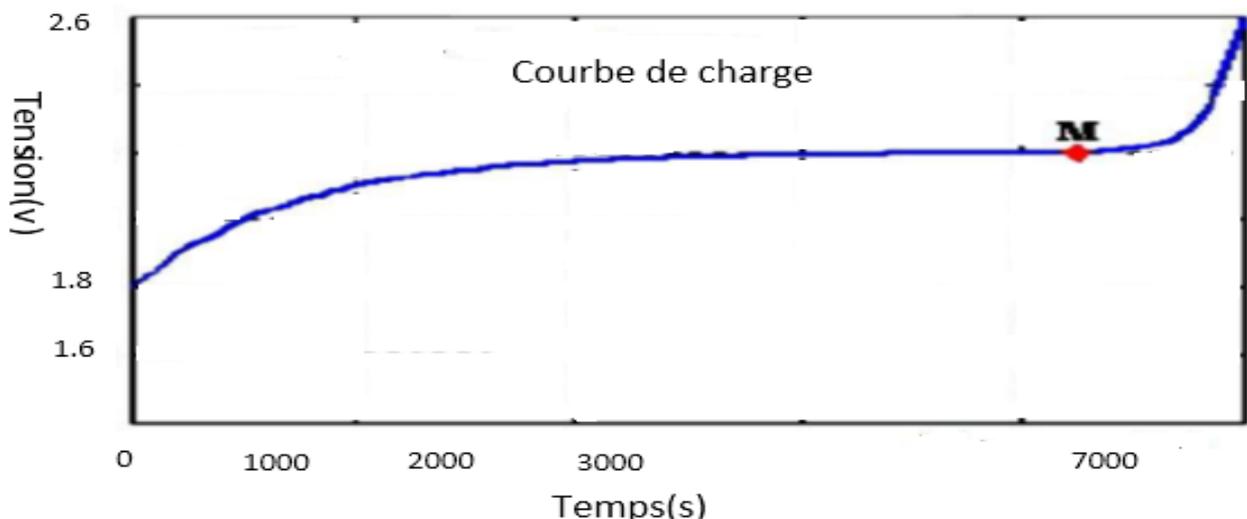


Figure (I.5) : Évolution de la tension durant la charge d'un accumulateur au plomb

a.2.2 La décharge

La capacité dépend du régime auquel est effectuée la décharge. Plus le temps de la décharge n'est court, donc le régime élevé, plus la capacité est faible. La fin de décharge est déterminée par une tension d'arrêt fixée de la façon suivante :

Sur la courbe de tension en fonction du temps lors d'une décharge, une chute brutale de la tension vers la fin de décharge est observée. La tension d'arrêt est une valeur choisie avant cette chute. Cette valeur dépend du régime de décharge.

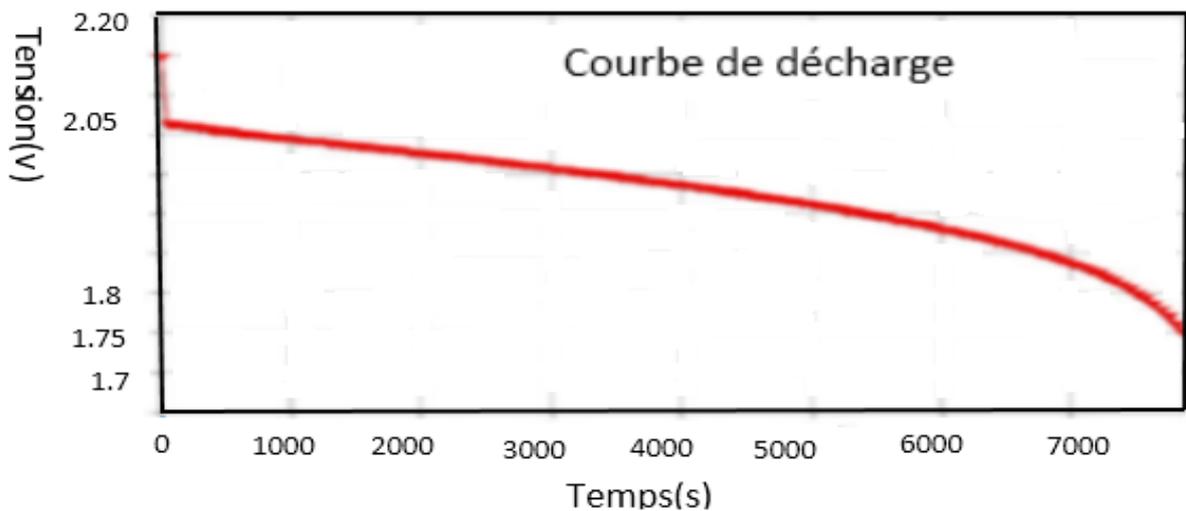


Figure (I.6) : Évolution de la tension durant la décharge d'un accumulateur au plomb

b. Les Accumulateurs au Nickel- cadmium ^[16] :

Les batteries de Nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du Plomb- Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxiques à partir de l'électrolyte.
- Ne craint pas le gel.

c. Les accumulateurs au lithium

L'utilisation et la diversité sans cesse grandissantes des applications électriques ont conduit au développement de nouvelles technologies de stockage électrochimique, comme les systèmes Redox, les systèmes de stockage via l'hydrogène, ou les batteries au lithium.

L'élément lithium présente des caractéristiques physico-chimiques intéressantes :

- fort potentiel redox : $E_{Li/Li^+} = - 3,04 \text{ V/ENH}$;
- masse molaire faible : $M = 6,94 \text{ g/mol}$;
- capacité massique = $3,87 \text{ Ah/g}$.

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

Utilisé comme matière active à l'anode, il permet d'obtenir des batteries à fort potentiel énergétique. Mais sa réactivité avec le milieu ambiant (notamment avec l'air) en fait un matériau difficile à manipuler à l'état métallique. Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère [17].

I.8 DUREE DE VIE DES BATTERIES ^[10]

La durée de vie d'un accumulateur est directement liée à leurs conditions d'utilisation. Elle dépend essentiellement du nombre de cycles 'charge-décharge'. Pour obtenir une durée de vie de 10 à 15 ans, il est indispensable que la batterie, dans son fonctionnement, soit maintenue dans un état de charge supérieur à plus de 50 %.

La durée de vie des batteries au Plomb-Acide est déterminée par les trois facteurs suivants :

- **1er facteur** : vie cyclique et résistance aux températures élevées.
- **2ème facteur** : effets de la sulfatation et les sous-charges, qui sont seulement spécifiques dans les applications PV.
- **3ème facteur** : c'est les facteurs catastrophiques, défauts de fabrication, sous dimensionnement, utilisation abusive, congélation, etc..., qui peuvent être souvent évité.

Toute surcharge élevée provoque la corrosion, des déformations et de l'érosion sur les plaques, ainsi qu'une surchauffe. La présence de certains composés organiques et inorganiques (utilisés comme additifs dans les matériaux actifs, électrolyte) peut causer la coalescence des particules de Pb avec une perte consécutive de porosité. Il existe des produits qui, ajoutés aux matériaux des plaques négatives, préviennent cet inconvénient (voir figure I.7).

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

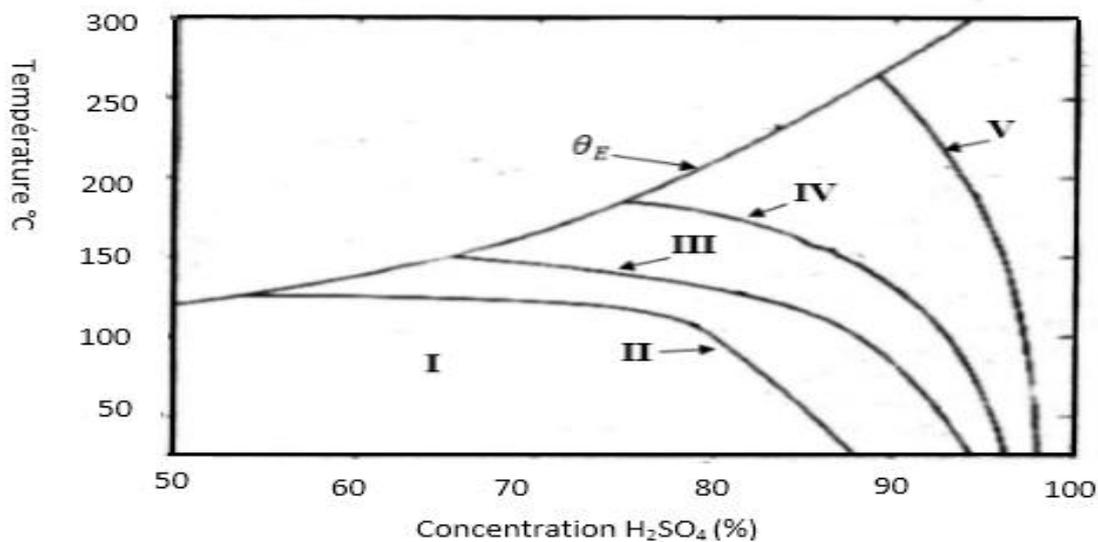


Figure (I.7) : Résistance à la corrosion du Plomb dans l'acide sulfurique

θ_E : température d'ébullition

I : corrosion inférieure à 0,13 mm/an

II : corrosion égale à 0,13 mm/an

III : corrosion égale à 0,5 mm/an

IV : corrosion égale à 1,3 mm/an

V : corrosion égale à 5 mm/an

A une concentration inférieure à 50 % de H₂SO₄, la corrosion est inférieure à 0,13 mm/an. Le fonctionnement des batteries dans les systèmes PV est différent de leur fonctionnement traditionnel. Les conditions opératoires de la batterie dans ces systèmes conduits aux faibles durées de vie. Pour les systèmes PV qui utilisent les batteries au plomb à plaques tubulaires, la durée de vie est souvent limitée par la dépendance de la température avec notamment la résistance à la corrosion et non pas la vie cyclique.

I.9 Le processus de vieillissement ^[11]

La corrosion est la destruction des métaux sous l'action du milieu ambiant. Cette destruction est le résultat de réactions de nature chimique ou électrochimique qui se déroulent à la surface de séparation métal - milieu ambiant. Ce sont généralement des réactions d'oxydation de métaux.

L'immense majorité des problèmes de corrosion rencontrés est liée à la présence d'eau au contact des métaux. Du point de vue économique, la corrosion pose un problème très important. La corrosion fait changer les propriétés courant/tension de la batterie.

Chapitre I : Les batteries Plomb-Acide

Le vieillissement des batteries au plomb/acide dans les systèmes PV est surtout causé par :

- La corrosion de la plaque positive : transformation du plomb métallique Pb en oxyde de plomb PbO_x.
- La dégradation de la matière active de la plaque positive causée par la déformation mécanique de cette dernière (PbO₂ ↔ PbSO₄) durant les cycles de charge et de décharge.
- La sulfatation - recristallisation du PbSO₄ durant les longues périodes en sous-charge ou l'état de charge est faible.

La capacité que l'on peut obtenir par rapport à celle que l'on devrait théoriquement obtenir se nomme coefficient d'utilisation. Celui-ci varie avec le type de l'élément, la vitesse de la décharge et la température. Il convient, en outre, de garder présentes à l'esprit certaines circonstances faisant obstacle à l'utilisation complète des matériaux actifs, surtout dans le processus de décharge. L'une de celles-ci résulte de la formation d'un revêtement de sulfate non conducteur- sur les matériaux actifs ; une autre résulte de la diminution de conductibilité de l'électrolyte, due à la décroissance de la teneur en H₂SO₄ ; la diminution de porosité due au sulfate qui se forme dans les pores du matériau, et qui empêche par la suite la diffusion de H₂SO₄ en constitue une troisième. Ce dernier effet revêt une importance particulière pour des intensités élevées de courant, puisque, plus la densité de courant est grande, plus les réactions se concentrent à la surface des plaques. Il s'ensuit que le sulfate bouche les porosités présentes sur la surface, ce qui diminue la conductibilité et la diffusion à l'intérieur des plaques elles-mêmes [18].

I.10 Conclusion :

La définition électrochimique et les principales caractéristiques des accumulateurs au plomb acide ont été décrits dans ce chapitre. Le stockage de l'énergie électrique réside dans l'utilisation des générateurs électrochimiques, malgré les efforts déployés dans le but de mettre au point de nouveaux générateurs électrochimiques, L'accumulateur au plomb, découvert en 1860 par Planté, reste de nos jours le générateur le plus fiable, son fonctionnement est basé essentiellement sur la réduction de PbO₂ en PbSO₄.

Chapitre II :

Les batteries Plomb-Acide dans un système photovoltaïque

II.1 Introduction

La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi il faudra penser à stocker cette énergie pour la restituer pendant la nuit et les jours "sans soleil" et pour mieux adapter le générateur PV en fixant la tension du système. Dans le présent travail une étude théorique sur l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que le système de stockage de cette dernière à savoir le stockage électrochimique à l'aide de batteries d'accumulateurs sera présentée [9].

II.2 Energie photovoltaïque ^[19]

L'énergie photovoltaïque (PV) est le produit de la conversion directe du rayonnement solaire au moyen de piles solaires. Il s'agit de raccorder des modules solaires ensemble jusqu'à l'obtention de la puissance électrique désirée. Un générateur photovoltaïque peut générer quelques watts jusqu'à plusieurs centaines, voire de milliers de watts.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des trois technologies suivantes :

- Les cellules de silicium monocristallin ont la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans.
- Les cellules de silicium poly-cristallin possèdent les mêmes caractéristiques physiques, cependant elles ont une efficacité légèrement inférieure, soit de 12 à 15 %.
- Les cellules de silicium amorphe est la troisième technologie utilisée. Il s'agit de déposer le silicium sur un substrat (substance porteuse). L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10 %. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

Même si le prix a fléchi considérablement ces dernières années et qu'il diminue toujours, un système PV demeure encore très coûteux. Etant donné le coût initial plus élevé d'un système PV, il importe d'effectuer une soigneuse analyse de la charge électrique pour bien évaluer la capacité requise.

II.3 Autonomie :

C'est la durée pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur sans recevoir aucune charge de la part du photo-générateur. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photo-générateur. Le besoin en autonomie, dépend du type de récepteur et de son usage.

Pour une montre solaire, on peut décider de garantir un fonctionnement d'un mois dans l'obscurité (au-delà, il faudra la remettre à l'heure).

L'autonomie sans apport solaire sera donc de 30 jours. Pour une alimentation de haute sécurité en extérieur, on choisira de maintenir 15 jours de fonctionnement dans la batterie pour pallier une succession de journées mal ensoleillées (ce n'est qu'un exemple, cela dépend bien sûr du climat). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 15 jours.

Pour un usage domestique de week-end, on se contentera de 3 jours si c'est la durée maximale de séjour des occupants. L'autonomie sans apport solaire sera alors de 3 jours.

Pour une calculatrice, même si elle fonctionne au fil du soleil, il faut fournir un pic de courant au démarrage des circuits, on pourra alors mettre un condensateur qui se chargera hors des périodes d'utilisation et fournira ce courant plus élevé sur une très courte durée. Dans ce cas, l'autonomie sans apport solaire sera de quelques microsecondes

En général, pour un usage extérieur, la batterie doit faire fonctionner le système en cas de successions de journées mal ensoleillées.

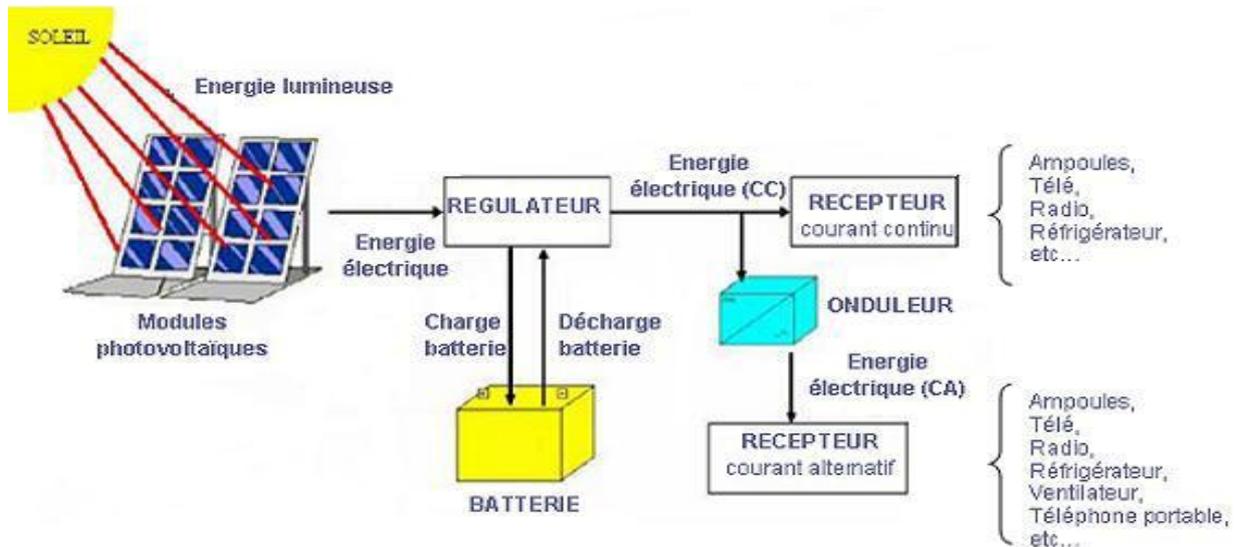


Figure (II.1) : Système photovoltaïque autonome [19].

II.4 Technologies d'accumulateurs :

Le choix de la technologie d'accumulateur va dépendre du coût d'investissement (en €/kWh et en €/kW) et de la durée de vie des batteries dans les conditions de fonctionnement correspondant à l'application choisie. Les coûts de chaque technologie sont présentés sur la figure (II.2) tandis que la durée de vie et les rendements sont illustrés sur la figure (II.3)

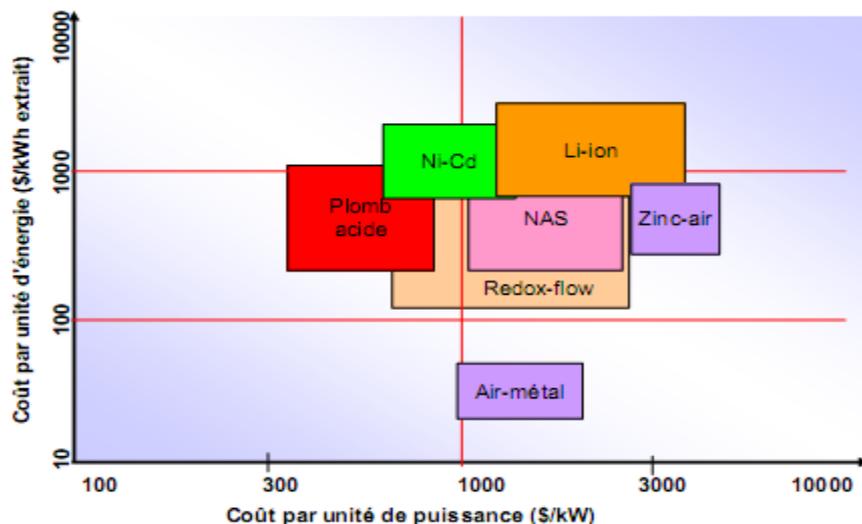


Figure (II.2) : Coûts des différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques

Chapitre II : Les batteries Plomb-Acide dans un système photovoltaïque

Les batteries de technologie Plomb-Acide sont actuellement les plus utilisées pour les applications photovoltaïques. Elles sont principalement avantagées par leurs faibles couts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées. La technologie Nickel-Cadmium (Ni-Cd) présente un cout plus élève que les batteries au Plomb, pour une durée de vie supérieure mais un rendement plus faible. Des efforts sont nécessaires pour faire du Ni-Cd une technologie concurrentielle pour l'application photovoltaïque. La technologie Lithium-ion (Li-ion) s'annonce comme la concurrente la plus prometteuse. Sa durée de vie et son rendement sont parmi les meilleurs des accumulateurs électrochimiques. Le cout est encore important par rapport à la technologie Plomb mais une baisse significative dans les prochaines années est attendue de sorte que le Li-ion devienne la technologie la plus intéressante pour les applications PV [17].

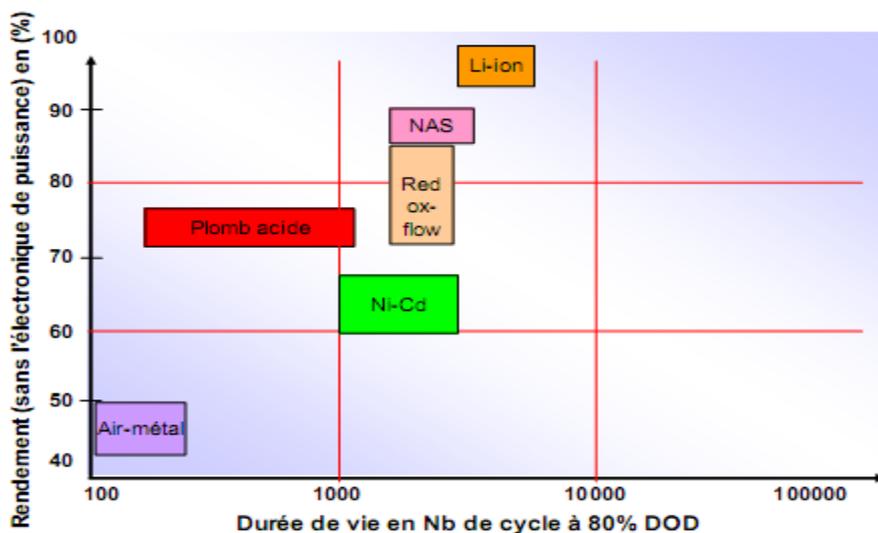


Figure (II.3) : Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries [24]

II.5 L'état de charge des batteries d'accumulateur ^[25]

L'état de charge est une entité dynamique qui dépend de plusieurs variables qui sont elles-mêmes dynamiques. Une batterie fonctionne grâce à une réaction chimique réversible dont les vitesses de réaction sont déterminées par les concentrations des liquides, porosité des bornes, la température ambiante, etc.

Chapitre II : Les batteries Plomb-Acide dans un système photovoltaïque

L'état de charge des batteries est évalué selon l'une ou l'autre des méthodes proposées, comptage par Coulomb ou l'algorithme de plusieurs paramètres, tels que la résistance interne, EMF et constantes de temps de récupération de tension après l'application d'impulsions de courant de décharge. Cette Méthode, comme bien d'autres, nécessite un éventail d'expériences et de calculs afin de déterminer des coefficients à remettre dans une ou plusieurs formules de la force électromotrice (FEM), selon l'état d'activité de la batterie.

II.6 La batterie dans un système photovoltaïque

II.6.1 Système photovoltaïque :

Un système photovoltaïque autonome se compose de quatre éléments :

- un champ de panneaux photovoltaïques
- un système de stockage de l'électricité
- un régulateur
- un onduleur (si la puissance est supérieure à 1kW)

L'énergie électrique est fournie par les panneaux photovoltaïques. Elle est ensuite dirigée vers le système de stockage ou vers l'utilisateur, directement ou via l'onduleur. Le régulateur permet de gérer les échanges d'énergie entre les panneaux photovoltaïques, le Système de stockage et l'utilisation.

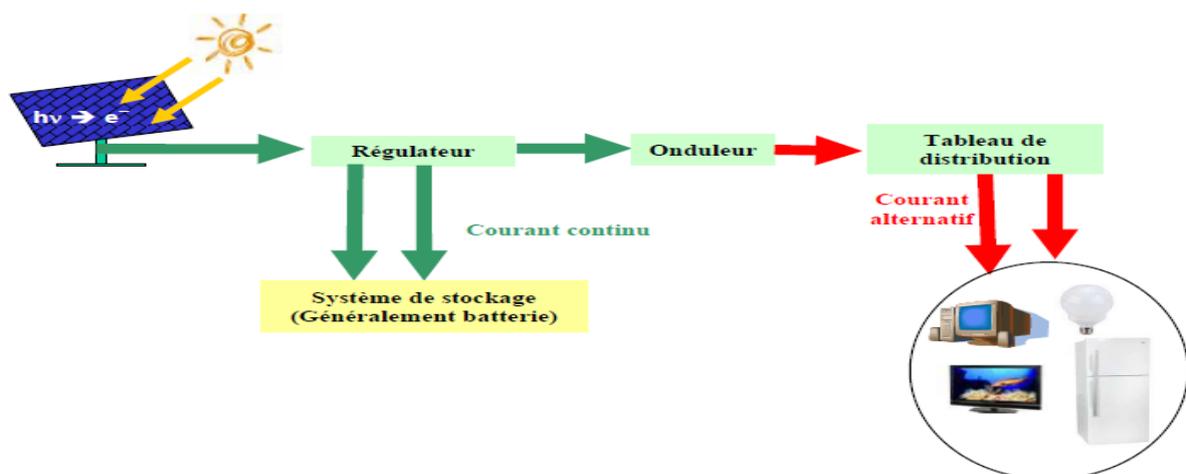


Figure (II.4) : Système PV

II.6.2 Conditions de fonctionnement des batteries dans les systèmes Photovoltaïques

Une étude des conditions de fonctionnement des batteries dans les systèmes photovoltaïques a été faite par Sauer et al. Dans [20]. Au cours de cette étude l'accent est mis sur les différentes exigences d'une batterie dans un système photovoltaïque : une bonne efficacité énergétique, une faible autodécharge, un faible coût, une faible maintenance et une bonne durée de vie. Sauer montre que les conditions photovoltaïques sont pénalisantes pour l'accumulateur.

Une comparaison de différentes technologies de batteries qui peuvent être utilisées dans les systèmes photovoltaïques a été aussi réalisée. Ces systèmes peuvent être classés en plusieurs catégories [21,22]. La compréhension de ces conditions et des dégradations engendrées est nécessaire pour pouvoir élaborer des stratégies de charge et décharge.

II.6.3 Conditions environnementales

Ces conditions consistent essentiellement en la température ambiante et l'humidité [23]. Des températures très faibles peuvent engendrer une solidification de l'électrolyte qui pourrait casser le bac et endommager la batterie. Des températures élevées accélèrent les phénomènes d'autodécharge et augmentent également la part des réactions parasites en fin de charge. Ceci peut engendrer une diminution de la durée de vie d'un facteur 2 pour une augmentation de la température de 7 à 10°C pour des températures supérieures à 40°C. En ce qui concerne l'humidité, elle augmente la corrosion des collecteurs de courant, ce qui augmente la résistance interne de la batterie et entraîne une recharge non optimale par un système photovoltaïque. Pour limiter l'influence des conditions environnementales, il est nécessaire d'installer la batterie dans un local adapté permettant d'éviter les températures extrêmes et l'humidité tout en permettant la dissipation de la chaleur.

II.6.4 Stockage, transport et maintenance

Un stockage de longue durée de la batterie avant son utilisation peut causer une forte autodécharge, en partie irréversible notamment au cours du transport, la batterie peut subir des chocs mécaniques qui engendrent une casse du bac ou une fuite de

Chapitre II : Les batteries Plomb-Acide dans un système photovoltaïque

l'électrolyte, ce qui entraîne en particulier la corrosion des connections extérieures. La maintenance concerne essentiellement les batteries ouvertes. Un manque de maintenance peut engendrer une diminution de la durée de vie de la batterie. Il s'agit essentiellement de la vérification du niveau de l'électrolyte et de son ajustement si nécessaire.

En effet, une inhomogénéité entre les cellules peut engendrer un comportement hétérogène qui influencerait la durée de vie de la batterie totale. Aussi, un niveau d'électrolyte trop bas peut conduire à un dénoyage des électrodes ce qui entraîne une formation de monoxyde de plomb en haut des électrodes négatives. De plus, quel que soit le type de la batterie, il faut vérifier régulièrement le serrage et la propreté des connections.

II.6.5 Contraintes opératoires

Un système photovoltaïque fournit un courant variable (Figure II.5) à la batterie ce qui peut engendrer des conditions extrêmes pour l'état de charge de la batterie. On a ainsi affaire à :

- Des décharges profondes et prolongées : la charge complète n'est possible qu'en cas de bonnes périodes d'ensoleillement. Ce faible état de charge peut aussi être accentué par une forte utilisation de la batterie à cause d'un trop grand nombre d'équipements et d'un profil de gestion de la décharge mal adapté.

- Des surcharges occasionnelles : une surcharge peut avoir lieu dans les périodes de bon ensoleillement ou pendant l'absence de l'utilisateur au cours de laquelle l'utilisation de l'énergie issue des panneaux diminue. Cette surcharge conduit au dégagement gazeux qui peut entraîner certaines dégradations si elle continue pendant de longues périodes.

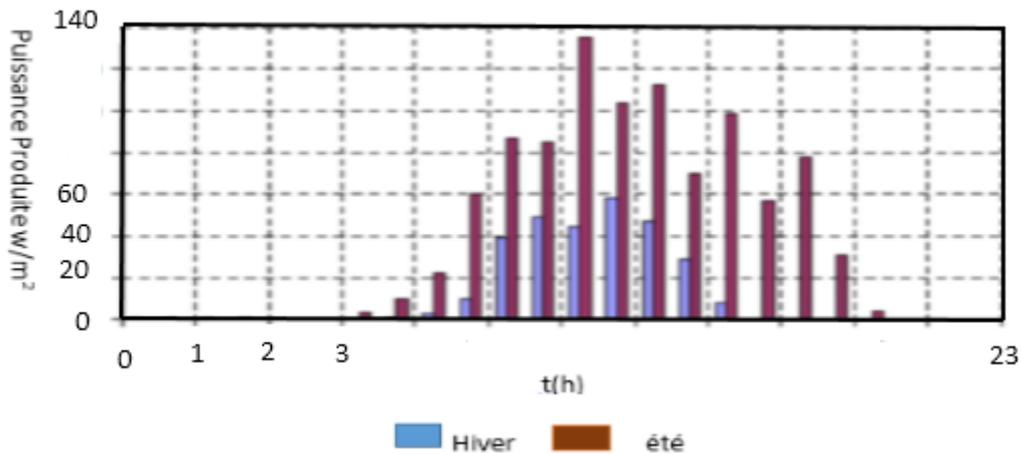


Figure (II.5) : exemple de production photovoltaïque pour deux journées types, données d'irradiation mesurées sur le site de Cadarache (13), rendement supposé des panneaux photovoltaïques 15%

Généralement la charge de la batterie dans les systèmes photovoltaïques est contrôlée par des régulateurs aussi appelés BMS (Battery Management System). Ces systèmes de contrôle permettent de protéger la batterie d'une forte surcharge ou d'une décharge très profonde et d'estimer son état de charge. Néanmoins, la plupart des méthodes utilisées ne sont pas bien optimisées et conduisent à une perte irréversible de la capacité qui est inférieure à celle en absence de gestion mais qui reste significative. Dans les systèmes photovoltaïques, les batteries subissent des cycles charge-décharge de fréquences différentes :

- Cycles de l'ordre de quelques secondes, quelques minutes ou quelques heures selon le profil de la source et celui de l'utilisation.
- Cycles journaliers dont l'amplitude dépend de l'énergie fournie par les panneaux et demandée par l'utilisateur et correspond au dimensionnement de la batterie.
- Cycles saisonniers dont l'amplitude dépend de la variation de l'ensoleillement moyen au cours de l'année.

Chapitre II : Les batteries Plomb-Acide dans un système photovoltaïque

La batterie est dimensionnée en tenant compte de la tension du système et de la consommation maximale de la charge, de l'autonomie nécessaire de la batterie (nombre de jours sans ensoleillement), de la profondeur de décharge (Depth Of Discharge, DOD) maximale autorisée. Ce dimensionnement peut ne pas être totalement fiable. Deux cas se présentent :

- La consommation estimée au départ est inférieure à la consommation réelle de l'utilisateur, on a régulièrement un faible état de charge et un cycle profond.
- Les panneaux photovoltaïques sont sous-dimensionnés par rapport à la batterie, dans ce cas la recharge d'une batterie complètement déchargée est très difficile.
- Dans les deux cas, on a une dégradation prématurée de la batterie.

II.7 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

II.7.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [26] :

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

II.7.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût très élevé.
- Faible rendement de conversion.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [15]

II.8 Conclusion :

Dans un système photovoltaïque, la caractérisation de l'équipement de stockage présente de grandes difficultés. La grande diversité des batteries et le nombre de paramètres qui interviennent font que l'on ne peut donner qu'une représentation empirique du comportement dynamique des batteries.

Les éléments au Plomb ont des caractéristiques énergétiques et de puissance moyennes. Ils ont une bonne durée de vie et une bonne fiabilité. En raison de leur coût relativement faible et de leur large disponibilité, ils sont les plus utilisés. Le but de cette étude est la connaissance précise des principaux indices et paramètres influençant le fonctionnement des batteries, en tant que réserve d'énergie pour les implantations solaires.

Chapitre III :

Modélisation des batteries Plomb-Acide

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

III.1 Introduction

La modélisation consiste à traduire les phénomènes qui se produisent dans des systèmes physiques par une représentation souvent mathématique. La modélisation des sources électrochimiques est intéressante pour plusieurs raisons. En effet, un modèle complet de la batterie permet de prédire son comportement dans certaines conditions de fonctionnement, d'adapter le type de batterie à l'application pour une utilisation optimale de l'énergie, de comprendre les dégradations dues à des conditions particulières de fonctionnement, d'interpréter l'influence de certains paramètres ou profils de charge ou décharge sur les performances de la batterie. D'une manière générale la modélisation permet de réduire l'effort expérimental et de gagner en temps, En énergie et en investissement.

Pour modéliser une batterie, selon les phénomènes à étudier, des modèles de fonctionnement ou des modèles de compréhension peuvent être privilégiés.

III.2 Aspects théoriques de la modélisation ^[28] :

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur du système de batterie. Il permet aussi de résoudre le choix de la taille du système à installer. L'étude de la modélisation du système de stockage électrique est considérée par plusieurs auteurs très complexes.

En effet, la littérature offre de nombreuses solutions, généralement des équations empiriques, et il est difficile souvent de les appliquer. La plupart des modèles proposés utilisent des grandeurs et des paramètres, dont les valeurs doivent être ajustées, particulièrement à chaque type de batterie. Ceci exige nécessairement des expériences coûteuses avant de concevoir un système, gênant ainsi l'utilisation répandue de ces modèles. Les conditions de fonctionnement produites par les systèmes photovoltaïques sont liées à l'état du système de stockage. A notre avis, un bon équilibre entre la précision et la simplicité est réalisé par l'utilisation d'un modèle généralement basé sur

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

l'observation du phénomène physico-chimique de la charge et de la décharge du système de stockage.

Le modèle mathématique donné par l'équation (1), décrivant au mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge est donné ci-après :

$$V = n.E \pm n.R.I \quad \text{(III.1)}$$

III.3 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. Jusqu'à maintenant, il existe plusieurs modèles de la charge de batterie qui ont été proposés.

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle qui permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur photovoltaïque et la charge demandée.

a-Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance de 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 [29] :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1-\sigma) + (P_{pv}(t) - P_L(t) / \eta_{inv}) \cdot \eta_{Bat} \quad \text{(III.2)}$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps

(t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_L est la charge demandée au temps t, η_{inv} et η_{Bat} sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement. Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65–0.85 selon le chargeant courant), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1

b- 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 [29] :

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_L(t) / \eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (\text{III.3})$$

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

$$C_{Bat\ min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat\ max} \quad (\text{III.4})$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{Bat\ max} = C_{Bat\ nom}$) et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD) [30] :

$$C_{Bat\ min} = DOD \cdot C_{Bat.N} \quad (\text{III.5})$$

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.

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si *DOD* prend les valeurs de 30-50% [31].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie. Elle peut être estimée par la relation suivante :

$$C_{Bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{déch} \cdot DOD} [Wh] \quad (\text{III.6})$$

$$C_{Bat} [Ah] = \frac{C_{Bat}}{V_b} [Wh] \quad (\text{III.7})$$

Avec :

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

N_a : Le nombre de jours d'autonomie

V_b : La tension du système

DOD : la profondeur de décharge

c- Tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Le schéma électrique de la batterie est représenté dans la figure (III.1) [32].

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

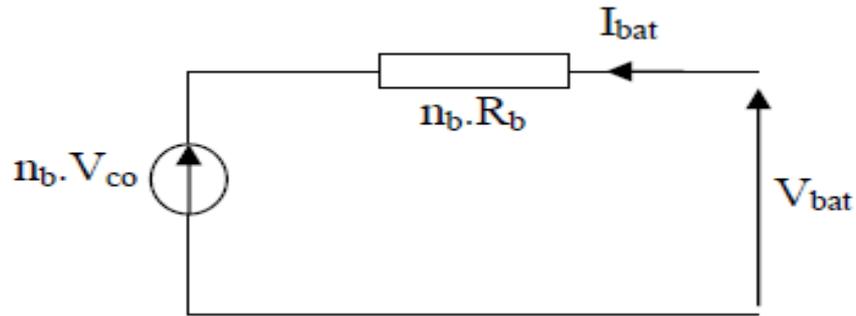


Figure (III.1) : Schéma électrique de batterie.

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

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (\text{III.8})$$

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

Tel que :

$$V_{co}(t) = V_F + b \cdot \log(\text{SOC}(t)) \quad (\text{III.9})$$

Où V_F est la force électromotrice ; b est un constant empirique. La variation de V_{co} en fonction de l'état de charge (SOC) est représentée par la figure suivante :

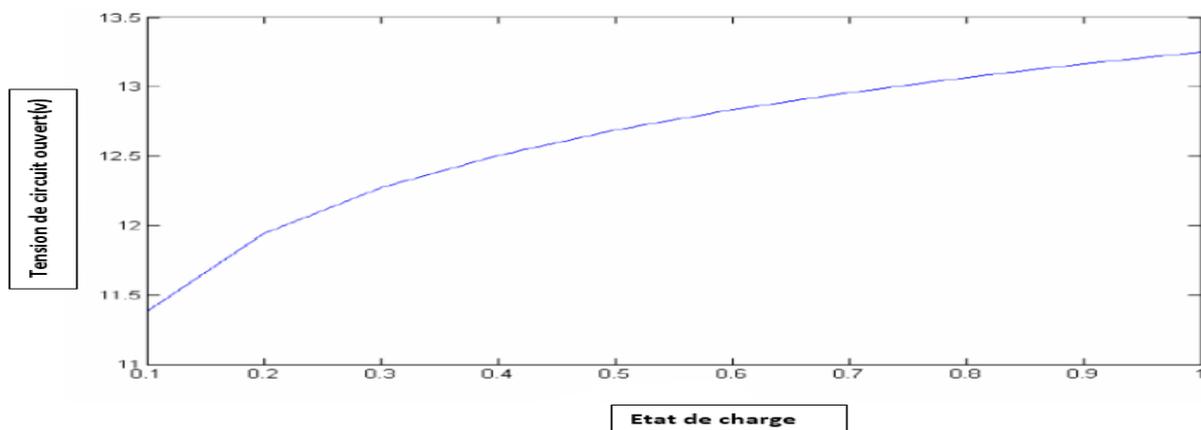


Figure (III.2) : Variation de tension en mode de charge en fonction de l'état de charge.

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

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

$$R_{bat}(t) = R_{\text{électrode}} + R_{\text{électrolyte}} \quad (\text{III.10})$$

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

$$R_{\text{électrode}} = r_1 + r_2 \cdot (\text{SOC}(t)) \text{ et } R_{\text{électrolyte}} = [r_3 - r_4(\text{SOC}(t))]^{-1} \quad (\text{III.11})$$

Où r_1, r_2, r_3 et r_4 sont des constantes empiriques, ces constantes ont des valeurs différentes pour le mode de charge et décharge. Pour une batterie de plomb acide, les paramètres sont regroupés dans le tableau suivant [32] :

Tableau (III.1) : Caractéristique d'une batterie Plomb-Acide.

Paramètres	Mode de charge	Mode de décharge
v_f	13.250 V	12.662 v
b	0.810	0.724
r_1	0.062 ohms	0.055ohms
r_2	0.046 ohms	-0.010 ohms
r_3	95.638 ohms ⁻¹	4.270 ohms ⁻¹
r_4	52.671ohms ⁻¹	-100.730 ohms ⁻¹

d- 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 :

$$I_{Bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{Bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} \quad (\text{III.12})$$

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

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{Bat}(t)} - \frac{P_{pv}}{V_{Bat}(t)} \quad (\text{III.13})$$

e- Rendement de la Batterie :

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

$$\eta_{bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{incid}} \quad (III.14)$$

En pratique, le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité de l'ordre de 100A/h. donc la puissance fournie par une batterie peut s'écrire comme suit :

$$P_{fourni} = \eta_{bat} \cdot P_{incid} \quad (P_{incid}: \text{Puissance du générateur}). \quad (III.15)$$

III.4 Extraction des cycles de fonctionnement par l'algorithme Rainflow :

La première utilisation de l'algorithme 'Rainflow' a été appliquée pour l'étude de la fatigue des matériaux. Le principe de cet algorithme est basé sur l'extraction des cycles effectués par la grandeur surveillée. Dans le domaine de la mécanique, la fatigue des matériaux est déterminée généralement à partir des cycles d'effort. Pour la durée de vie d'une batterie, l'utilisation du même algorithme sur l'état de charge de la batterie donne un résultat similaire. Il permet d'extraire le nombre de cycle du signal avec sa profondeur de décharge

Correspondante. Le résultat se présente sous la forme de la figure (III.3) (*DOD/Cycle*) en donnant la profondeur de décharge de chaque cycle extrait. Pour l'exemple choisi, 651 cycles ont été extraits. On remarque que pour chaque cycle, la profondeur de décharge est différente. Ce sont ces cycles de fonctionnement qui seront utilisés pour étudier le vieillissement de la batterie.

III.5 Modélisation du cycle de vie de la batterie ^[33] :

L'étude est basée sur les données du fabricant qui caractérise la durée de vie de la batterie par le nombre de cycles en fonction de la profondeur de décharge de chacun. Les types des batteries plomb-acide les plus utilisés pour les systèmes d'électrification hybrides sont : les batteries classiques stationnaires ouvertes et les batteries étanches VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Dans chaque classe, deux architectures internes différentes sont employées : une technologie à plaques planes et une autre à plaques tubulaires. Dans cette étude nous allons présenter les variations du nombre de cycles N_c en fonction des profondeurs de décharge DOD pour ces deux types de batteries. Pour cela, afin de tracer les courbes caractéristiques des batteries étudiées nous nous sommes basés sur des données de constructeurs.

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

Le tableau (III.2) présente les points donnés par le constructeur pour chaque type de batterie. La classe (ouverte ou à gel) n'a pas beaucoup d'influence sur la durée de vie, c'est plus la technologie de la forme des plaques qui a de l'importance. La forme tubulaire (BGEL3 et BS2) a une durée de vie meilleure que la forme plate, mais avec des courants de charge et de décharge plus limités que dans la technologie plane. Pour la suite, c'est la batterie type GEL-VRLA SOLAR (BGEL1) qui est prise comme exemple.

Tableau (III.2) : Nombre de cycle des batteries en fonction de la profondeur de décharge DOD.

DOD% N _c	20	30	40	60	80	90	100
BGEL1	4250	2750	2125	1375	1000	X	800
BGEL2	6250	4200	3200	2080	1500	X	1250
BGEL3	X	5800		2800	X	1800	1650
BS1	4500	3000	2250	1500	X	1000	900
BS2	8400	5500	4250	2800	X	1800	1700
BS3	6000	4000	3000	2000	1500	X	1200

Avec :

BGEL1 : Batterie à plaques planes de type GEL VRLA SOLAR ;

BGEL2 : Batterie à plaques planes de type GEL VRLA SOLAR Block ;

BGEL3 : Batterie à plaques tubulaires de type GEL VRLA A600 SOLAR ;

BS1 : Batterie stationnaire à plaques planes de type OPzS ;

BS2 : Batterie stationnaire à plaques tubulaires de type OPzS Solar-Cells ;

BS3 : Batterie stationnaire à plaques planes de type OPzS Solar-Blocks

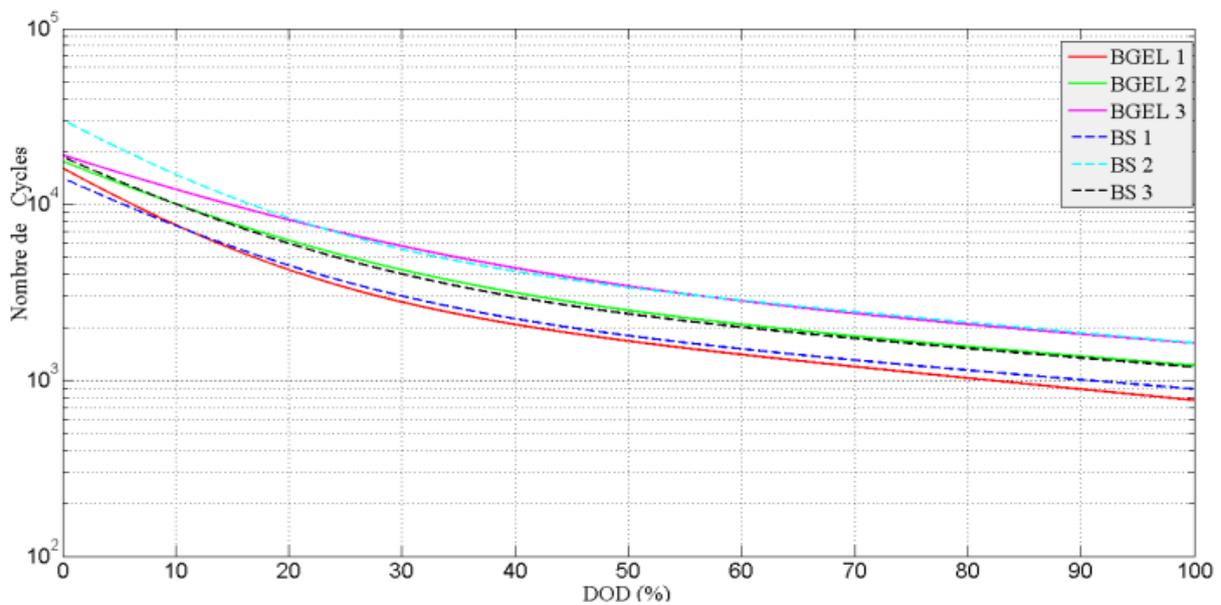


Figure (III.3) : Variation de nombre de cycle en fonction de DOD

III.6 Modélisation du vieillissement des batteries ^[33] :

Le vieillissement est défini à partir de la caractéristique du cycle de vie de la batterie ($N_c(DOD)$). Par exemple, un $DOD=100\%$ correspond à 770 cycles pour la durée de vie de la batterie. C'est à dire, le vieillissement pour un cycle avec un $DOD=100\%$ correspond à $1/770$ de vie. Ainsi, un taux de vieillissement par cycle se calcule en fonction du DOD ($TV/C(DOD)$) en étant l'inverse de ($N_c(DOD)$). La relation s'écrit sous la forme suivante :

$$TV / (DOD) = 1 / NC (DOD) \quad \text{(III.16)}$$

Pour exploiter cet outil, il est possible de tester l'influence du choix de la profondeur maximale dans la gestion de la batterie du système multi-sources. Plusieurs essais de simulation sont présentés dans le tableau (III.3). Pour une capacité de batterie constante égale à 220Ah, nous avons déterminé le taux de vieillissement correspond à chaque profondeur de décharge maximale. Dans la plage de variations de DOD [20% -

Chapitre III : Modélisation des batteries Plomb-Acide

70%], il n'y a qu'une faible influence (environ 10%) sur la durée de vie, liée à la faible augmentation du nombre de cycle obtenus par l'algorithme "Rainflow".

En plus, le simulateur dynamique donne le nombre de démarrage du groupe diesel. Par contre, pour cette donnée, la limite de la profondeur maximale de la batterie a une forte influence. Sur le vieillissement du groupe diesel. Ainsi, cet outil permettra de faire une optimisation du vieillissement de chaque élément du système multi-sources.

Tableau (III.3) : Taux de vieillissement pour plusieurs profondeurs de décharge avec une capacité $C=220$ Ah

DOD%	20	30	45	60	70
$T_{v(DOD)/an}(\%)$	9.28	9.52	9.83	9.96	10.30
Durée de vie (année)	10.8	10.5	10.17	10	9.7
Nombre de M/A du GD	195	79	40	26	21
Nombre de cycles	785	691	668	656	651

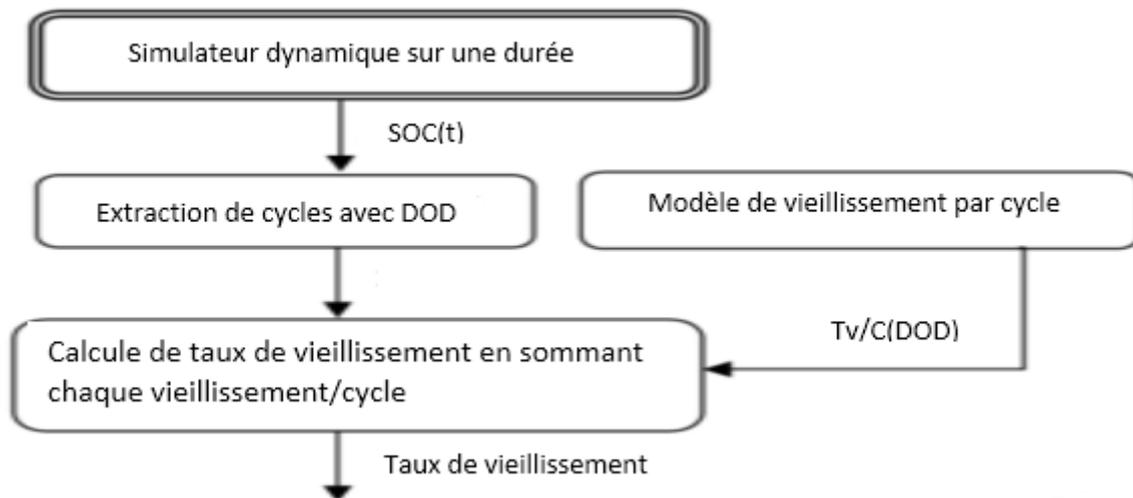


Figure (III.4) : Modèle de vieillissement de la batterie

III.7 Conclusion

Ce type de modélisation permet d'accéder à certains paramètres de fonctionnement de la batterie comme l'état de charge, l'état de santé, le potentiel. Cependant, elle ne donne aucun renseignement sur l'état de la matière active et ne permet pas de bien comprendre les phénomènes physico-chimiques mis en jeu. Or la connaissance de ces phénomènes permet de mieux comprendre le fonctionnement de la batterie et d'interpréter les améliorations dues à certaines stratégies de charge ou de décharge. Une approche de compréhension est donc nécessaire.

Chapitre IV :

Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système PV

IV.1 Introduction

L'une des principales préoccupations lors de la conception d'un système photovoltaïque est la détermination du meilleur rapport entre le nombre de modules photovoltaïque et le nombre de batteries de stockage et ce pour garantir une disponibilité de l'énergie dans toutes les conditions.

Afin de pouvoir modéliser les principales caractéristiques d'une batterie plomb-acide intégrée dans un système photovoltaïque, il est nécessaire d'abord de faire une étude de dimensionnement de toutes les composantes du système qui garantissent la stabilité du système dans toutes les conditions d'utilisation, et ce pour pouvoir ensuite modéliser chaque composante fonctionnant dans ces conditions de stabilité.

Dans ce chapitre nous commencerons par définir les principales étapes du dimensionnement d'un système photovoltaïque (panneaux PV, batteries,...), ensuite nous donnerons les principaux outils de modélisation de chaque composante du système. Enfin nous présenterons les principaux résultats de dimensionnement sur quelques sites Algériens, ainsi que les résultats de modélisation de quelques principaux paramètres d'une batterie Plomb-acide intégrée dans ces systèmes PV.

IV.2 Dimensionnement énergétique du système Photovoltaïque

Toute modélisation d'un système nous conduit à définir des critères prioritaires rendant compte du comportement du dit système. Ainsi, la volonté de faire ressortir le comportement d'un composant face à une sollicitation donnée nous a amené à privilégier tel ou tel aspect de ce composant lors de la modélisation, dans un soucis de simplification [35].

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, ceci constitue une étape cruciale lors de la mise en place du système. Il dépend :

- de l'ensoleillement sur le site au cours de l'année.
- de l'énergie requise par chaque récepteur alimenté.
- du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage.

IV.2.1 Dimensionnement du champ PV

Le système a été dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation, Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante :

$$P_c = \frac{B_j}{E_j \cdot \eta_b \cdot \eta_i} \quad (\text{IV.1})$$

IV.2.2 Autonomie du système

L'autonomie d'un système PV est la durée pendant laquelle peut fonctionner le système sans que les panneaux PV ne produisent de l'électricité. Cette autonomie est fixée par la taille des batteries et on devra tenir compte de quelques principes élémentaires lors du dimensionnement comme par exemple l'énergie consommée, la puissance moyenne... En effet, un sous-dimensionnement des batteries sera moins coûteux mais ces dernières seront exposées à de profondes décharges et donc à une durée de vie plus courte tandis qu'un surdimensionnement sera plus onéreux. Dans ce dernier cas, du fait du surdimensionnement, les batteries seront rarement complètement chargées avec pour conséquence des phénomènes de sulfatation et au final une durée de vie plus courte [36].

Nous voyons ainsi qu'un sous dimensionnement aussi bien qu'un surdimensionnement des batteries conduit au même résultat : la réduction de la durée de vie des batteries, d'où l'importance d'un dimensionnement optimal.

Le dimensionnement des batteries requiert donc une attention particulière afin d'augmenter la durée de vie de ces dernières et par la même occasion diminuer le coût global du système. Dans notre cas et afin de ne pas avoir un investissement trop coûteux en stockage, nous souhaitons obtenir une autonomie de 2 jours avec une profondeur de décharge de 60% pour des besoins journaliers de 3kWh. La capacité nominale des batteries est donnée par la relation suivante :

$$C_b = \frac{B_j \cdot \text{Aut}}{U_{bat} \cdot \eta_b \cdot D_b} \quad (\text{IV.2})$$

IV.3 Modélisation des composants du système

Il existe de nombreux modèles pour représenter les composants du système [35] ; nos choix se sont portés sur des modèles jugés adéquats à notre système, c'est-à-dire, permettant de tenir compte des interactions entre les différents éléments tout en donnant lieu à une modélisation simple du système global.

Il est alors évident qu'une demande importante en énergie augmentera la taille et le coût du système tandis que le choix de composants à haut rendement énergétique permettra de les réduire. D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- évaluation des besoins énergétiques.
- dimensionnement des panneaux PV.
- dimensionnement du stockage.
- dimensionnement des convertisseurs.

IV.3.1 Le générateur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série R_s mais aussi des courants de fuites modélisés par une Résistance parallèle R_p .

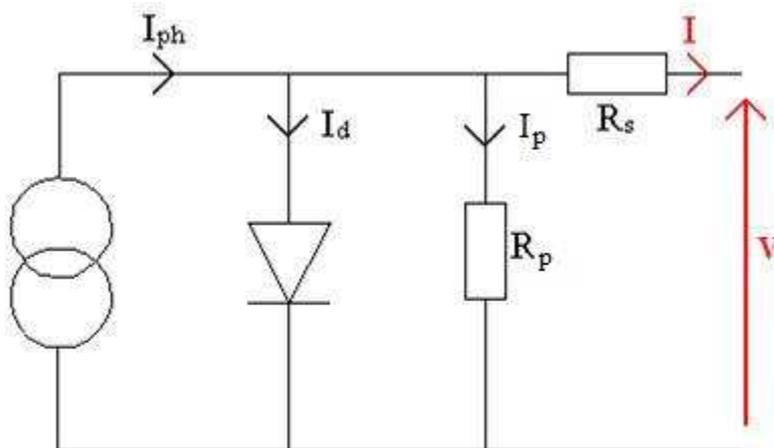


Figure (IV.1) : Modèle de la cellule PV

IV.3.2 Les convertisseurs d'énergie

Le système PV que nous voulons modéliser, comprend deux convertisseurs :

- un hacheur booste dédié à la conversion de l'énergie provenant des panneaux PV
- un convertisseur permettant d'adapter la tension du bus continu à celle de l'utilisateur.

Dans un souci de simplification, nous supposons que le convertisseur au niveau de l'utilisateur est parfait ; ceci nous permet de nous affranchir de ce convertisseur lors des simulations et d'appliquer ainsi directement une consigne en puissance au niveau du module de commande. Le convertisseur que nous allons décrire dans la suite est donc un hacheur élévateur de tension ou hacheur booste

D'après le cahier des charges, les panneaux PV fournissent une tension de 35V (deux panneaux en série) au point de puissance maximale, le hacheur boost a donc pour rôle d'élever la tension des panneaux à la valeur de la tension du bus continu qui est de 48V dans notre cas. Ce choix a été guidé d'une part par un aspect sécuritaire (basse tension en continu) et d'autre part par le souci de minimiser les pertes dans les convertisseurs en choisissant comme interrupteurs des transistors MOS et des diodes Schottky. Dans cette partie, nous considérons qu'un dispositif MPPT est intégré à la commande du hacheur et permet de maintenir la tension des panneaux PV à la tension V_{mpp} (tension au point de puissance maximale).

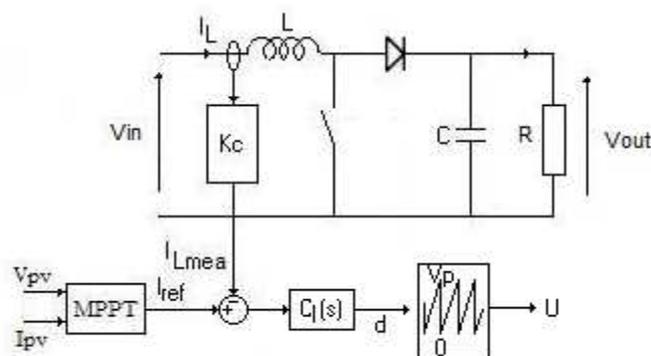


Figure (IV.2) : Hacheur boost avec sa commande

Chapitre IV: Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système PV

En mode de conduction continue, quand l'interrupteur S est fermé, la diode D ne voit passer aucun courant, V_{in} est alors appliqué à travers l'inductance L . Lorsque S s'ouvre, le courant accumulé dans l'inducteur passe par D en direction de la charge R , entraînant ainsi une tension de sortie V_{out} supérieure à la tension d'entrée. Les équations électriques du hacheur boost s'écrivent :

$$L \cdot \frac{dI_L}{dt} = V_{in} - (1-d) \cdot V_{out} \quad (\text{IV.3})$$

$$C \cdot \frac{dV_{out}}{dt} = (1-d) \cdot I_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (\text{IV.4})$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen D_0 . Son expression est donnée par l'équation (IV.5). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

$$V_{out-av} = \frac{V_{in-av}}{1-D_0} \quad (\text{IV.5})$$

Dimensionnement des composants à partir d'une tension d'entrée de 35V, nous souhaitons avoir en sortie une tension de 48V avec une puissance nominale de 1000W. La fréquence de commutation du convertisseur est de 20kHz. Le calcul des composants L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$D_0 = 1 - \frac{V_{in-av}}{V_{out-av}} \quad (\text{IV.6})$$

$$L = \frac{D_0 \cdot V_{in-av}}{F \cdot \Delta I} \quad (\text{IV.7})$$

$$C = \frac{D_0 \cdot I_{max}}{F \cdot \Delta V_{out}} \quad (\text{IV.8})$$

Avec : $\Delta I = 1A$ et $\Delta V_{out} = 0.1V$, les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie autour de leurs valeurs moyennes. Nous obtenons ainsi le tableau

Chapitre IV: Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système PV

récapitulatif suivant avec le rapport cyclique $D_0=28\%$ qui permet de passer de la tension des panneaux ($V_{in}=35V$) a la tension du bus continu ($V_{out}=48V$) :

Tableau (IV.1) : Récapitulatif des paramètres du système

$F(Khz)$	$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	$V_{out}(A)$	$I_{out}(A)$	$P(W)$	$L(H)$	$C(F)$
20	35	29.4	48	20.83	1000	4.95E-4	4.2E-3

IV.3.3 Le dispositif de stockage

Il existe plusieurs modèles de batterie au Plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances.

Notre choix s'est porté sur deux modèles : le modèle dit « CIEMAT » (Research Center for Energy, Environment and Technology, Espagne) relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, le modèle R-C, utilise lors des simulations avec des pas de temps très petits (de l'ordre de $10^{-6}s$ pour permettre de tenir compte de la fréquence de « hachage » des convertisseurs).

Le modèle « CIEMAT »

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Figure IV.3) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

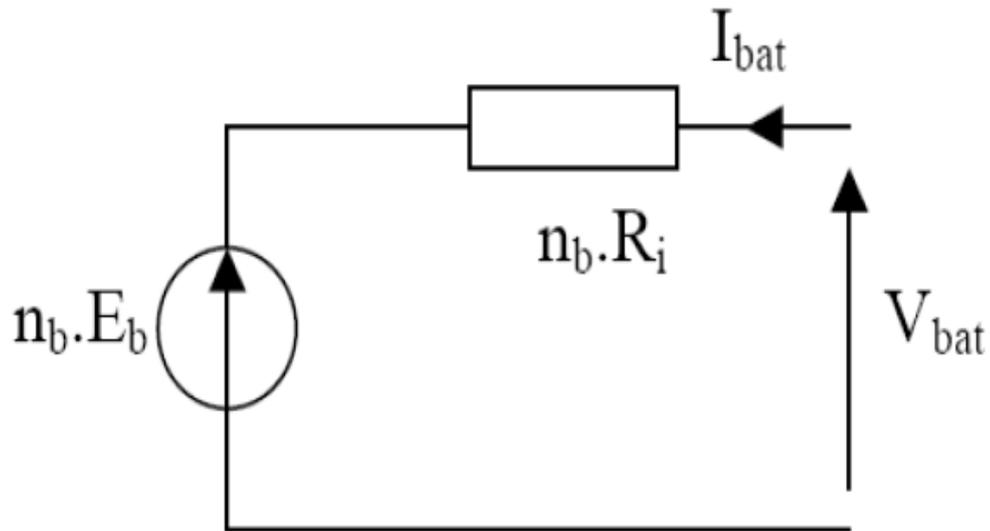


Figure (IV.3) : Schéma équivalent de n_b éléments en série [37]

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène).

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} \quad \text{(IV.9)}$$

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi, nous proposons le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge, elle est donnée par l'équation (IV-10).

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1,67}{1+0,67\left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0,9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad \text{(IV.10)}$$

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement à C_{10} (C_{10} est la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant I_{10} durant 10h: $C_{10} = 10.I_{10}$), dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

Chapitre IV: Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système PV

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (IV.11)$$

Avec C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (IV.12)$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [37] :

✓ Tension en décharge :

$$V_{bat-d} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0,02 \right) (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (IV.13)$$

✓ Tension en charge :

$$V_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (IV.14)$$

IV.4 Résultats du dimensionnement

IV.4.1 Système photovoltaïque

Le Tableau (IV.2), représente le nombre de modules nécessaires pour notre utilisation.

Chapitre IV: Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système PV

Tableau (IV.2) : Détermination du nombre total des modules

Mois/Site	Adrar	Ghardaïa	Bouzaréah	Batna	Eloued	Tamanrasset
Janvier	28	36	36	56	36	24
Février	24	32	36	64	36	24
Mars	24	28	28	40	28	24
Avril	24	20	24	32	24	20
Mai	20	20	20	28	20	28
juin	20	20	16	20	16	28
juillet	20	16	16	16	16	20
Aout	24	20	20	20	20	24
Septembre	24	24	20	24	20	32
Octobre	24	28	28	36	28	28
Novembre	24	36	32	52	32	24
Décembre	32	32	40	64	36	24

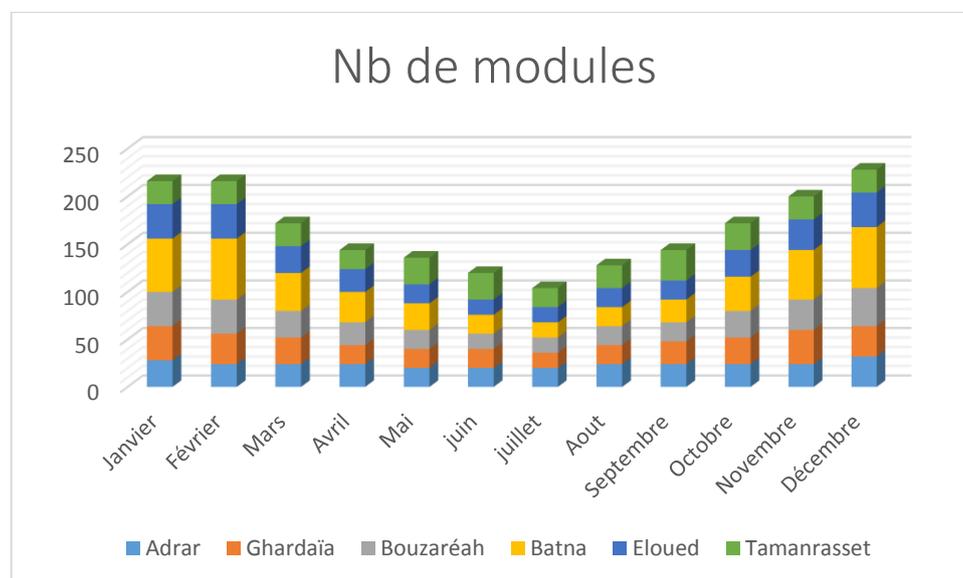


Figure (IV.2) : Nombre totale de modules

IV.4.2 Système de stockage

Pour une autonomie de trois jours, et pour tous les sites, le nombre de batteries de stockage pour chaque mois est donné par le Tableau (IV.3).

Tableau (IV.3) : Détermination du nombre de batteries

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
Nb bat	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4

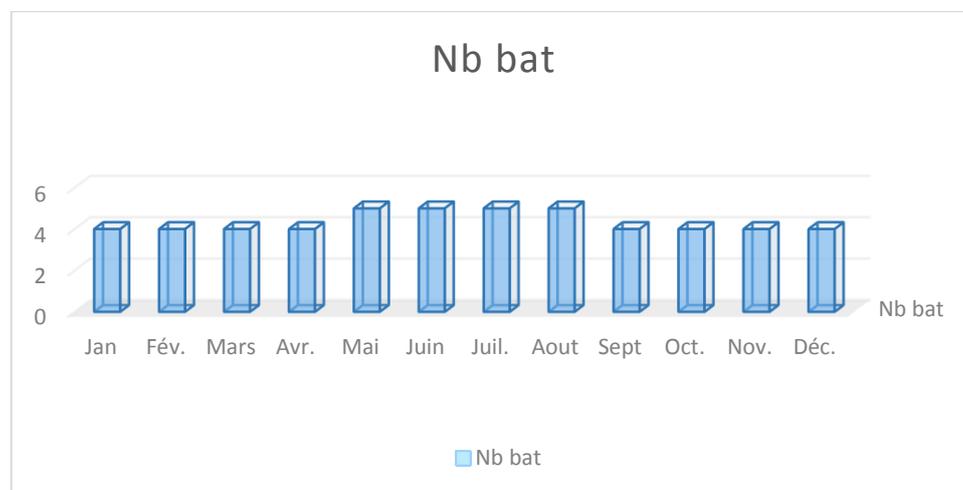


Figure (IV.5) : Nombre de batteries utilisées

IV.5 Simulation sur MATLAB/ Simulink

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Dans ce chapitre, on utilise Matlab (version 7.12) pour simuler une Batterie Pb-acide.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Les simulations sont effectuées pour étudier l'influence des paramètres et de leur variation sur le comportement du système de stockage tampon.

IV.5.1 Capacité

IV.5.1.1 Influence de la température

La température de la batterie influence énormément sur le comportement des caractéristiques de fonctionnement de base du système de stockage et en particulier sur sa capacité de stockage.

La figure (IV.6) montre que l'augmentation de la température est accompagnée d'une remontée de la capacité de stockage des batteries.

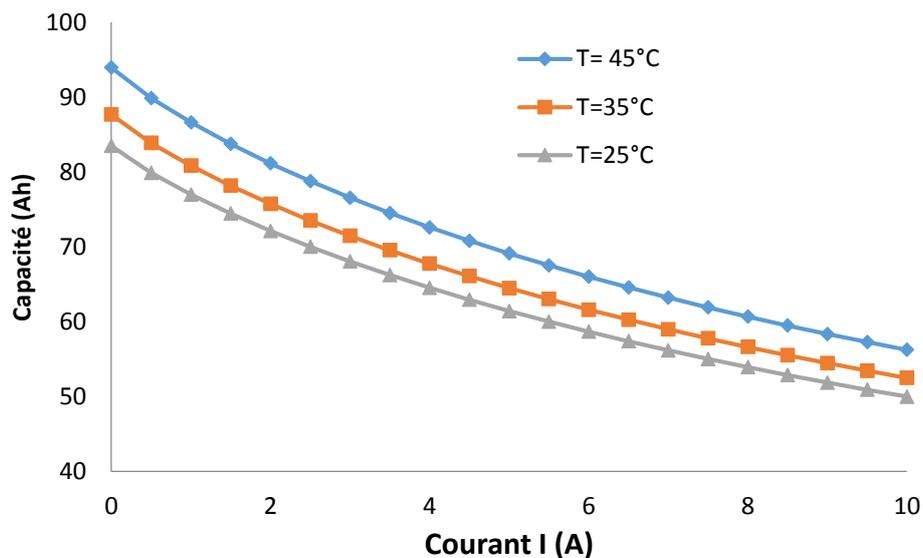


Figure (IV.6) : Influence de la température sur la capacité

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.

IV.5.1.2 Influence du DOD

La profondeur de décharge représente le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge. Cependant, plus la décharge est grande plus la durée de vie est réduite, et le rendement énergétique de la batterie diminue.

$$C_b = \frac{B_j \cdot A_{ut}}{U_{bat} \cdot \eta_b \cdot D_b} \quad (IV.15)$$

C_b : La capacité nominale des batteries [Ah]

Chapitre IV: Modélisation d'une batterie Plomb-Acide dans un système PV

B_j : Les besoins énergétiques journaliers [Wh]

Aut : le nombre de jour d'autonomie

U_{bat} : La tension nominale des batteries [V]

η_b : Le rendement énergétique des batteries

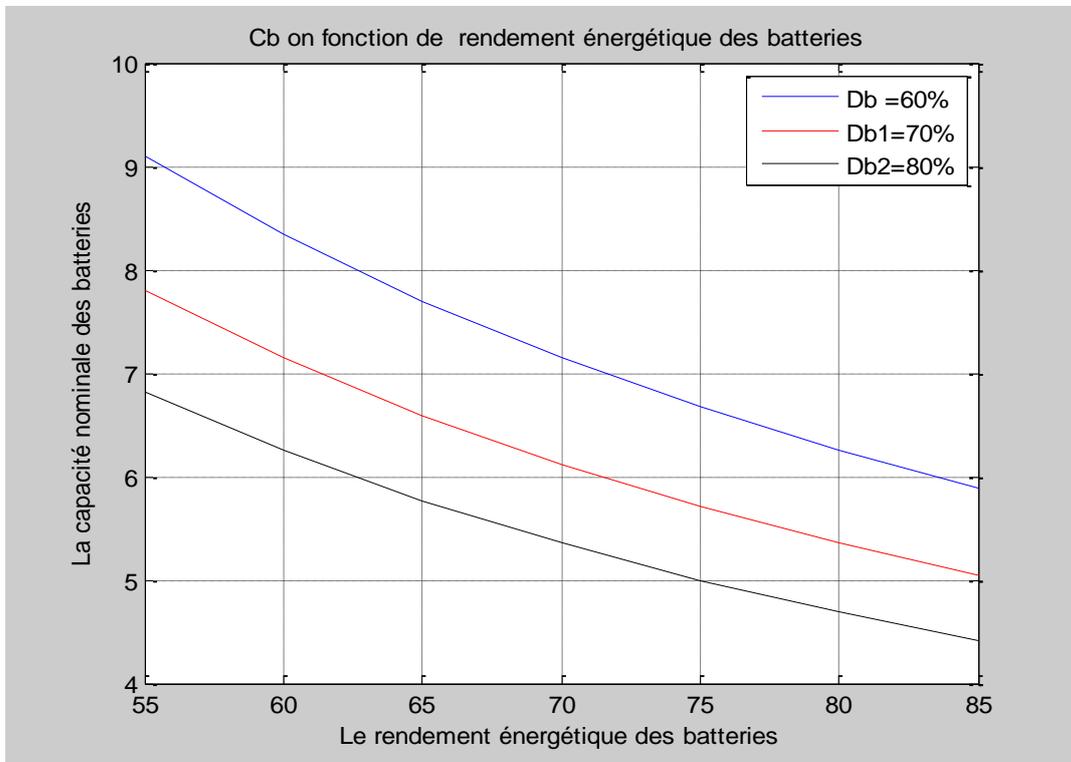


Figure (IV.7) : Influence de la profondeur de décharge sur la capacité nominale des batteries

IV.5.1.3 Influence du besoin énergétique B_j

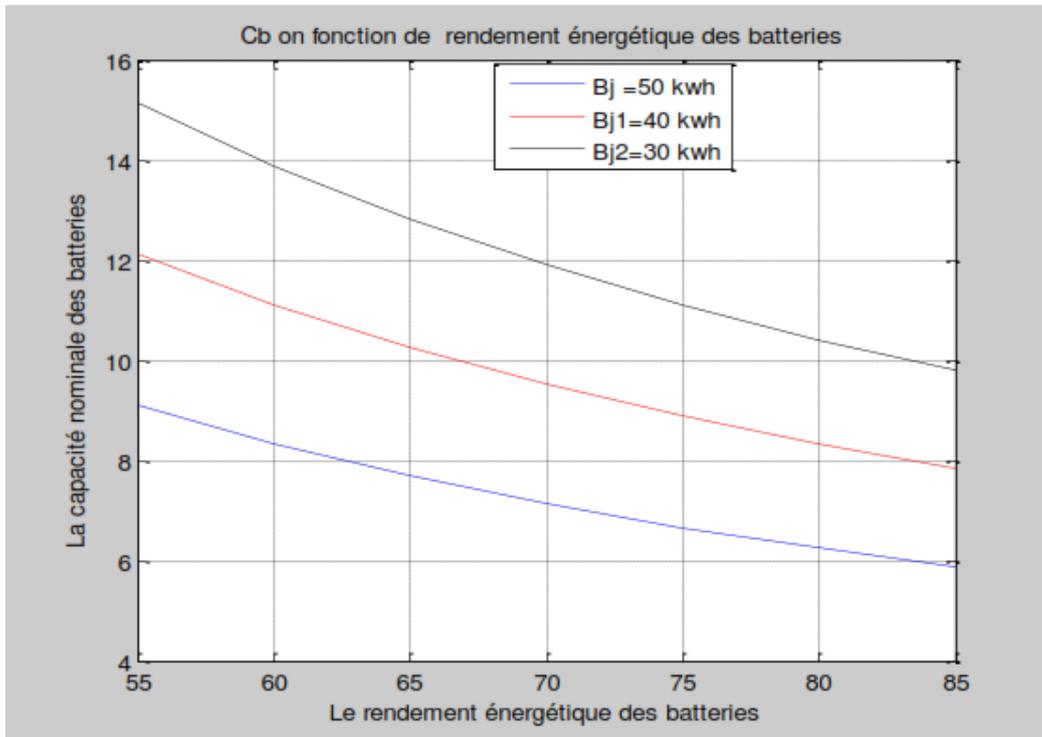


Figure (IV.8) : Influence de besoin énergétique sur la capacité de batterie

Les besoins énergétiques influencent la capacité de stockage, car quand la consommation augmente, la capacité de batterie diminue au cours de temps.

IV.5.2 Etat de charge de batterie

IV.5.2.1 Influence du temps sur l'état de charge

La profondeur de décharge, exprimée par l'équation, est donnée sous la forme $SOC = 1 - DOD$, C'est le complément de l'état de charge

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C} \quad (\text{IV.16})$$

L'évolution temporelle de 'Q' dépend du mode de fonctionnement de la batterie.

Pour étudier l'influence du temps, on cherche à s'approcher à une gestion proche en temps réel, de l'état de charge de la batterie, qui à son tour est déterminant pour l'exploitation efficace du système de stockage.

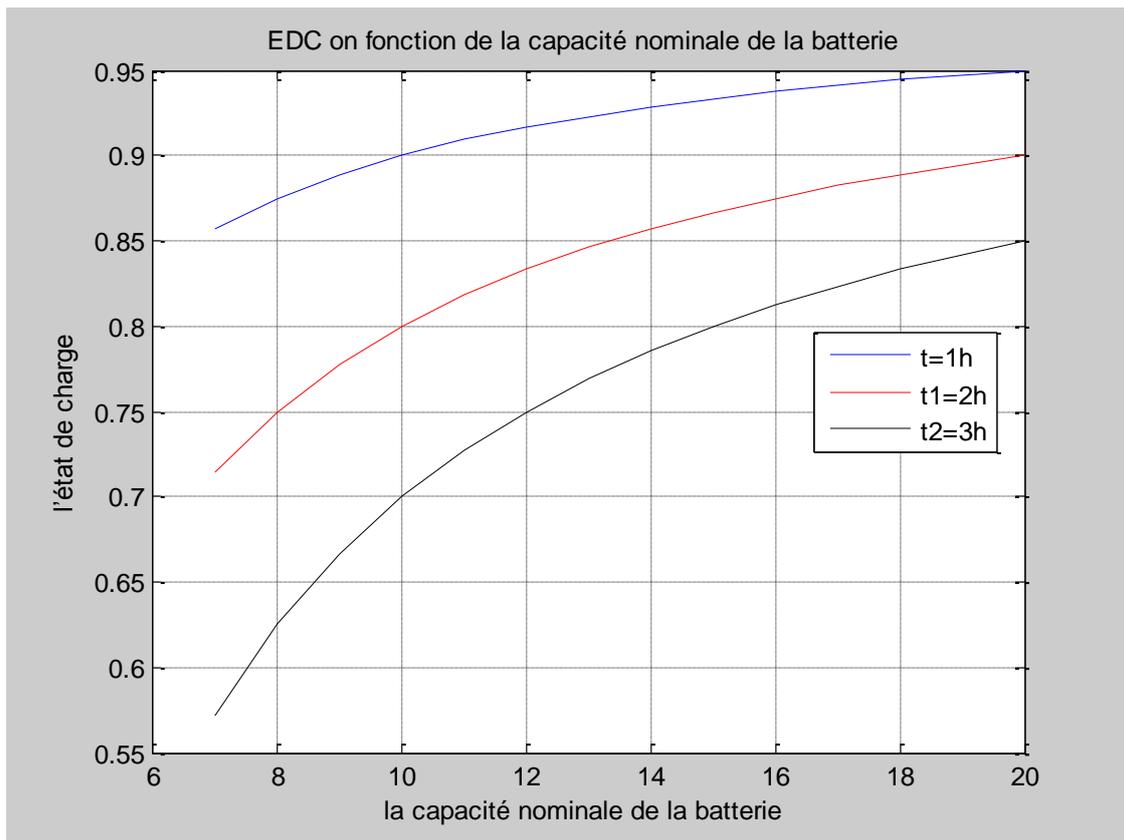


Figure (IV.9) : Influence du temps sur l'état de charge d'une batterie

Nous constatons que plus le temps passe, plus l'état de charge se détériore, donc pour bien dimensionner le système, on peut prévoir qu'au bout d'un certain nombre d'heure d'utilisation en décharge, pour avoir toujours un état de charge supérieur à la profondeur de décharge, il suffit de choisir la bonne capacité nominale du système de stockage, qui correspond à un nombre précis de batteries.

IV.5.2.2 Influence de la température sur l'état de charge

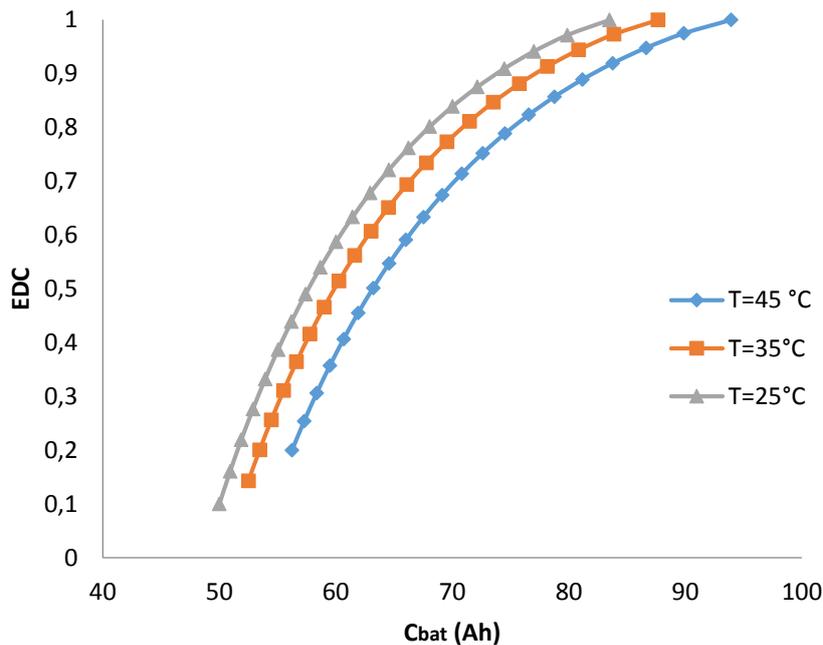


Figure (IV.10) : Influence de la température sur l'état de charge

Dans la figure (IV-10) nous avons tracé l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures. Nous remarquons que l'augmentation de la température a pour effet de diminuer l'état de charge, ce qui veut dire qu'une batterie soumise à une haute température a tendance à se charger moins rapidement qu'une autre à basse température.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le problème du dimensionnement d'une installation photovoltaïque avec des batteries plomb-acide. Le dimensionnement des batteries nécessite la connaissance de l'évolution de l'état de charge en fonction des conditions d'utilisation du système. Les outils de modélisation des composantes du système ont été présentés. La batterie Plomb-acide a été modélisée avec le modèle CIEMAT, où nous avons pu dégager quelques informations utiles sur la capacité ainsi que sur l'état de charge de la batterie en fonction de quelques paramètres, comme la température, le temps de charge, la profondeur de décharge et le besoin énergétique, et ce dans le but d'avoir toutes les informations utiles pour le bon dimensionnement du système de stockage.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Pour un usage en site isolé, le photovoltaïque, comme pour toute autre énergie intermittente, nécessite un système de stockage électrique permettant de restituer l'énergie à la demande. Les batteries au Plomb, en raison de leur faible coût et de leur simplicité de mise en œuvre, sont pour l'instant les plus utilisées. Prolonger leur durée de vie, en étudiant les mécanismes de corrosion et de vieillissement, rechercher des voies nouvelles de stockage font partie des principaux axes de recherche.

Dans ce mémoire, nous avons fait une modélisation de la batterie Plomb-Acide intégrée à un système photovoltaïque. Pour cela nous avons divisé ce mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons vu les généralités et les principes de fonctionnement des batteries Plomb-Acide, ainsi que les paramètres qui les caractérisent.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu comment une batterie Plomb-Acide est intégrée dans un système photovoltaïque, et pourquoi cette batterie est toujours le meilleur choix dans ce type d'applications. Le dimensionnement de la batterie dépend de la puissance délivrée par le panneau, ainsi que de la puissance de la charge d'utilisation, mais aussi de pleins d'autres paramètres internes et externes au système PV.

Dans le troisième chapitre, nous avons vu les différentes approches théoriques disponibles pour modéliser une batterie, où nous avons vu le modèle de la charge, de la décharge, de la tension, du courant et du rendement de la batterie. Ces modèles permettent de tirer une grande partie des informations utiles pour le bon dimensionnement d'une batterie dans un système. Aussi, nous avons vu comment extraire les cycles de fonctionnement d'une batterie pour pouvoir modéliser le cycle de vie ainsi que le vieillissement d'une batterie.

Enfin dans le quatrième chapitre, nous avons abordé le problème du dimensionnement d'une installation photovoltaïque avec des batteries plomb-acide. Le dimensionnement des batteries nécessite la connaissance de l'évolution de l'état de charge en fonction des conditions d'utilisation du système. Les outils de modélisation des composants du système ont été présentés. La batterie Plomb-acide a été modélisée avec le modèle CIEMAT, où nous avons pu dégager quelques informations

Conclusion Générale

utiles sur la capacité ainsi que sur l'état de charge de la batterie en fonction de quelques paramètres, comme la température, le temps de charge, la profondeur de décharge et le besoin énergétique, et ce dans le but d'avoir toutes les informations utiles pour le bon dimensionnement du système de stockage.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Olivier caumont, « détermination de l'état de charge d'une batterie plomb acide en utilisation véhicule électrique » Thèse de Doctorat Spécialité : génie électrique soutenue le 20 Novembre 1997.
- [2] Belhadj Mohammed, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister, Centre Universitaire De Bechar (2008).
- [3] xu xiaoxi « modélisation et analyse du fonctionnement d'un système de stockage intégré au réseau électrique » mémoire de maîtrise ès sciences appliquées-génie industriel, (2013).
- [4] Fanny STORCK épouse GANTOIS , « effet de la compression et de l'ajout d'additif sur l'amélioration des performances d'un accumulateur au plomb » Thèse de doctorat *de l'université pierre et marie curie /*
- [5] P. Izzo, thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, (2002)
- [6] F. Zaninotto, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, (1998)
- [7] N. Achaïbou, « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque » Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 1-6
- [8] E. Razelli, "Prospects for lead–acid batteries in the new millenium", Journal of Power Sources, 116 (2003) pp. 2-3
- [9] X. Muneret, P. Lenain, "Évolution des batteries au plomb acide de technologies avancées pour les applications stationnaires d'aujourd'hui et de demain", Colloque Gaston Planté (30 et 31 octobre 2000).
- [10] R. Kubis, "Market for lead (Pb) batteries in Europe – current situation and prospects", Journal of Power Sources, (2003).
- [11] N. Achaïbou, A Malek, N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [12] W. Merrouche, H. Tebibel et A. Malek , « Développement sous Proteus® d'un régulateur basé sur un algorithme de charge efficace et sécurisée pour batteries au plomb dans un système photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa (2012) 175–186.

Références Bibliographiques

- [13] I. Tsuda, K. Kurokawa, K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic System with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp. 503 –508, (1994).
- [14] A. Zerga, F. Benyarou et B. Benyoucef « Optimisation du rendement d'une cellule Solaire NP au silicium monocristallin »Rev .Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [15] D.Thévenard, and M.Ross « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, (2003).
- [16] Dirk Uwe Sauer, «Electrochemical Storage for Photovoltaics», Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, (2004).
- [17] Julien Labbé, « hydrogène : L'électrolytique comme moyen de stockage D'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés», thèse de doctorat à l'école des mines de paris (2006)
- [18] Bendjamâa Ibrahim., « *Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque* » / Magister Université Abou-Bakr Belkaid–Tlemcen.
- [19] N. Achaïbou, « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque » Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 1-6
- [20] D.U. Sauer, A. Jossen, J. Garche, *Solar Energy* 76 (2004) 759
- [21] F. Mattera, “*Etude des modes de vieillissement des accumulateurs au plomb utilisés dans les systèmes photovoltaïques*”, thèse INPG, (1999)
- [22] F. Mattera, “*WP2 Characterisation of ageing effects from batteries after field operation in PV Systems*”, rapport technique DSEN/2004-067
- [23] R. Khezzer et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, (2010).

Références Bibliographiques

- [24] « Technologies and comparions », Energy Storage Association, <http://electricitystorage.org/>, (2007).
- [25] Jacques marchildon, « Détermination de l'état de charge et l'état de santé d'une batterie plomb acide par la méthode de deux impulsions », mémoire ing. Msc. université du québec à trois-rivières (2014)
- [26] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». *Revue des Energie Renouvelables* Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [27] Fathia Karoui, « Optimisation de strat_egies de gestion des batteries au plomb utilisées dans les systèmes photovoltaïques ». *Electric power*. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, (2007). French. <tel-00723068>
- [28] A. Ould Mohamed Yahya , A. Ould Mahmoud et I. Youm, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.
- [29] The Bogdan, S.B., Salameh, Z.M., « Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system ». *IEEE Transactions on Energy Conversion* 11 (2), 367–375, (1996).
- [30] M.Chikh, « Étude analytique conceptuelle des systèmes PV de puissance adopté au sites isolés de L'Algérie », thèse de magister, CDER, (1994).
- [31] Bin, A., Hongxing, Y., Shen, H., Xianbo, L., «Computer aided design for PV/Wind hybrid system ». *Renewable Energy* 28, 1491–1512, (2003).
- [32] Chaurey, C and S Deambi., « Battery storage Power systems: an overview ». *Renewable Energy* 2 (3):227-235, (1992).
- [33] Toufik Madani LAYADI, Gérard Champenois, « Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources ». *Symposium de Génie _Electrique*, Cachan, France, (Jul 2014),. <hal-01065201>

Références Bibliographiques

- [34] C. Lishou, « Etude, Modélisation et Simulation en temps réel de systèmes photovoltaïques à stockage d'énergie. Application à la Sûreté de Fonctionnement de centrales solaires hybrides. » Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheik Anta Diop de Dakar, (1998).
- [35] A. T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique (2010).
- [36] J. Schiffer , D. U. Sauer , H. Bindner , T. Cronin, P. Lundsager, R. Kaiser, “Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems” *Journal of Power Sources* n°168 (2007), pp. 66–78.
- [37] O. Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur”, Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, (2002).
- [38] D. Saheb, Koussa et M. Belhamel, « Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien – photovoltaïque - diesel) de production d'électricité sans interruption » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°1 (2008) 137 – 151

Résumé

La modélisation des mécanismes physico-chimique se déroulant à l'intérieur d'une batterie sont d'une complexité telle que plusieurs approches s'affrontent pour minimiser cette complexité et prédire le plus fidèlement l'état de charge au temps t dans les conditions d'utilisation de la batterie et en prenant en compte leur effets de vieillissement.

Dans cette étude, nous limiterons notre modélisation à une batterie plomb-acide intégré à un système photovoltaïque autonome. La connaissance de l'état de charge en fonction des paramètres internes de la batterie (micro/nanostructure des électrodes,), du paramètre de vieillissement, et des paramètres externes du système (ensoleillement, température,...) nous permettra de mieux optimiser le système pour une autonomie assurée dans toutes les conditions.

Mots clés : La modélisation, l'état de charge, effets de vieillissement, batterie plomb-acide

Abstract

The modeling of physical-chemical mechanisms occurring inside of a battery are of such complexity that confront several approaches to minimize this complexity and predict more accurately the state of charge at time t in the conditions use of the battery and taking into account their aging effects.

In this study, we will limit our modeling to integrated lead acid battery to a standalone photovoltaic system. The knowledge of the state of charge based on internal battery parameters (micro / Nano-electrode structure,), the aging parameter, and external parameters of the system (sunshine, temperature,) allow us to better optimize the system for autonomy ensured in all conditions.

Key words: The modeling, the state of charge, aging effects, lead acid battery

ملخص

نماذج من الآليات الفيزيائية والكيميائية التي تحدث داخل البطارية وهذا التعقيد الذي يواجه العديد من الطرق للحد منه والتنبؤ بدقة أحسن حالة للشحن في وقت تي في ظروف استخدام البطارية، مع مراعاة آثار عامل التقادم. في هذه الدراسة، فإننا سوف نلخص من نمذجة بطارية الرصاص الحمضية إلى نظام ضوئي مستقل. مع معرفة حالة الشحن استنادا إلى معايير داخلية البطارية (الهيكل الصغير / نانو الكهربيائي، ...)، الاقدمية، والمحددات الخارجية للنظام (أشعة الشمس، ودرجة الحرارة، ...) تسمح لنا بتحقيق أفضل نظام للتحكم الذاتي في جميع الأحوال.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، حالة الشحن، عامل التقادم، بطارية الرصاص الحمضية