

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : **Électrotechnique**
Spécialité : **Énergie et environnement**

Présenté par :
Meziani Mohamed Fares
Slimani Oualid

**Gestion de charge/décharge avec mesures de
protection d'un banc de batteries dans un
système photovoltaïque relié au réseau**

Soutenu publiquement, le 03 / 07 /2022, devant le jury composé de :

Mme I. Bousmaha	MCB	ESSA Tlemcen	Présidente
Mr. M. Mebrouki	MCA	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr A. Kerboua	MCB	ESSA Tlemcen	Examineur
Mr La. Merad	Pr.	Univ. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022



Abréviations

1. SGB : Système de gestion de batteries (BMS : battery management system en anglais)
2. PDD : Profondeur de décharge (DOD en anglais)
3. EDC : État de charge (SOC, en anglais)
4. EDS : État de santé (SOH, en anglais)
5. TDT : temps de décharge totale (full discharge time en anglais)
6. MPPT : Maximum power point tracker (trackeur de point de puissance maximale)

Résumé

Dans ce mémoire, un système de génération photovoltaïque d'électricité avec un système de stockage (batteries) relié au réseau électrique est étudié. L'étude est consacrée à la gestion intelligente du système de stockage de l'électricité dans le cycle de charge/décharge. Cette gestion intelligente consiste à déterminer la différence entre la production en électricité et la consommation prévue, l'état initial et l'état en fonction du temps du stockage électrochimique et de veiller à la protection des batteries contre toutes sortes de risques. Le type de stratégie à appliquer est dictée par les valeurs de certains paramètres pertinents. Deux stratégies de gestion sont mises à l'oeuvre : La première se concentre sur l'écèlement des pics de consommation au cas où la puissance photovoltaïque n'arrive pas à satisfaire la charge ; la deuxième stratégie est appliquée en cas où la puissance photovoltaïque est absente (pendant la nuit), le système de gestion offre des profils de décharge selon le temps et sert à prolonger l'espérance de vie de l'ensemble des batteries en limitant la charge et la décharge tout empêchant la surcharge et la décharge profonde. la bonne gestion de notre système donne la chance à vendre le surplus en électricité produite par le générateur PV au réseau électrique.

Abstract

In this thesis, a photovoltaic electricity generation system with battery storage connected to the grid is studied. The study is devoted to an intelligent management of the electricity storage system in the charge/discharge cycle. This intelligent management consists in determining : the difference between the electricity production and the expected consumption. The initial state and the state of charge as a function of time of the electrochemical storage and the protection of the latter from all kind of risks are the main task of this procedure. After that, the management calculates parameters to choose a management strategy, or decide that the storage system does not need intelligent management. There are two strategies to choose : the first one focuses on peak shaving in case the photovoltaic power fails to meet the load, the second strategy is applied if the photovoltaic power is absent (at night, for example). The management system offers time-dependent discharge profiles and serves to extend the life expectancy of the battery pack by limiting the charge and discharge and preventing the overcharge and deep discharge. A good organization of our system gives the chance to sell the surplus electricity produced by the PV generator to the power grid.

ملخص

في هذه الأطروحة، تتم دراسة نظام توليد الطاقة الكهروضوئية مع تخزين البطارية المتصل بالشبكة. تركز هذه الدراسة للإدارة الذكية لنظام تخزين الكهرباء في دورة الشحن/التفريغ، وتتمكن هذه الإدارة الذكية من تحديد: الفرق بين إنتاج الكهرباء والاستهلاك المتوقع، والحالة الأولية والحالة كدالة وقت التخزين الكهروكيميائي وحماية النظام من جميع أنواع المخاطر. بعد ذلك، تقوم الإدارة بحساب الاعدادات لاختيار استراتيجية الإدارة، أو تقرر أن نظام التخزين لا يحتاج إلى إدارة ذكية، هناك استراتيجيتان للاختيار، الأولى تركز على تحييد ذروات الاستهلاك في حالة فشل الطاقة الكهروضوئية في تلبية الحمل، وتطبق الاستراتيجية الثانية إذا كانت الطاقة الكهروضوئية معتدلة، يوفر نظام الإدارة ملفات تعريف التفريغ المعتمدة حسب الوقت ويعمل على إطالة العمر المتوقع لحزمة البطارية عن طريق الحد من الشحن والتفريغ ومنع الشحن والتفريغ العميقين، يمنح التنظيم الجيد لنظامنا الفرصة لبيع فائض الكهرباء الذي ينتجه المولد الكهروضوئي للشبكة الطاقة.

Cet humble travail est spécialement dédié à :

***Mes chers parents, qui ont tout sacrifié pour que je puisse arriver à ce stade-là, sans eux je n'aurais jamais pu y arriver.
Que dieu les garde pour moi.***

Mon frère, et ma sœur qui m'ont soutenu moralement tout au long de mon universitaire.

Mes grands-parents paternels et maternels que dieu les préserve et leur accorde une très longue vie.

Mon camarade de travail Slimani Oualid, qui a rapporté les connaissances et les efforts nécessaires afin d'accomplir ce projet de fin d'étude

Mes amis et mes camarades de la promotion Electrotechnique 3ème année du cycle d'ingénieur

Enfin, à toute personne qui a aidé, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail

MEZIANI Mohamed Fares

*C'est avec un grand plaisir que je dédie ce
modeste travail :*

*A mes chers parents, pour leur soutien pendant tout mon
parcours scolaire, mais aussi de leur support et leur présence
dans les moments difficiles.*

A mes frères et ma sœur

A toute la famille Slimani et la famille Gacem

*A mon binôme, pour sa patience et sa compréhension et de
m'avoir supporté tout au long de ce travail.*

À tous mes amis

*Aussi bien à tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans
ce travail et au cours de mes études*

Slimani Oualid

Remerciements

Au nom d'Allah le miséricordieux le très miséricordieux. C'est d'abord grâce à Allah le tout puissant que ce modeste travail a pu voir le jour. Nous souhaitons avant tout remercier notre directeur de mémoire Mr. MEBROUKI Mohamed enseignant à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils précieux et surtout le temps qu'il a consacré pour nous épauler du début jusqu'à la fin. Nous désirons aussi remercier tous les enseignants de l'école ESSA Tlemcen qui nous ont donné les connaissances nécessaires pour pouvoir réaliser ce modeste travail. Nous remercions aussi les membres de jury : Mme Imane Bousmaha (MCB), Monsieur Abdelfatah Kerboua (MCB) et Monsieur Larej Merad (Pr.) d'avoir accepté de juger ce travail et d'avoir la patience et la bienveillance de l'examiner . Finalement, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Abréviations	iii
Résumé	v
Abstract	vi
Remerciements	xi
Table des matières	xiii
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xvii

Introduction	1
---------------------	----------

1 Généralités sur le système de stockage par batterie	3
--	----------

1	Introduction :	3
2	Caractéristiques d'une batterie :	3
2.1	Tension d'une batterie :	3
2.2	Capacité d'une batterie :	4
2.3	Espérance de vie d'une batterie :	4
2.4	État de charge d'une batterie :	4
2.5	Profondeur de décharge d'une batterie :	5
2.6	Densité d'énergie massique ou volumique :	5
2.7	Résistance interne de l'accumulateur :	5
2.8	Auto-décharge :	5
3	Différents éléments principaux définissant le fonctionnement d'une batterie :	5
4	Classification des batteries :	6
4.1	Batterie primaire :	6
4.2	Batterie secondaire :	6
5	Différences entre batteries primaire et secondaire :	7
6	Types de batteries secondaires :	7
6.1	Batteries plomb-acide :	7
6.2	Batteries au nickel-cadmium (NiCd) :	7
6.3	Batterie au Nickel-hydrure métallique (NiMH) :	8
6.4	Batteries au Lithium-ion (Li-ion) :	8
6.5	Batterie lithium-antimoine-plomb à métal liquide :	8
6.6	Batterie lithium fer phosphate (LiFePO4)	9
7	Comparaison entre les différentes technologies de batteries :	9
8	Rôle d'une batterie :	9
9	Surveillance des batteries :	10
9.1	Surveillance de la température appropriée :	10
9.2	Surveillance de la tension :	11
10	Choix de batteries :	11
11	Batterie à base du plomb/Acide :	11

11.1	Principe de fonctionnement :	12
11.2	Causes de défaillance d'une batterie plomb/acide :	12
11.3	Étapes de charge d'une batterie :	14
12	Branchement des batteries :	14
12.1	Branchement en série :	14
12.2	Branchement en parallèle :	15
12.3	Branchement en série en parallèle :	15
13	État de santé et état de charge d'une batterie :	15
13.1	Principe de mesure de l'état de charge d'une batterie :	16
13.2	Principes techniques :	16
13.3	Méthodes utilisées dans l'estimation de l'EDC et l'EDS :	17
14	Recyclage :	17
15	Conclusion :	17
Bibliographie		19
2 Modélisation et gestion intelligente de stockage par batterie		23
1	Introduction :	23
2	Description du système énergétique :	23
3	Modélisation du générateur photovoltaïque :	25
4	Modélisation du système de stockage :	26
5	Gestion de stockage intelligente et bilan énergétique :	28
6	Temps total de décharge :	28
7	Choix de la stratégie de gestion des batteries :	29
8	Conclusion :	31
Bibliographie		33
3 Résultats et discussion		35
1	Paramètres de simulation	35
2	Résultats et discussion	35
2.1	Temps de décharge totale	35
2.2	Stratégie 2 pour la gestion de la charge/décharge des batteries	37
2.3	Charge des batteries pendant la journée du 3 mars	39
2.4	Stratégie 3 pour la gestion de la charge/décharge des batteries	40
3	Conclusion	43
Bibliographie		45
Conclusion générale et perspectives		47

Liste des figures

1. Figure (1.1) État de charge d'une batterie.
2. Figure (1.2) Profondeur de décharge d'une batterie.
3. Figure (1.3) Schéma descriptif d'une batterie primaire.
4. Figure (1.4) Schéma d'une batterie secondaire.
5. Figure (1.5) Marges de coûts des différentes technologies des batteries.
6. Figure (1.6) Fonctionnement d'une batterie plomb-acide.
7. Figure (1.7) Étapes de charge d'une batterie plomb-acide.
8. Figure (1.8) Branchement en série de deux batteries.
9. Figure (1.9) Branchement en parallèle de deux batteries.
10. Figure (1.10) Branchement mixte (en série et en parallèle) de quatre batteries .
11. Figure (1.11) État de charge, profondeur de décharge et capacité de stockage d'une batterie.
12. Figure (2.1) Schéma d'un système photovoltaïque avec stockage par batterie relié au réseau accompagné d'un système de gestion de batteries.
13. Figure (2.2) Prototype d'un système de gestion de batteries (SGB).
14. Figure (2.3) Fonctionnalités d'un système de gestion de batteries SGB.
30. Figure (2.4) Organigramme de charge et de décharge des batteries.
15. Figure (2.5) Choix du temps de décharge totale.
16. Figure (2.6) Choix de la stratégie à suivre.
17. Figure (3.1) Variation des puissances (en W) correspondant, respectivement, au générateur photovoltaïque, au réseau, aux batteries et à la charge électrique pendant la période entre 18 h (1 mars) et 6h (3 mars) et ce pour la stratégie 2. La courbe représentant l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) est reportée sur le même graphe en bleu.
18. Figure (3.2) Variation des puissances (en W) correspondant, respectivement, au générateur photovoltaïque, au réseau, aux batteries et à la charge électrique pendant la période entre 54 h (3 mars) et 78h (4 mars) et ce pour la stratégie 3. La courbe représentant l'état de charge *EDC* des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) est reportée sur le même graphe en bleu. La puissance de charge maximale au delà de laquelle les batteries de déchargent est $P_{\text{charge, max}} = 6.45 \text{ kW}$. La chute de la valeur de *EDC* est lente.
19. Figure (3.3) Variation des puissances (en W) correspondant, respectivement, au générateur photovoltaïque, au réseau, aux batteries et à la charge électrique pendant la période entre 54 h (3 mars) et 78h (4 mars) et ce pour la stratégie 3. La courbe représentant

l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) est reportée sur le même graphe en bleu. La puissance de charge maximale au delà de laquelle les batteries se déchargent est $P_{\text{charge, max}} = 6.45 \text{ kW}$. La chute de la valeur de EDC est rapide.

20. Figure (3.4) Variation de la tension d'une cellule de batteries et du courant de charge pour la stratégie 2 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.
21. Figure (3.5) Variation de la tension d'une cellule de batteries et du courant de charge pour la stratégie 3 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.
22. Figure (3.6) Variation de la tension d'une cellule de batteries et du courant de décharge pour la stratégie 2 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.
23. Figure (3.7) Variation de la tension d'une cellule de batteries et du courant de décharge pour la stratégie 3 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.

Liste des tableaux

1. Tableau (1.1) Différences entre batterie primaire et secondaire.
2. Tableau (1.2) Différences entre les technologies de batteries utilis.
3. Tableau (3.1) Données géographiques du site de Tlemcen.
4. Tableau (3.2) Paramètres techniques du générateur photovoltaïque.
5. Tableau (3.3) Paramètres techniques des batteries.
6. Tableau (3.4) Valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site de Tlemcen

Introduction

Aujourd'hui, la protection de l'environnement et les ressources énergétiques ne représentent plus un défi à l'économie mondiale ; elles sont devenues plutôt une opportunité à travers l'utilisation des énergies renouvelables, qui deviennent de plus en plus faciles à intégrer dans le processus de production de l'électricité. Au cours des dernières années, ces sources d'énergie renouvelable se développent rapidement, en raison de la réduction de l'impact sur l'écosystème, la production d'un minimum de déchets secondaires et la durabilité basée sur les besoins économiques et sociaux actuels et futurs.

L'énergie renouvelable est une énergie émanant d'un processus naturel et qui est régénérée au rythme égal ou plus rapidement qu'elle n'est consommée. Plusieurs formes d'énergie renouvelable existent, dérivant généralement soit du soleil (directement ou indirectement), soit de la chaleur produite dans la profondeur de la terre.

A titre d'exemple, la consommation des énergies renouvelables en Allemagne dans le premier trimestre de l'année 2019 atteignait 44.4% de la consommation totale des énergies, alors que dans le premier trimestre de l'an 2020 elle a atteint 51.9% ; une augmentation considérable pendant une période assez courte. D'autre part, l'Algérie possède un énorme potentiel d'énergie renouvelable, surtout dans le sud où le gisement solaire est très élevé ; ce qui ouvre la porte aux études d'installation de champs photovoltaïques performants pouvant réduire considérablement l'utilisation des énergies fossiles épuisables et polluantes.

En effet, les installations des énergies renouvelables peuvent être utilisées soit pour satisfaire une charge soit en site isolé (pas de réseau électrique) soit pour alimenter une charge électrique en la présence du réseau.

Malheureusement, les problèmes majeurs des énergies renouvelables résident dans leur dépendance à la météo et le changement climatique et bien sûr leur intermittence. Ces paramètres sont incontrôlables dans le cas normal, ce qui n'est pas le cas des énergies fossiles. Pour faire face à ces obstacles, plusieurs recherches scientifiques récentes dans ce domaine se basent sur l'hybridation de deux ou plusieurs sources d'énergies, en vue de rendre ces systèmes énergétiques plus fiables et plus rentables, en faisant en sorte que chaque source couvre les inconvénients de l'autre source. En effet, les systèmes hybrides peuvent être utilisés dans les sites isolés, sans avoir besoin du réseau, même si c'est difficile de maintenir un tel système sans interruption.

Les installations photovoltaïques reliées au réseau ont plusieurs utilisations : vendre de l'énergie électrique produite au réseau, alimenter la charge et réduire la consommation du réseau. Un système de stockage électrochimique (un banc de batteries, par exemple) est toujours présent dans ce type d'installation afin de réduire le décalage entre la production de l'énergie et sa consommation. Cette présence est essentielle au bon fonctionnement du système énergétique, surtout dans le cas où le réseau électrique n'est plus un système d'appoint. Toutefois, l'utilisation d'un banc de batteries suppose un soin très rapproché aussi bien des processus de charge et de décharge des batteries que des conditions d'utilisation (aération, température convenable, branchement, etc). Une mauvaise gestion des processus de charge et de décharge des batteries (surcharge, décharge profonde, etc) entraînerait une dégradation des batteries et partant une

courte durée de vie, très couteuse au propriétaire.

Une gestion intelligente des processus de charge et de décharge d'une batteries doit tenir compte de l'évolution de leur état de charge en le limitant dans une intervalle de sécurité fin que celles-ci ne se déchargent pas profondément, ni se chargent outrageusement (surcharge). Ladite gestion veille aussi sur l'évolution des tensions et des courants de charge et de décharge en les empêchant de dépasser certaines limites fixées, permettant ainsi aux batteries de rester en bonne santé le plus longtemps possible.

Ce travail se veut une tentative d'établir un protocole de gestion intelligente de charge et décharge des batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau électrique dans le but d'alimenter une charge électrique d'une unité administrative. La charge des batteries se fait seulement à travers l'énergie photovoltaïque, alors que la décharge n'a lieu que si la charge électrique ait dépassé une certaine limite fixée par le gérant. Autrement dit, la décharge des batteries ne sert qu'à écrêter les pics de consommation et réduire ainsi le recours au réseau, surtout dans la nuit lorsque l'énergie photovoltaïque est absente. Pour ce faire, un code numérique est établi en vue de suivre, pendant quatre jours du mois de mars 2004, l'évolution de l'état de charge d'un banc de batteries, les puissances délivrées ou consommées par les éléments du système, ainsi que les tensions et les courants de charge et de décharge des batteries et ce pour deux températures de fonctionnement des batteries.

Le présent mémoire est organisé comme suit : Le premier chapitre est consacré à un passage en revue des différents types de batteries, des différentes technologies et des paramètres de santé des batteries. Dans le deuxième chapitre est exposée la procédure de gestion de charge et décharge des batteries ainsi que les expressions des tensions de charge et de décharge en fonction des courants et de l'état de charge. Enfin, les résultats obtenus par simulation sont donnés au chapitre trois avec une discussion et des commentaires. Le document se termine par une conclusion et des perspectives.

Chapitre 1

Généralités sur le système de stockage par batterie

1 Introduction :

Le décalage inévitable entre la production de l'énergie à partir d'une source renouvelable et la consommation de celle-ci est un sérieux problème qui se pose aux spécialistes du domaine. Une solution à ce problème, parmi tant d'autres, consiste à utiliser un système de stockage d'énergie, lequel peut se présenter sous plusieurs et différentes formes. En effet, le stockage électrochimique à l'aide d'un banc de batteries représente actuellement un vecteur très important dans les systèmes de production d'énergies renouvelables, qui ne cesse de se développer, bien qu'il représente encore, de par les coûts exorbitants de ses constituants mais aussi par sa fragilité dans des environnements agressives, le maillon faible dans la chaîne de production d'énergie de nature renouvelable. Encore que le système de stockage nécessite un soin très avancé afin que celui-ci puisse fonctionner normalement pendant la durée de vie fixée par le fabricant ; autrement dit, le système de stockage, lui même, a besoin d'un système de gestion intelligente qui veille sur le processus de charge et de décharge en empêchant toute anomalie (surcharge, décharge profonde, température excessive, etc) qui peut survenir. Aussi, un bon dimensionnement du système de stockage permet de satisfaire de manière ininterrompue la demande en électricité et évite un recours à un système d'appoint (backup). Dans ce premier chapitre, nous passerons en revue les types, les caractéristiques, le fonctionnement et les technologies des batteries, afin que le lecteur puisse avoir une idée plus ou moins claire sur cet élément essentiel dans la chaîne de production d'électricité basée sur les énergie renouvelables.

2 Caractéristiques d'une batterie :

Une batterie d'accumulateurs est un élément de stockage de l'énergie électrique sous forme chimique, laquelle sera ensuite libérée de nouveau sous forme d'un courant continu. La technologie des batteries est répandue chez les consommateurs individuels et les installations à grande échelle qui s'en servent selon les besoins [[1], [2], [3]]. Généralement, une batterie est caractérisée par des paramètres qui déterminent son fonctionnement et qui sont :

2.1 Tension d'une batterie :

Une batterie est réalisée par l'association en série de cellules élémentaires de tension nominale d'environ 2 Volts. Ainsi, une batterie de tension nominale de 12 Volts est constituée de six

accumulateurs. La tension d'une batterie est définie comme la différence de potentiel entre ses deux électrodes. C'est le paramètre le plus significatif et le plus facile à déterminer. Différentes tensions de référence sont définies pour une batterie [4] :

- **Tension nominale** : C'est une tension de référence fournie par le fabricant et qui représente en quelque sorte une moyenne de tension que peut avoir une batterie.
- **Tension de fin de décharge** : C'est une tension limite au-dessous de laquelle la batterie a atteint un stade où elle ne peut plus fournir de l'énergie électrique. Elle est donnée par le fabricant afin d'éviter des réactions irréversibles nocives pour la santé de la batterie.
- **Tension de fin de charge** : C'est une tension pour laquelle la batterie récupère toute sa matière active disponible en son sein, et elle serait de nouveau pleinement chargée.

2.2 Capacité d'une batterie :

Elle représente la quantité d'énergie qui peut être stockée dans une batterie. Son unité est l'ampère-heure (Ah). Numériquement, c'est le produit de l'intensité du courant mesuré en ampère (A) et l'unité de temps de charge (décharge). Elle peut être mesurée en watt-heure (Wh) sous forme d'énergie en multipliant la valeur trouvée en Ah par la tension (V) aux bornes de la batterie [5].

2.3 Espérance de vie d'une batterie :

Ce paramètre définit le nombre de cycle de charge/décharge qu'une batterie peut atteindre [6]. Autrement dit, le temps total de fonctionnement d'une batterie avant d'atteindre sa fin de vie. Cette caractéristique est très importante et surtout pour le consommateur. Elle dépend de la qualité de la matière active de la batterie et peut être influée par plusieurs facteurs qui peuvent causer sa dégradation [7].

2.4 État de charge d'une batterie :

C'est un paramètre très important à connaître pour les utilisateurs pour une bonne gestion des batteries pendant leur fonctionnement. L'état de charge (State of charge en anglais (SOC)) est le rapport entre la capacité stockée et la capacité nominale. Il est exprimé en pourcentage et représente la capacité restante dans l'accumulateur [8, 10].

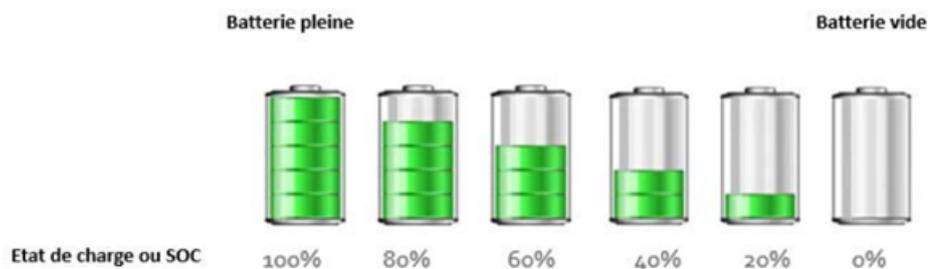


FIGURE 1.1 – État de charge d'une batterie [9].

2.5 Profondeur de décharge d'une batterie :

Ce paramètre représente le pourcentage par rapport à la capacité nominale de la quantité d'énergie qu'on peut retirer d'une batterie dans un cycle de charge/décharge (Depth of discharge (DOD) en anglais). Le fait de limiter la quantité d'énergie qui peut être extraite d'une batterie a pour but d'éviter tout risque d'endommagement [10].

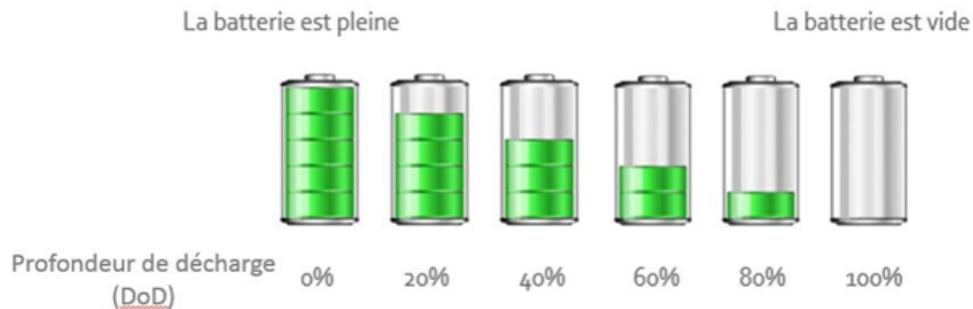


FIGURE 1.2 – Profondeur de décharge d'une batterie [9].

2.6 Densité d'énergie massique ou volumique :

Le paramètre dit densité massique ou bien énergie spécifique (exprimée en Wh/kg) est l'énergie emmagasinée par la batterie dans 1 kg (unité de masse). La densité volumique (exprimée en Wh/l) représente l'énergie emmagasinée par la batterie dans 1 litre (unité de volume) [11].

2.7 Résistance interne de l'accumulateur :

Elle est généralement très petite (des centièmes d'ohm) et peut être considérée comme nulle dans les calculs numériques. La résistance interne d'une batterie peut être trouvée à l'aide des composants constituant l'accumulateur, et ce en calculant la résistance au niveau de l'électrolyte [12].

2.8 Auto-décharge :

L'auto-décharge représente la perte en capacité d'un accumulateur lorsqu'il est mis au repos (quand il n'est pas utilisé pour alimenter une charge) durant un certain temps [13].

3 Différents éléments principaux définissant le fonctionnement d'une batterie :

Une batterie typique se compose des éléments suivants [14] :

- - **Boîtier** : C'est une boîte en polymère qui abrite les parties qui forment la pile pour former la cathode, une partie de la réaction électrochimique.
- - **Cathode** : C'est l'électrode siège de la réaction de réduction qui capte les électrons et qui possède un corps oxydant avec une capacité d'attirer les électrons.

- - **Anode** : C'est une électrode qui s'oxyde (une plaque négative qui est le siège de la réaction d'oxydation) et possède le pouvoir réducteur capable de céder des électrons.
- - **Séparateur** : Il représente un tissu fibreux non tissé qui sépare les électrodes. C'est un isolant qui évite le court-circuit et le suréchauffement.
- - **Électrolyte** : C'est le support du mouvement des ions à l'intérieur de la pile. Il transporte le courant ionique à l'intérieur de la pile.
- - **Collecteur** : C'est une tige de cuivre au milieu de la cellule qui conduit l'électricité vers le circuit extérieur.

4 Classification des batteries :

Deux catégories des batteries existent :

4.1 Batterie primaire :

Une batterie primaire est une pile qui n'est pas facile à recharger après une utilisation et qui est mise au rebut après une décharge. La majorité des piles primaires sont sans électrolyte libre ou liquide et sont alors appelées piles sèches [15, 16].

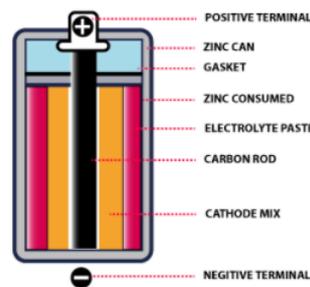


FIGURE 1.3 – Schéma descriptif d'une batterie primaire [15].

4.2 Batterie secondaire :

Une batterie secondaire est une pile ou une batterie qui est capable d'être rechargée après utilisation pour retrouver son état initial avant l'utilisation, en laissant passer un courant dans le circuit dans le sens contraire lors du rechargement [15, 16].

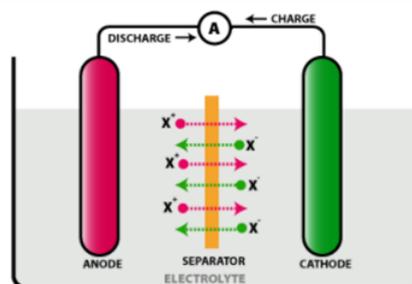


FIGURE 1.4 – Schéma d'une batterie secondaire [15].

5 Différences entre batteries primaire et secondaire :

Dans le tableau (1.1) sont données les différences entre une batterie primaire et une batterie secondaire.

Batterie primaire	Batterie secondaire
Possède une densité énergétique importante, se décharge lentement (long fonctionnement lors d'une seule phase de décharge)	Possède une densité énergétique plus faible
Ne contient pas de fluides dans la cellule	Elles sont composées de cellules humides (cellules inondées et liquides) et de sel fondu (cellules liquides de composition différente).
Sa résistance interne est élevée	Elle a une faible résistance interne
Sa conception est simple et très légère	Sa conception est plus complexe et plus lourde
Le cout d'un kilowattheure est élevé	Le cout d'un kilowattheure est faible à condition que la recharge soit pratique et d'un cout abordable.
Jetable	Nécessite un entretien continue et une recharge à chaque fois
Un cout initial raisonnable	Un coût initial important

TABLE 1.1 – (Différences entre batterie primaire et secondaire [16])

6 Types de batteries secondaires :

On l'aura sûrement compris, les batteries secondaires s'apprêtent le mieux au processus de charge et de décharge, essentiel dans le fonctionnement d'un système de stockage d'énergie associé aux sources d'énergie renouvelables. Dans les paragraphes qui suivent nous donnons les types de batteries de recharge (secondaires) qui existent sur le marché.

6.1 Batteries plomb-acide :

Une batterie à base de plomb est comme toute batterie secondaire capable de stocker l'énergie électrique à l'aide de réactions chimiques pour la restituer ultérieurement en électricité. L'électrolyte qui laisse passer les ions dues aux réactions d'oxydo-réduction entre l'électrode positive et négative est constitué d'une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4). L'électrode positive est composé à partir d'un dioxyde de plomb (PbO_2) alors que l'électrode négative se constitue du plomb (Pb). La tension produite (différence de potentiel entre les deux électrodes d'une cellule) est de 2V. Une paroi plane s'insère entre les deux électrodes pour les empêcher de se toucher tout en laissant passer le flux d'ions [17].

6.2 Batteries au nickel-cadmium (NiCd) :

Les accumulateurs Nickel cadmium (NiCd) font partie de la famille des batteries à base de Nickel (Ni). Ils sont les premiers concurrents des batteries au plomb, même s'ils supportent une densité d'énergie plus importante, ils offrent des caractéristiques techniques similaires. La cathode est constituée de l'hydroxyde de Nickel, et l'anode est fabriquée avec du cadmium

métallique. Une solution aqueuse alcaline est utilisée comme électrolyte pour permettre le passage des ions entre les deux électrodes. La batterie *NiCd* a été inventée à la fin du XIXe siècle, mais sa production à grande échelle n'a commencé que vers les années 1960. L'utilisation de ce type de batterie se concentre dans la production des électroniques portables. Il faut noter que les batteries *NiCd* souffrent de l'effet mémoire, et les matériaux qui constituent cette batterie sont toxiques. C'est pour cela que l'utilisation des batteries au plomb est très répandue dans l'installation stationnaire, alors que dans l'électronique portable, les batteries *NiCd* ont été supplantés par les batteries lithium-ion [18, 19].

6.3 Batterie au Nickel-hydrure métallique (NiMH) :

Un système de batteries au nickel-métal-hydrure (*NiMH*) est un système de stockage d'énergie fondé sur des réactions électrochimiques de charge/décharge qui se produisent entre une électrode positive (cathode) qui contient de l'oxyde d'hydroxyde de nickel comme matière active et une électrode négative (anode) composée d'un alliage absorbant en hydrogène. Les électrodes sont séparées par une membrane perméable qui permet le flux d'électrons et ioniques entre eux et est immergée dans un électrolyte qui est composé d'hydroxyde de potassium aqueux qui ne subit aucun changement significatif pendant le fonctionnement. Dans le domaine des petites batteries rechargeables, la technologie *NiMH* a remplacé la technologie *NiCd* pour de nombreuses applications, mais elle-même est maintenant remplacée par la technologie Li-Ion. La technologie *NiMH* représente la technologie de référence pour les véhicules hybrides, mais devrait être remplacée par la technologie Li-Ion à l'avenir. Sur le marché des batteries industrielles, la technologie *NiMH* complète la technologie *NiCd* lorsque des performances supérieures et aucun entretien sont nécessaires. Certains grands systèmes *NiMH* ont été développés pour des applications de grille : Les technologies de recyclage et les circuits de collecte sont établis et opérationnels [20].

6.4 Batteries au Lithium-ion (Li-ion) :

Ce type d'accumulateur est devenu la technologie de stockage la plus répandue dans les électroniques portables. La cathode est de l'oxyde de métal lithié, et l'anode est fabriquée avec du carbone graphitique. L'électrolyte est constitué de sels de lithium dissous dans des carbonates organiques. Ces batteries sont légères et possèdent une densité d'énergie importante, une efficacité élevée et un long cycle de vie. Toutefois, l'obstacle principal est le prix du kilowatt heure ($600USD/kWh$) qui est dû à leur emballage et aux circuits internes de protection de la surcharge. L'efficacité de charge des batteries Li-ion est élevée, entre 95% et 98%. Presque n'importe quel temps de décharge variant de quelques secondes à quelques semaines peut être fait de manière correcte, ce qui en fait une technologie de stockage très flexible et universelle [25].

6.5 Batterie lithium-antimoine-plomb à métal liquide :

La batterie lithium-antimoine-plomb à métal liquide comprend une électrode négative liquide au lithium, un électrolyte de sel fondu et une électrode positive liquide en alliage antimoine-plomb, qui s'auto-séparent par densité en trois couches distinctes en raison de l'immiscibilité des phases contiguës de sel et de métal [21]. La construction entièrement liquide confère les avantages d'une densité de courant plus élevée, d'une durée de vie plus longue et d'une fabrication plus simple des systèmes de stockage à grande échelle (parce qu'il n'y a pas de membranes ou de séparateurs) par rapport à ceux des batteries classiques. À des densités de courant de

charge-décharge de 275 milliampères par centimètre carré, les cellules fonctionnent à 450 degrés Celsius avec un rendement coulombien de 98% et un rendement énergétique aller-retour de 73%. Cette technologie très récente est apparue en 2014 suite à un travail de groupe au MIT chapeauté par Donald R. Sadoway, un spécialiste de la métallurgie. L'idée de base derrière cette invention était de construire une batterie simple à partir de matériaux abondants sur terre et éviter le recours à des terres rares, qui coutent chers en plus de leur toxicité. Cette nouvelle technologie se montre de plus en plus comme un rival sérieux pour la technologie des batteries à base de lithium surtout pour les grandes installations. Toutefois, le fonctionnement de ce type de batteries à des températures élevées reste un élément de freinage pour la généralisation de cette technologie.

6.6 Batterie lithium fer phosphate (LiFePO₄)

Une batterie lithium-phosphate de fer est un type de batterie lithium-ion capable de se charger et se décharger plus rapidement par rapport aux autres types de batteries. Il s'agit d'une batterie rechargeable dont la cathode est constituée de LiFePO₄, d'où son nom est pris [22]. L'électrode positive est constituée du phosphate de fer lithié. Sa structure cristalline permet l'insertion et la désinsertion du lithium. Lors de la phase de charge, le lithium bouge de l'électrode positive vers l'électrode négative constituée du graphite. Le phénomène inverse se produit lors de la décharge [23].

Les avantages de ce type de batterie par rapport aux batteries Li-Ion traditionnelles à base de cobalt sont : une puissance accrue, une charge plus rapide, un poids réduit et une durée de vie plus longue. Ces batteries présentent également de meilleures caractéristiques de sécurité et n'explosent pas dans des conditions extrêmes. Les batteries LiFePO₄ éliminent également le risque que le cobalt se retrouve dans l'environnement [24].

7 Comparaison entre les différentes technologies de batteries :

Dans le tableau 1.2, nous citons quelques caractéristiques des technologies de batteries utilisées [26].

8 Rôle d'une batterie :

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques s'effectue exclusivement à l'aide des batteries d'accumulateurs. Dans ce type de systèmes, la batterie remplit trois fonctions importantes [7, 27] :

- **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils nécessitant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

/	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Résistance interne	Très faible	Environ 0.06 par cellule de 1Ah	Environ 0.06 par cellule de 1Ah	Très faible
Durée de vie (ans)	4-5	2-3	2-4	5-8
Auto décharge	5	10-15	30	1-2
Cycle de vie	500-1200	200-1500	1000-2500	1000-10,000
Tension nominale d'élément (V)	2	1.2	1.2	3.7
Plage de température (°C)	Ambiante	-40 à +80	Ambiante	-40/+60
Densité d'énergie volumique (Wh/l)	50-80	60-150	140-435	200-600
Densité d'énergie massique (Wh/Kg)	30-50	50-75	30-110	75-250
Temps de charge(h)	8	1	1	2-3
Avantages	Bonne recyclabilité	Sa charge est très rapide	N'est pas polluant	Haute densité d'énergie, léger
Inconvénients	Polluant	Polluant, Se décharge rapidement, Faible densité énergétique	Ne supporte pas le dépassement de charge	La surchauffe peut entraîner l'explosion.
Coût	Pas chère	Très chère	Très chère	Très chère

TABLE 1.2 – (Différences entre les technologies de batteries utilisées [26])

- **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

9 Surveillance des batteries :

La surveillance des batteries consiste à maintenir une certaine température, et assurer un bon équilibre de la tension aux bornes des batteries utilisées [28].

9.1 Surveillance de la température appropriée :

Si la température d'une batterie est très faible, celle-ci peut perdre une grande partie de sa capacité nominale. D'autre part, une température très élevée augmente la vitesse des réactions, ce qui provoquera un vieillissement prématuré des éléments de stockage, donc une diminution de la durée de vie de la batterie. La température à maintenir est de 20C jusqu'à 25C pour assurer un meilleur fonctionnement des éléments.

9.2 Surveillance de la tension :

La surveillance de la tension aide seulement à trouver facilement la panne d'un élément de stockage en cas de décharge s'il y aura lieu, et cela en divisant les batteries en groupes, selon le nombre des éléments. Chaque groupe est concerné par une mesure de la tension à ces bornes. Si une cellule dans un groupe ne fonctionne pas, on trouve un déséquilibre en comparant ce groupe avec un autre, et la panne peut être trouvée facilement [28].

10 Choix de batteries :

Le choix de batteries dépend du coût d'investissement initial (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 (1.5) : Les batteries de tech-

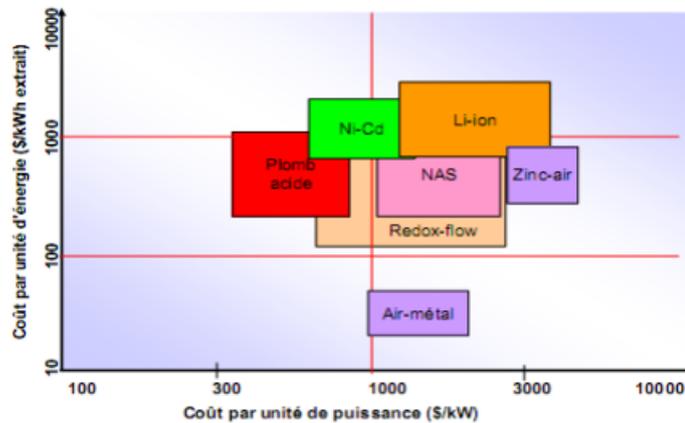


FIGURE 1.5 – Marges de coûts des différentes technologies des batteries [29]

nologie plomb-acide sont actuellement les plus utilisées pour les applications photovoltaïques. Elles sont principalement avantagées par leurs faibles coûts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées. La technologie Nickel-Cadmium (*NiCd*) présente un coût plus important par rapport aux batteries au Plomb, pour une durée de vie supérieure avec un rendement moins important. Des efforts sont nécessaires pour faire du *NiCd* 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 coût 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 [29, 30].

11 Batterie à base du plomb/Acide :

La batterie à base de Plomb-acide est actuellement, et de très loin, la plus répandue dans le domaine de stockage des énergies provenant des ressources renouvelables. Pour cette raison, il serait utile, dans ce qui suit, de se concentrer sur ce type de technologie.

11.1 Principe de fonctionnement :

Pendant la charge d'une batterie une réaction chimique d'oxydation de la plaque négative (anode) avec libération d'électrons, or que dans la plaque positive une réaction chimique de réduction a lieu, où les électrons sont de nouveau récupérés. Pendant le la décharge d'une batterie, c'est le processus inverse qui a lieu. L'électricité se déplace dans la batterie sous forme d'ions en présence de l'électrolyte ; celui-ci sert à aider le bon mouvement de ces ions. Cependant, une force électromotrice apparait au niveau de ces deux électrodes [31]. La figure (1.6) montre un schéma explicatif du fonctionnement d'une batterie plomb-acide.

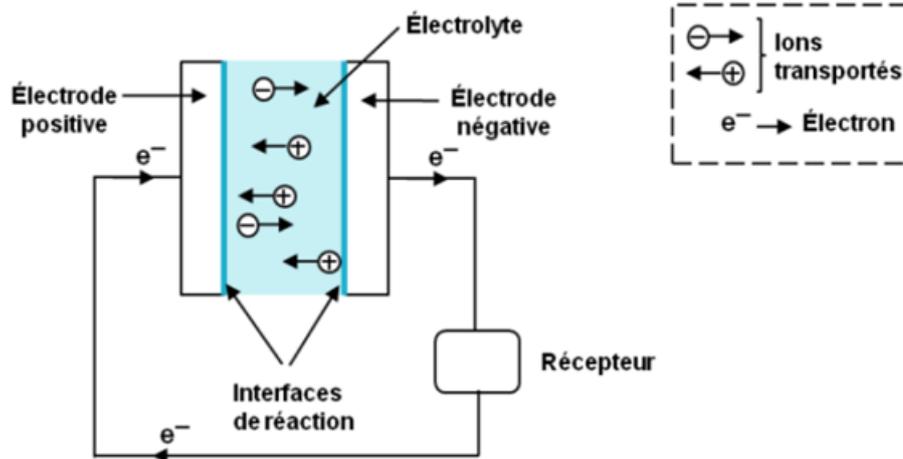
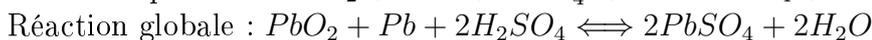
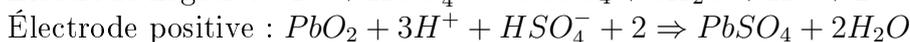


FIGURE 1.6 – Fonctionnement d'une batterie plomb-acide

Les réactions chimiques au niveau des deux électrodes d'une batterie sont :



11.2 Causes de défaillance d'une batterie plomb/acide :

Lors de l'utilisation des batteries, des risques de défaillance du système sont toujours présentes, celles-ci peuvent mener à la dégradation prématurée des batteries, ce qui aura des conséquences fâcheuses sur le bon fonctionnement du système énergétique, mais aussi sur l'augmentation du coût total du système. Nous citons ci-après quelques des majeures causes de dégradation des batteries [27] :

Surcharge des batteries :

La surcharge d'une batterie engendre non seulement la corrosion de ses plaques positives, mais aussi un dégagement excessif de gaz pouvant arracher des plaques, avec de la matière active qui se dépose aussi bien au fond du bac, qu'entre les séparateurs et les plaques. La surcharge des batteries génère en outre une augmentation de la température de ces dernières, ce qui peut conduire à la destruction des plaques et des séparateurs.

Décharge profonde :

La décharge profonde est, à côté des surcharges, la première cause de détérioration d'une batterie. Les résultats des décharges profondes prolongées sont entre autres la diminution de la densité de l'électrolyte, le dépôt au fond du bac de sédiments fins de cristaux de sulfate de plomb et la décoloration des plaques, ainsi que leur sulfatation.

Effet de mémoire :

L'effet mémoire est un phénomène physico-chimique affectant les performances des accumulateurs électriques s'ils ne sont pas complètement déchargés avant d'être rechargés et inversement.

Sulfatation :

La réaction chimique qui a lieu lors de la décharge de la batterie conduit à la formation de cristaux de sulfate de plomb sur les plaques positive et négative de celle-ci. Ces cristaux disparaissent lorsque la batterie est rechargée. Ces cristaux vont former une couche imperméable entre les électrodes et l'électrolyte et la réaction ne pourra plus avoir lieu. La batterie sera alors définitivement hors d'usage. C'est pour éviter la sulfatation qu'il ne faut jamais laisser une batterie déchargée. Les causes de la sulfatation sont :

- La non utilisation de la batterie durant une longue période, après sa charge complète ou partielle.
- Le fonctionnement de la batterie durant des jours à un état de charge partielle, sans charge d'égalisation.
- La variation de la température dans la batterie.

Stratification de l'acide :

Pour les batteries au plomb, il y a une petite différence entre la densité de l'eau et celle de l'acide. Si une batterie se met au repos pour une longue durée, il y a un risque de séparation du mélange : l'eau et l'acide en couches, puisque l'eau est légère, il va monter, et l'acide va couler. Ce phénomène est causé par les effets gravimétriques. Cela peut engendrer une corrosion des plaques en bas de la batterie. Tout cela peut être évité en agitant l'électrolyte en utilisant des pompes à air ou en gazant la batterie à haute tension [32].

Corrosion :

La plaque négative de la batterie peut être attaquée par l'acide contenu dans l'électrolyte. Ce phénomène fait augmenter la résistance interne de la batterie et conduit finalement à la dissolution de la plaque positive par dégradation de la grille. La corrosion est plus rapide lorsque la batterie se trouve dans un environnement chaud.

Court-circuit :

- Les court-circuits des éléments sont générés par :
- La destruction des séparateurs.
 - L'accumulation excessive des sédiments au fond du bac.

11.3 Étapes de charge d'une batterie :

Pour la bonne gestion du fonctionnement des batteries lors de la charge, la batterie doit passer, généralement, par trois étapes [33] :

Étape de charge à courant constant (Bulk) :

Dans cette phase, la batterie reçoit le courant maximal provenant de la source d'énergie (voir figure (1.7)). Cette valeur de courant est donc la valeur du courant à court-circuit I_{cc} alors que la tension dans cette étape augmente jusqu'à arriver à une valeur dite de Bulk.

Étape de charge à tension constante (Absorption) :

Comme son nom l'indique, la tension reste constante au niveau du Bulk pendant cette période de charge, avec la diminution du courant régulièrement. Cette procédure a pour rôle de diminuer le dégagement des gaz, mais aussi pour éviter toutes sortes de défaillance ou un vieillissement prématuré de la batterie.

Étape d'entretien (Float) :

Cette phase vient après que la batterie cesse de se charger, donc le courant pendant cette étape est très faible, et la tension diminue vers une valeur plus petite (niveau Float). Pour diminuer le taux de charge de maintenance à une valeur très faible, et pour éviter le suréchauffement et diminuer le dégagement des gaz, cette étape est bien maintenue. La batterie consomme un courant très faible jusqu'à l'étape qui suit, celle de décharge.

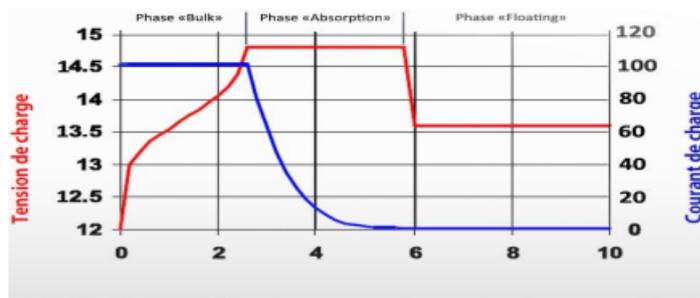


FIGURE 1.7 – Étapes de charge d'une batterie plomb-acide [33].

12 Branchement des batteries :

Il existe trois différents types de branchement des batteries, en série, en parallèle et série/parallèle [34, 35] :

12.1 Branchement en série :

C'est en connectant le pôle positif (+) d'une batterie au pôle négatif (-) d'une autre. Les tensions des deux batteries s'additionnent et donnent la tension totale (s'il s'agit de deux batteries de 12V connectées en série, elles fonctionnent en 24 V), alors que la capacité est celle d'une seule batterie des deux. S'il s'agit d'un branchement de deux batteries en série de différentes capacités, la capacité totale se limite à la capacité la moins importante. Nous donnons sur la figure (1.8) un schéma représentant deux batteries connectées en série.

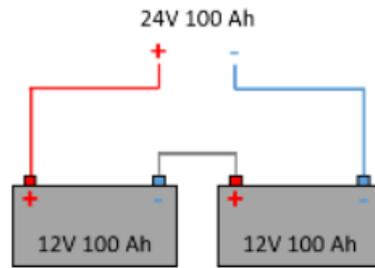


FIGURE 1.8 – Branchement en série de deux batteries [35].

12.2 Branchement en parallèle :

En connectant les deux bornes de même signe de deux batteries de même tension, la tension du circuit est celle d'une batterie, alors que la capacité du circuit devient la somme des deux capacités des batteries. La figure (1.9) explique le branchement en parallèle de deux batteries de même tension.

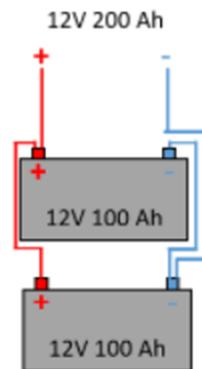


FIGURE 1.9 – Branchement en parallèle de deux batteries [35].

12.3 Branchement en série en parallèle :

Ce branchement combine la connexion en série de batteries à celle en parallèle (voir figure (1.10)). En reliant en parallèle deux blocs branchés en série, la tension obtenue est la somme des deux tensions dans les deux blocs ; de même pour le courant.

13 État de santé et état de charge d'une batterie :

Il est important pour la protection des batteries de mesurer, si besoin est, l'état de charge (EDC ou SOC en anglais) des cellules d'une batterie. Le paramètre EDC peut être considéré comme une quantité thermodynamique permettant d'évaluer la capacité de la batterie, autrement dit la capacité de la batterie à stocker et à fournir de l'énergie électrique, par rapport à une batterie neuve. Une batterie entièrement chargée a une capacité maximale libérable (C_{\max}), qui peut être différente de la capacité nominale (C_{nominale}). En général, la capacité maximale C_{\max} est différente de C_{nominale} pour une batterie nouvellement utilisée et diminuera avec le

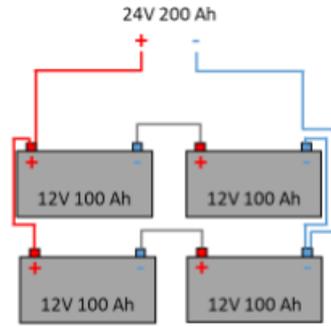


FIGURE 1.10 – Branchement mixte (en série et en parallèle) de quatre batteries [35].

temps d'utilisation. Elle peut être utilisée pour évaluer l'état de santé EDS d'une batterie.

$$EDS = \frac{C_{\max}}{C_{\text{nominale}}} * 100\% \quad (1.1)$$

On considère généralement qu'une batterie a atteint sa fin de vie, lorsque son état de santé est d'une valeur inférieure à 100%.

Sachant que la relation (1.1) n'a pas de signification si les deux valeurs C_{\max} et C_{nominale} ne soient pas bien mesurées dans les mêmes conditions. La capacité qu'une batterie peut stocker (C_{\max}) peut définir son vieillissement; mais cela est valable seulement quand il s'agit d'une installation photovoltaïque. Dans notre cas, C_{\max} est le seul paramètre significatif pour définir le vieillissement d'une batterie [36].

13.1 Principe de mesure de l'état de charge d'une batterie :

Puisque la détermination de l'EDC est compliquée pour des raisons qui dépendent du type de batterie et de l'application de la batterie; plusieurs recherches et développements ont eu lieu ces dernières années pour augmenter la précision de l'estimation de l'EDC. L'EDC étant parmi les paramètres les plus importants à connaître dans la gestion des batteries, il est nécessaire d'effectuer une étude sur le système de stockage, car les estimations précises peuvent éviter les interruptions imprévisibles et protéger la batterie de la surcharge et la décharge profonde pouvant causer des défaillances permanentes au niveau de la structure interne de la batterie. L'approche générale pour la mesure de l'EDC consiste à mesurer le coulomb et le courant entrant et sortant sous toutes les conditions, et la tension individuelle pour chaque cellule.

13.2 Principes techniques :

La capacité libérable ($C_{\text{libérable}}$) d'une batterie en fonctionnement est la capacité libérée lorsqu'elle est complètement déchargée. En conséquence, l'EDC est défini comme le pourcentage de la capacité libérable par rapport à la capacité nominale de la batterie C_{nominale} , donnée par le fabricant.

Lorsqu'une batterie se décharge, la profondeur de décharge (DOD) peut être exprimée en pourcentage de la capacité qui a été déchargée par rapport à la capacité nominale.

$$DOD = \frac{C_{\text{libérée}}}{C_{\text{nominale}}} * 100\% \quad (1.2)$$

La figure (1.11) illustre ces différents types de paramètres d'une batterie.

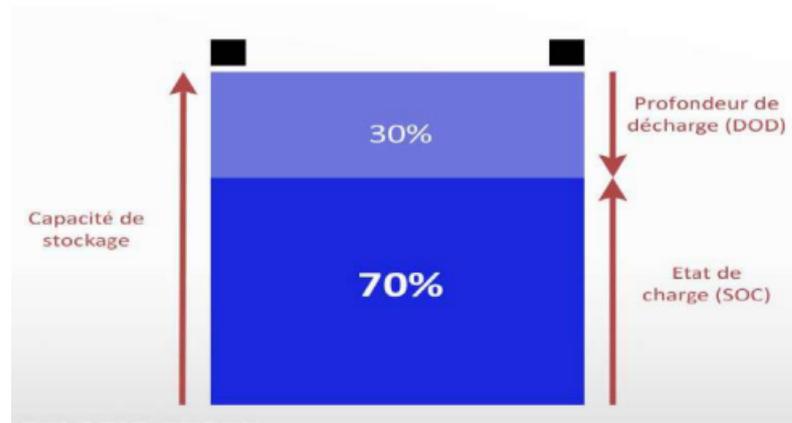


FIGURE 1.11 – État de charge, profondeur de décharge et capacité de stockage d’une batterie [5].

13.3 Méthodes utilisées dans l’estimation de l’EDC et l’EDS :

Pour définir les paramètres nécessaires pour la gestion des batteries, trois méthodes techniques de calcul de l’EDC et l’EDS sont utilisées dans la littérature : Méthode de comptage de coulomb (aussi dite la méthode ampère-heure et d’intégration du courant), méthode de voltage (calcul des paramètres cités à l’aide de la tension du circuit ouvert) et la méthode du filtre de Kalman (utilise un algorithme qui a comme entrée les paramètres de l’état initial du système, et a comme sortie l’état de charge et de santé accompagnés d’une marge d’erreur du calcul) [36].

14 Recyclage :

Les batteries sont fabriquées à l’aide de matériaux toxiques et dangereux pour l’être humain et l’écosystème comme le plomb et le plastique. La batterie après atteindre sa fin de vie ne doit pas être jetée n’importe où. Le fabricant de la batterie doit donner des instructions aux distributeurs pour renseigner l’utilisateur s’il doit envoyer la batterie au centre de recyclage, ou bien les recycler lui-même [32].

15 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons cité plusieurs détails en ce qui concerne les batteries en général. Nous avons commencé par une introduction et une définition des batteries, les caractéristiques principales de la batterie, les composants, la classification, les types des batteries, le rôle des batteries, la surveillance et le choix du système de stockage, les types de branchement. Nous avons aussi mentionné quelques méthodes techniques qui permettent de définir l’état de santé et l’état de charge d’une batterie, et enfin, des informations à propos du recyclage des batteries. Le chapitre suivant va être consacré à la modélisation du système de production d’énergie photovoltaïque avec stockage électrochimique. Nous y exposerons aussi la méthode de gestion intelligente du système de stockage.

Bibliographie

- [1] S.Oukaour. Y.Zerrougui A.Boulaoued, Etude et simulation d'un chargeur de batterie intelligent, mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master, faculté de technologie département génie Electrique, université de béjaia (2020).
- [2] Daniel Remler, Supratim Das et Amritha Jayanti,tech , factsheets for policymakers Battery Technology, Harvard Kennedy school,2020.
- [3] <https://engineering.mit.edu/engage/ask-an-engineer/how-does-a-battery-work/>, Mai 2022.
- [4] BOUTTE Aïssa, thèse de doctorat « Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf « USTO-MB » 2015.
- [5] Tairi Yacine et Namane Abderazak, Mémoire de Master « Conception et simulation d'un chargeur solaire pour batterie li-ion », université KASDI MERBAH OUARGLA, 2019/2020.
- [6] H.Chahrazet et A.Kahina, Mémoire de fin d'études « dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque (application à la F.G.E.I) » Université MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU,2008/2009.
- [7] SAIB. S, "Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique", Thèse Présentée au Département d'Electrotechnique Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF1 2018.
- [8] J. MARCHILDON, « détermination de l'état de charge et l'état de santé d'une batterie plomb acide par la méthode de deux impulsions » mémoire présenté à l'université de Québec à trois rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, université de Québec 2014.
- [9] M.Leeftink, par J.Noël Documents Victron Energy : "Optimiser la vie des batteries plomb - Leçon V02"
- [10] V. BENAMARA, « étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage », Université de Québec, mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique 2012.
- [11] Mme. N. SAADALLAH Née CHAHMANA « Etude du mécanisme de réduction de PbO2 : Application de l'électrode à microcavité. » Thèse En vue de l'obtention du diplôme de doctorat en science Option : Génie électrochimique, université FERHAT ABBAS-SÉTIF faculté de technologie département de génie des procédés 2018.
- [12] M. ADDOU et A. BEDDIAF « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme », Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en électrotechnique, Université Abou Bekr Belkaïd– Tlemcen Faculté de technologie 2016.

- [13] H.Ahmed et A.Djamal «réalisation d'un régulateur de charge solaire » Mémoire de Fin d'Etudes de Master académique, université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU 2015.
- [14] <https://www.energizer.com/about-batteries/what-is-in-a-battery> mai 2022 .
- [15] <https://depts.washington.edu/matseed/batteries/MSE/classification.html> mai 2022 .
- [16] <https://byjus.com/chemistry/battery-types/> mai 2022 .
- [17] Akassewa Tchapo Singo. Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français.
- [18] Samuel C.Johnson F.Todd Davidson Joshua D.Rhodes Justin L.Coleman Shannon M.Bragg-Sitton Eric J.Dufek Michael E.Webber Storage and Hybridization of Nuclear Energy Techno-economic Integration of Renewable and Nuclear Energy 2019 .
- [19] P.Breeze, Large-Scale Batteries, Power System Energy Storage Technologies, 2018.
- [20] Energy Storage Technology Descriptions, Nickel-Metal Hydride Battery - EASE - European Association for Storage of Energy Avenue Lacombé 59/8 - B - 1030 Brussels .
- [21] Donald R. Sadoway et al., **Lithium–antimony–lead liquid metal battery for grid-level energy storage**, 348, NATURE, VOL 514, 16 October, 2014. Voir aussi <https://www.youtube.com/watch?v=Sddb0Khx0yA>, Juin 2022
- [22] [https://www.techopedia.com/definition/30835/lithium-iron-phosphate-battery-lfp-battery#:~:text=A%20lithium%20iron%20phosphate%20\(LFP,cathode%20material%3B%20hence%20the%20name](https://www.techopedia.com/definition/30835/lithium-iron-phosphate-battery-lfp-battery#:~:text=A%20lithium%20iron%20phosphate%20(LFP,cathode%20material%3B%20hence%20the%20name), Juillet 2022
- [23] <https://www.batterie-solaire.com/batterie-lithium-fer-phosphate>, Juillet 2022
- [24] <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/lithium-iron-phosphate-lifepo4-batteries>, Juillet 2022
- [25] E.T Ikram «State of the art in the field of energy storage and development prospects in Algeria» Mémoire pour l'obtention du diplôme de master, Ecole Supérieure en Sciences Appliquées-Tlemcen 2020 .
- [26] K.Sofiane et B.Salah «Calcul et dimensionnement électrique d'une mini centrale photovoltaïque autonome», Mémoire Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur, Ecole Supérieur en Sciences Appliquées-Tlemcen 2019.
- [27] T.Bilal et B.Fatima Zohra, Mémoire de Master «Modélisation et simulation d'une batterie à usage solaire photovoltaïque» Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2020/2021 .
- [28] Houssein Sweif. Système de gestion et de surveillance des batteries utilisées dans les systèmes d'alimentation sans interruption.Diplôme d'ingénieur CNAM en Electronique. 2013
- [29] Bencherif Mohammed, Mémoire de Master « Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome», Université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen, 2015
- [30] 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).
- [31] B.Mohammed, « Modélisation D'un Système de Captage Photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar (2008).
- [32] P.Manimekalai, R.Harikumar, S.Raghavan, An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems 2013

- [33] B. Rania, B. Yasmina « Etude et réalisation d'un régulateur de charge solaire » DIPLOME DE MASTER en Electronique industriel, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj 2021
- [34] James P. Dunlop, "Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems Fundamentals and Application", Florida Solar Energy Center/Université de Floride centrale, 15janvier1995
- [35] https://www.myshop-solaire.com/guide-de-montage-des-batteries-en-serie-parallele-r_80_a_20.html, Avril 2022
- [36] A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries Martin Murnane Solar PV Systems, Analog Devices, Inc. A.Ghazel

Chapitre 2

Modélisation et gestion intelligente de stockage par batterie

1 Introduction :

L'utilisation des énergies renouvelables comme source d'énergie électrique introduit des défis de gestion de la production, de la consommation et du stockage d'énergie, et ce à cause de l'intermittence de ce type d'énergie qui entraîne une inadéquation entre la consommation et la production d'électricité [1, 2] et une instabilité de la tension, mais aussi à cause de son dépendance de plusieurs conditions incontrôlables et parfois imprévisibles. Tout cela a poussé les chercheurs du domaine à faire des études afin de déterminer de nouvelles méthodes de gestion pour un bon fonctionnement du système énergétique en utilisant un système de stockage par batterie. Les technologies de stockage électrochimique sont très utilisées dans les installations photovoltaïques.

Dans ce chapitre nous présentons une modélisation du générateur photovoltaïque et du système de stockage électrochimique. Ensuite, nous définissons le système de gestion des batteries utilisé qui a pour rôle de minimiser l'absorption d'énergie du réseau correspondante aux pics de consommation des utilisateurs domestiques (charge électrique), tout en protégeant les batteries de se dégrader, en limitant la charge et la décharge, et en évitant des cycles charge/décharge rapide [3]. Ce système de gestion nécessite une prévision météorologique continue et bien déterminée, qui est parfois difficile à obtenir. D'autres systèmes de gestion intelligente des batteries ont été proposés [4].

2 Description du système énergétique :

Le système énergétique étudié est constitué principalement d'un générateur photovoltaïque comme source renouvelable d'énergie électrique, connecté à un système MPPT (traqueur du point maximum de puissance), d'un système de stockage par batteries connecté à un système de gestion de batteries SGB (BMS : battery management system en anglais), d'un convertisseur de puissance DC/AC relié en amont à ces deux blocs et en aval à un bus AC (voir figure (2.1)). Une charge électrique AC est branchée au bus AC. Aussi, le réseau électrique intervient dans les deux sens : Il peut fournir de l'énergie à la charge mais peut aussi extraire de l'électricité du surplus de l'énergie photovoltaïque.

Le SGB sert à mesurer le courant et la tension de la batterie et doit avoir accès à Internet pour pouvoir télécharger les données météorologiques nécessaires pour estimer la production d'électricité afin de la comparer avec les besoins en énergie de la charge, ce qui lui permet

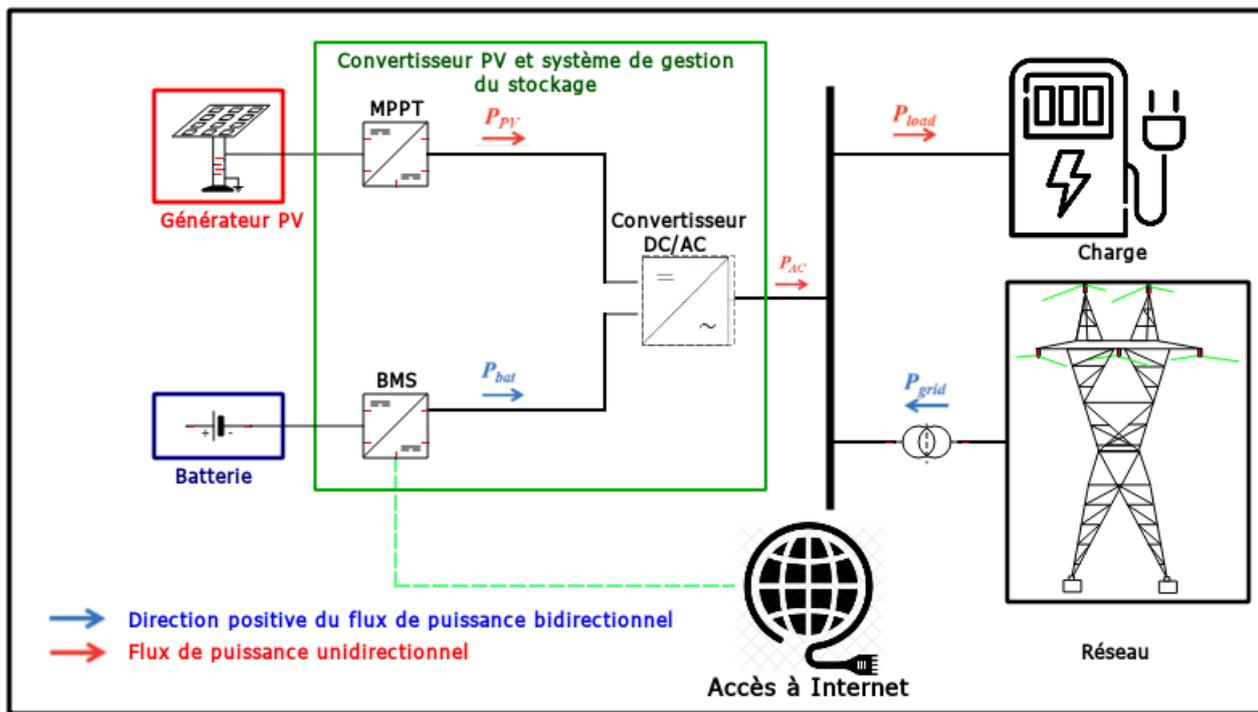


FIGURE 2.1 – Schéma d'un système photovoltaïque avec stockage par batterie relié au réseau accompagné d'un système de gestion de batteries.

d'établir la bonne stratégie en vue de diminuer les pics de consommation [5]. Nous présentons le prototype d'un système de gestion intelligente des batteries dans la figure (2.2) :

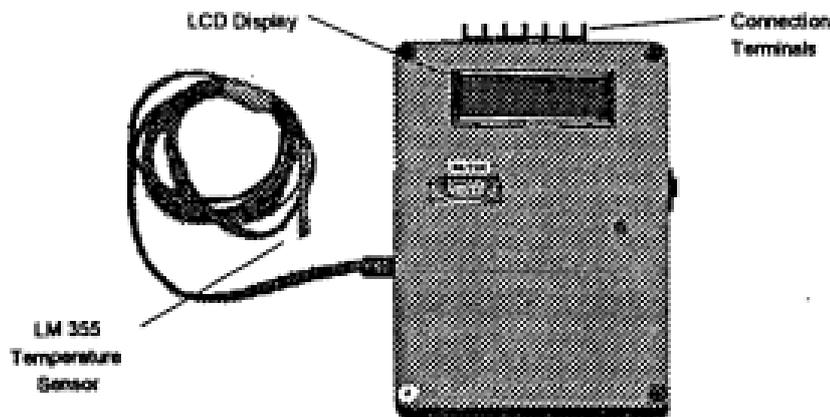


FIGURE 2.2 – Prototype d'un système de gestion de batteries (SGB).

Il faut noter que l'état de charge des batteries doit être mesuré continuellement dans le but d'estimer la capacité restante au niveau des batteries ; ce qui permet d'éviter plusieurs problèmes liés au cycle de charge/décharge (dégradation, surcharge, sous décharge etc.) pour ne pas endommager le système de stockage [5]. La figure (2.3) présente les fonctionnalités admises par le système de gestion.

Notons, d'autre part, un système MPPT (Maximum power point tracker, en anglais) est un dispositif électronique qui optimise, dans des conditions climatiques changeantes, l'extraction

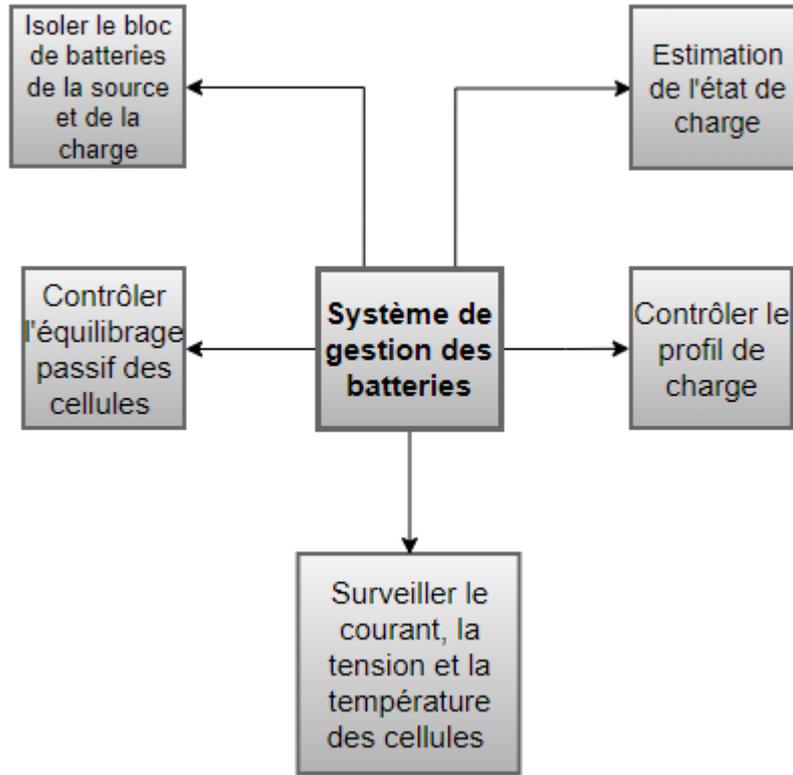


FIGURE 2.3 – Fonctionnalités d'un système de gestion de batteries SGB

d'énergie photovoltaïque des panneaux lorsque ceux-ci sont branchés à une charge électrique, elle aussi variable. Le système MPPT fait varier le point de fonctionnement électrique des modules de manière à ce que ces derniers puissent fournir la puissance maximale disponible. L'énergie supplémentaire récoltée par les modules est ensuite mise à disposition sous forme de courant de charge accru de la batterie [7]. Grosso modo, un système MPPT examine la sortie des panneaux et la compare à la tension de la batterie. Il utilise ensuite un algorithme pour calculer la meilleure puissance absolue que le panneau peut fournir. Il la convertit en la meilleure tension pour obtenir le maximum d'ampérage dans la batterie.

3 Modélisation du générateur photovoltaïque :

Pour déterminer l'énergie produite par le système photovoltaïque, un modèle proposé pour calculer la puissance en alternatif P_{AC} [8] donne :

$$P_{AC} = P_{n,pv} \frac{G}{G_{STC}} \eta_{mix} \eta_{therm} \eta_{DC/AC} \quad (2.1)$$

où $P_{n,pv}$ est la puissance nominale du générateur PV, G l'éclairement solaire en W/m^2 , G_{STC} l'éclairement dans des conditions standard, η_{mix} le rendement dû aux pertes d'origine environnementale et technique, η_{therm} le rendement dû aux pertes thermiques au niveau de la cellule photovoltaïque et $\eta_{DC/AC}$ le rendement causé par les pertes de conversion DC/AC. Le rendement η_{mix} peut être obtenu par la formule suivante :

$$\eta_{mix} = \eta_{sal} \eta_{rfl} \eta_{mis} \eta_{MPPT} \eta_{cable} \eta_{ombre} \quad (2.2)$$

où

- η_{sal} est un paramètre qui quantifie les pertes dues à la poussière qui s'accumule sur le panneau
- η_{refl} a une relation avec les pertes par réflexion sur le verre du panneau photovoltaïque
- η_{mis} est une estimation de la mauvaise adaptation (mismatch) qui conduit à une désagrégation des caractéristique I-V des modules PV.
- η_{MPPT} estime les pertes du traqueur qui n'arrive pas à bien déterminer le point maximal
- η_{cable} est causé par les pertes d'effet de joule des câbles utilisés
- η_{ombre} est causé par les pertes d'ombrage, qui représente le rapport entre la puissance produite par le panneau PV pour les différentes saisons en la présence d'ombrage du même endroit d'installation et la puissance produite sans ombrage, les deux puissance doivent être déterminées sous les mêmes conditions.

Le rendement dû aux pertes thermiques du générateur photovoltaïque η_{therm} est lié à la température de la cellule T_c déterminée par la formule suivante [8] :

$$T_c = T_a + (NOCT - 20) \frac{(NOCT - 20)}{G_{\text{NOCT}}} G \quad (2.3)$$

où T_a est la température ambiante, $NOCT$ la température de fonctionnement normale d'une cellule, donnée par le fabricant (dans notre cas, $NOCT = 45C$), G_{NOCT} l'éclairement solaire dans la condition $NOCT$ et égal à $800W/m^2$. Finalement, le rendement η_{therm} est donné par la formule suivante [5] :

$$\eta_{\text{therm}} = 1 - \gamma_{th}(TC - T_{\text{STC}}) \quad (2.4)$$

où $T_{\text{STC}} = 25C$ et γ_{th} est le facteur de température du panneau photovoltaïque calculé en ($\%/C$).

4 Modélisation du système de stockage :

Dans cette étude, nous utilisons un modèle simple de gestion des batteries qui consiste à déterminer l'évolution dans le temps de l'état de charge des batteries EDC_{bat} [5] ainsi que les tensions de charge et de décharge proposées par J.B Copetti et al [9]. Ce travail, basé sur des essais pratiques pour de multiples batteries de type plomb acide, reliées à un générateur photovoltaïque, détermine, à travers des équations mathématiques, la variation de la tension des batteries et le comportement de la résistance interne pendant le cycle de charge/décharge pour différents températures et courants $I(C_n)$ (par exemple, $I(C_{10}) = C_{10}/10$ est le courant délivré par une batterie de capacité nominale C_{10} qui correspond à une décharge pendant 10 heures). Ainsi, la relation entre la tension V_d d'une cellule de batterie, le courant I , l'état de charge EDC et la température de la cellule pendant la décharge d'une batterie est donnée par l'équation (2.5) [9] :

$$V_d = [2.085 - 0.12(1 - EDC)] - \frac{I_d}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_d^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (2.5)$$

où $\Delta T = T - T_{\text{ref}}$ est la variation de la température T de la batterie par rapport à une température de référence $T_{\text{ref}} = 25C$. Notons que le premier terme de l'équation (2.5) représente la variation de la tension de décharge en fonction de l'état de charge EDC de la cellule (concentration de l'électrolyte) alors que le second terme représente la variation de la tension due à la résistance interne de la cellule.

L'état de charge correspondant à cette équation est calculé suivant l'équation :

$$EDC(i) = EDC(i - 1) - \frac{Q}{C} \quad \text{pour } P_{\text{bat}} > 0 \quad (2.6)$$

où $Q = I_d \times t$ est la charge extraite de la cellule pendant la décharge lorsqu'un courant I_d circule pendant un temps t , et C la capacité actuelle de la batterie donnée par l'équation

$$\frac{C}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67(I_d/I_{10})^{0.9}}(1 + 0.005\Delta T) \quad (2.7)$$

où C est normalisée par rapport à la capacité nominale C_{10} . Notons ici que le courant de décharge est défini comme :

$$I_d = \frac{P_{ch} - P_{charge, \max}}{\eta_{ond} V_{ch, \text{ nominale}}} \quad (2.8)$$

où P_{ch} est la puissance demandée par la charge, $P_{charge, \max}$ une limite inférieure de la puissance de la charge au-dessus de laquelle les batteries se mettent à se décharger, η_{ond} le rendement de l'onduleur et $V_{ch, \text{ nominale}}$ la tension nominale de la charge (AC). La puissance de décharge des batteries s'écrit donc :

$$P_{d, \text{ bat}} = V_d \times I_d \times N_{\text{bat, série}} \times N_{\text{cell}} \quad (2.9)$$

où V_d est la tension de décharge d'une cellule, I_d le courant de décharge, $N_{\text{bat, série}}$ le nombre de batteries dans une branche et N_{cell} le nombre de cellules dans une batterie.

D'autre part, la tension de charge d'une cellule est donnée par l'équation suivante [9] :

$$V_c = [2 + 0.16 EDC] + \frac{I}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (2.10)$$

L'équation de la tension de charge dépend aussi de la capacité nominale C_{10} , du courant I , de la variation de température ΔT et de l'état de charge EDC . La détermination de l'état de charge lors de la recharge des batteries est beaucoup plus compliquée par rapport à la décharge. Nous avons proposé une fonction d'évolution de l'état de charge EDC des batteries pendant la charge

$$EDC(i) = EDC(i - 1) + \frac{\eta_{ch} I_c t}{C_{10} N_{\text{par}}} \quad \text{pour } P_{\text{bat}} < 0 \quad (2.11)$$

où η_{ch} est le rendement de charge des batteries, I_c le courant de charge, C_{10} la capacité nominale des batteries et N_{par} le nombre de branches parallèles dans le banc de batteries. Dans ce cas, la puissance de charge des batteries est donnée par :

$$P_{c, \text{ bat}} = \eta_c \times V_c \times I_c \times N_{\text{bat, série}} \times N_{\text{cell}} \quad (2.12)$$

où η_c est le rendement de charge des batteries, V_c la tension de charge d'une cellule, I_c le courant de charge, $N_{\text{bat, série}}$ le nombre de batteries dans une branche et N_{cell} le nombre de cellules dans une batterie. La figure (2.6) illustre l'organigramme de charge et de décharge des batteries.

D'autre part, une équation de l'efficacité de charge peut être définie par l'expression suivante [9] :

$$\eta_{cc} = 1 - \exp\left[\frac{a}{(I/I_{10}) + b}(EDC - 1)\right] \quad (2.13)$$

où a et b sont des paramètres liés au type de batterie. Les modèles qui permettent d'estimer l'état de santé EDS d'une batterie nécessitent une mesure continue de ses paramètres (la tension, le courant et la température des batteries). Pour cette raison, le calcul de l'EDS ne peut pas être effectué uniquement avec des simulations, mais aussi avec des études expérimentales.

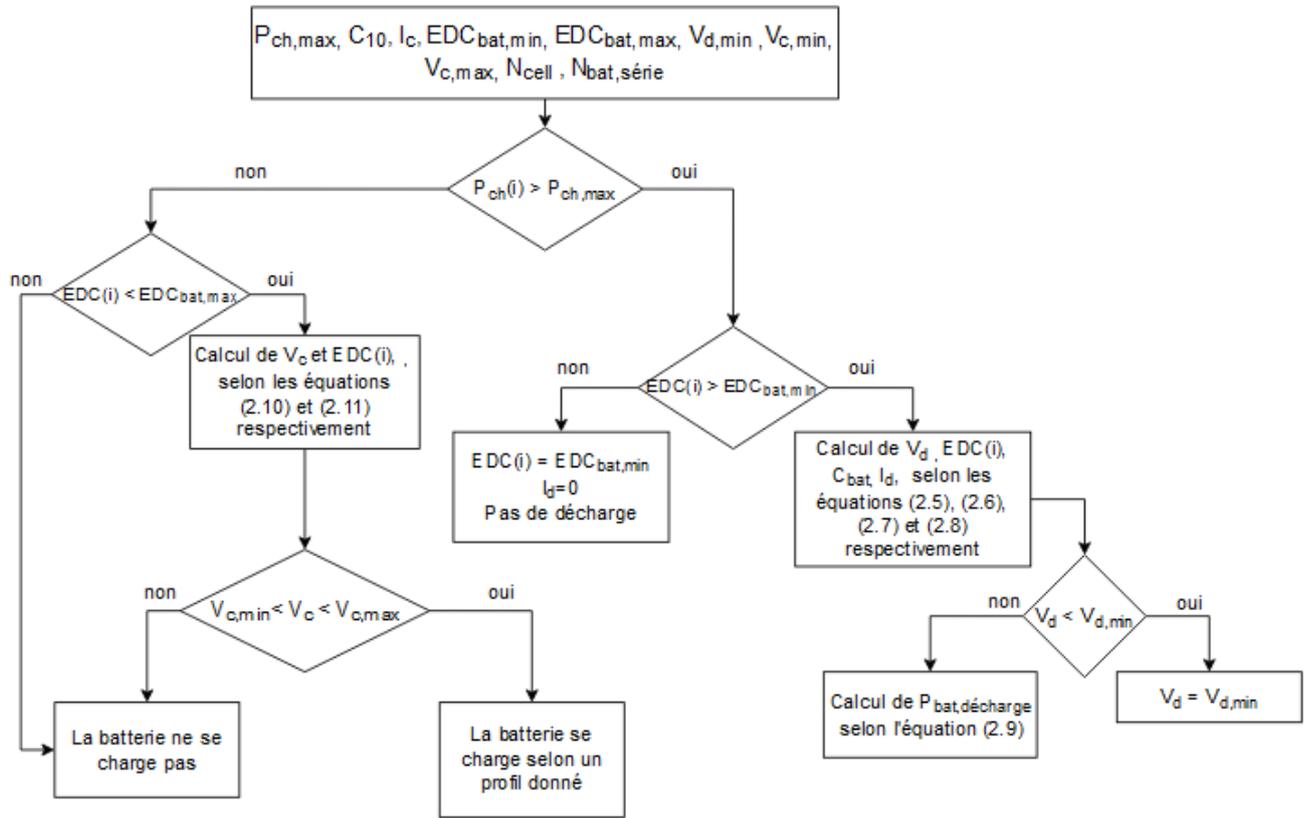


FIGURE 2.4 – Organigramme de charge et de décharge des batteries.

5 Gestion de stockage intelligente et bilan énergétique :

On propose un SGB qui définit de façon périodique et continu une stratégie qui permet de minimiser l'utilisation du réseau. On choisit la stratégie selon une sélection faite deux fois en 24 heures, pour satisfaire les besoins de la charge en énergie dans les pics de consommation. Dans notre système de gestion, on divise le jour en trois périodes horaires, la première est de 24h00 (minuit) à 6h00, la deuxième période est de 6h00 à 18h00 ou il y aura lieu de la production de l'énergie photovoltaïque, et la troisième et la dernière période est de 18h00 à minuit. Aussi, on fixe l'heure de la mise à jour de la stratégie à 18h00, auquel moment l'énergie électrique produite du générateur photovoltaïque n'est plus disponible. En ce moment, le système de gestion détermine la capacité stockée dans les batteries pour être utilisée dans la période suivante. Dans la présente étude, le réseau n'est pas utilisé pour charger les batteries, celles-ci se chargent donc seulement de 6h00 à 18h00 lorsque l'énergie photovoltaïque est disponible. Ainsi, de 18h (après midi) à 6h du matin, les batteries ne se chargent pas. En faisant la comparaison entre la production et la consommation estimées, le SGB fait un bilan énergétique provisoire de 1 jour, en utilisant le profil de la charge électrique à alimenter.

6 Temps total de décharge :

La détermination du temps total de décharge (TDT) est la première étape lors de la gestion des batteries. A 18h00, le système possède deux données : une prévision de la production photovoltaïque du jour suivant et la charge à alimenter de 6h00 à 18h00 et un bilan de ces deux données est alors établi. Si la production attendue est supérieure à la consommation, le

temps total de décharge des batteries sera égal à 12h. Dans la journée (6h00 à 18h00) l'énergie renouvelable produite sera automatiquement consommée par la charge, et le reste sera dirigé vers les batteries, ou bien injecté dans le réseau. Si par contre la consommation prévue est supérieure à la production du générateur photovoltaïque pendant ce jour-ci, où la production ne peut pas satisfaire la charge, alors l'énergie stockée doit minimiser la consommation pendant les deux 2 nuits qui viennent (la gestion du stockage est pour 2 journées à l'avance), et le TDT sera égal à 36h [9]. Le diagramme dans la figure (2.5) illustre la méthode de calcul du temps de décharge totale TDT .

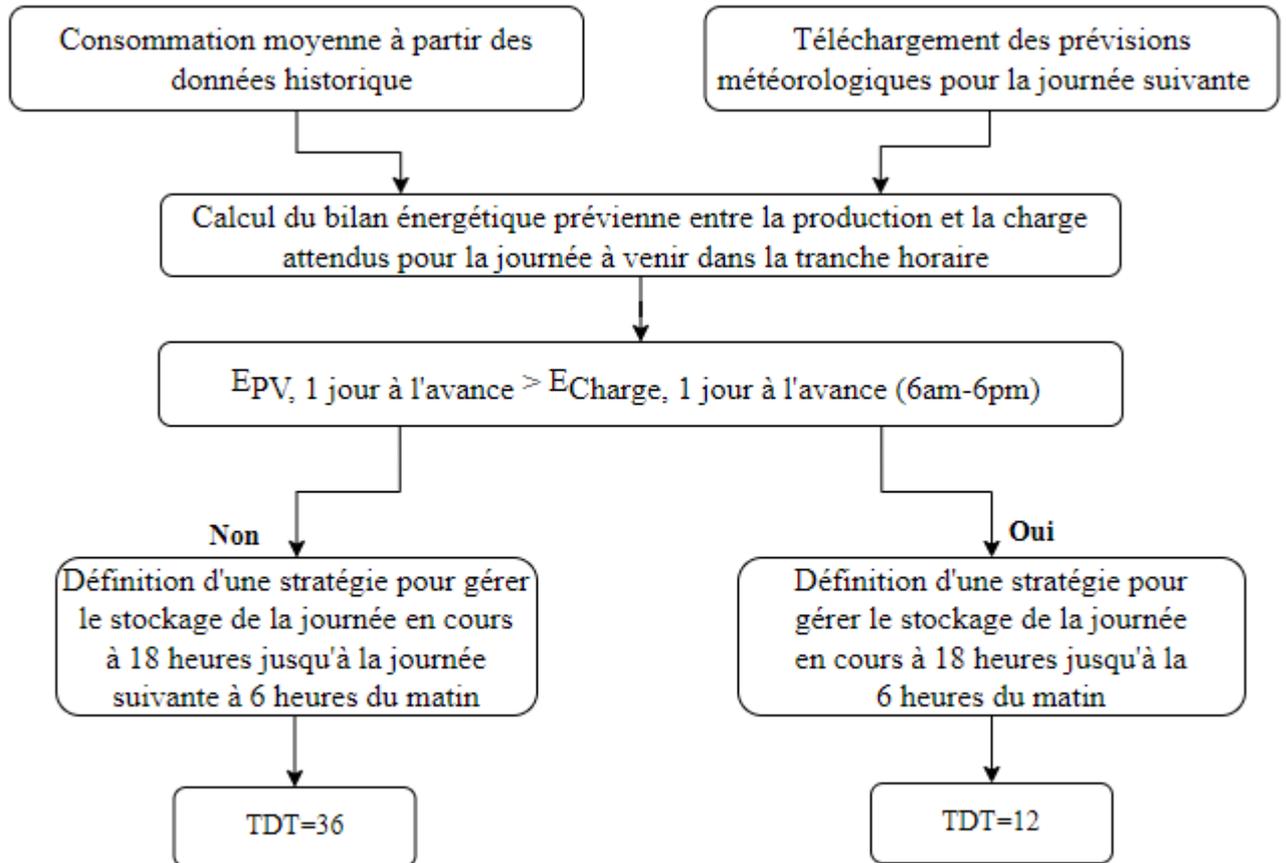


FIGURE 2.5 – Choix du temps de décharge totale TDT .

7 Choix de la stratégie de gestion des batteries :

Après la détermination du TDT , nous devons choisir la stratégie à suivre pour la gestion de la charge/décharge des batteries. Pour cela, à 18h00, le système de gestion des batteries (SGB) calcule l'état de charge du système de stockage, selon la capacité nominale des batteries, et en calculant l'EDC. L'énergie disponible dans les batteries est calculée, ce qui permet au SGB de bien déterminer l'énergie que le système de stockage peut fournir à la charge (l'énergie de décharge des batteries). Le SGB calcule aussi la consommation estimée pendant le temps de décharge et l'énergie produite prévue pendant 1 jour à l'avance. Ensuite, le SGB fait l'addition des deux énergies, celle stockée dans les batteries et celle produite par le générateur PV. Si la valeur calculée est inférieure à la consommation estimée (un déficit car la charge est élevée),

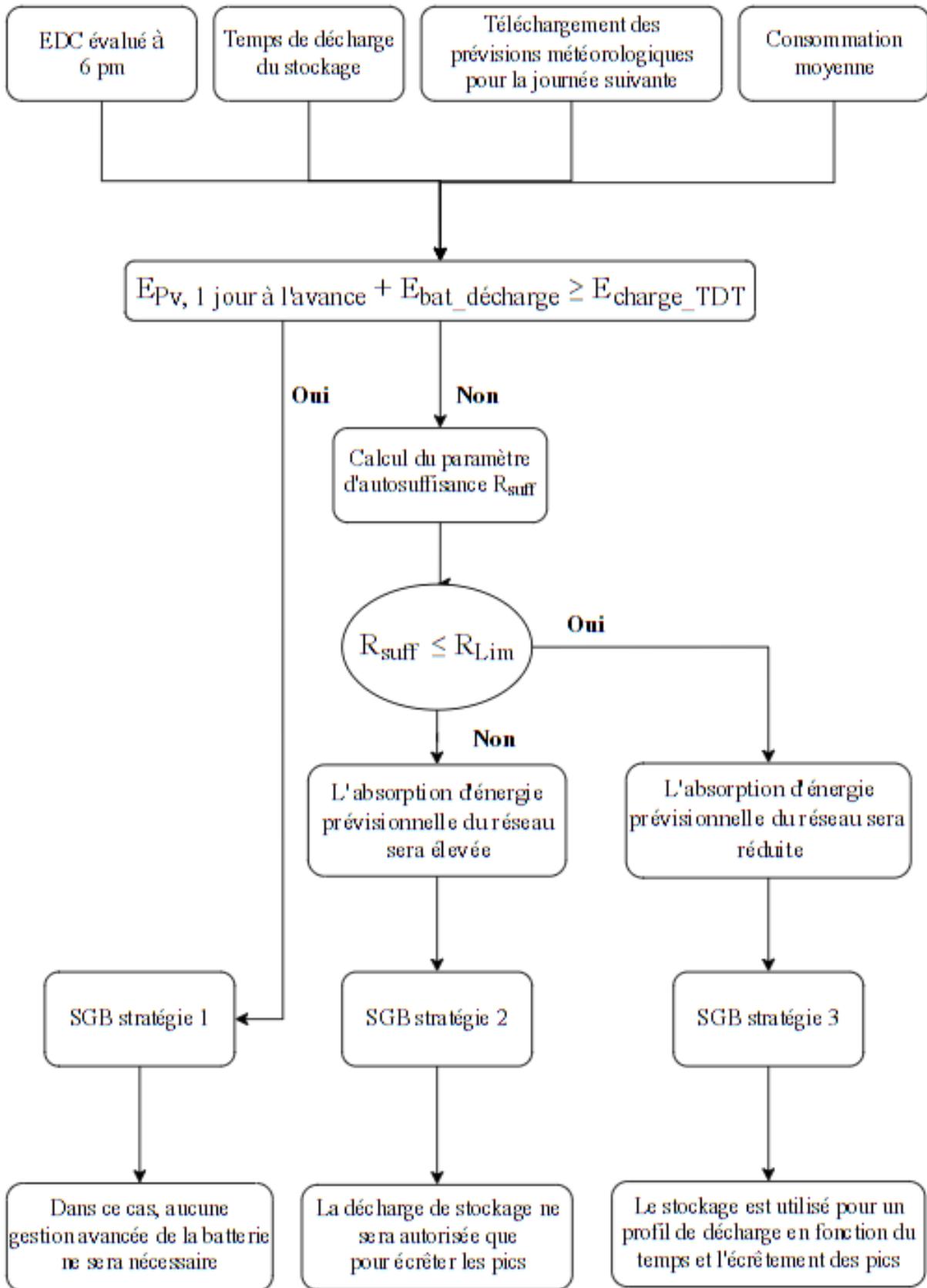


FIGURE 2.6 – Choix de la stratégie à suivre.

une stratégie dite d'écrêtement de pics (peak shaving, en anglais) sera utilisée (SGB2). Par contre, si la charge est inférieure à la somme des deux énergies (produite et stockée), une autre stratégie de profils de décharge appropriés est mise en oeuvre (SGB3). Autrement, si un surplus d'énergie (la consommation estimée est inférieure à la production PV et le stockage) existe, aucune gestion intelligente du système de stockage n'est nécessaire (SGB1). Enfin, pour trancher entre la stratégie 2 (SGB2) et la stratégie 3 (SGB3) on calcule un paramètre dit d'autosuffisance défini comme

$$R_{suff} = \frac{E_{PV,1jourl'avance} + E_{bat,dch}}{E_{ch,TDT}}$$

où $E_{PV,1jourl'avance}$ est l'énergie PV prévue pour la journée suivante, $E_{bat,dch}$ l'énergie à décharger stockée dans les batteries et $E_{ch,TDT}$ la charge locale provisionnelle pendant le TDT calculé. Le système de gestion fixe une valeur limite du paramètre d'autosuffisance R_{lim} comme seuil : Si $R_{suff} < R_{lim}$ le SGB choisit la stratégie SGB2 et utilise la capacité stockée pour minimiser l'absorption du réseau correspondante aux pics de consommation, et la charge est alimentée principalement avec le réseau. Dans le cas d'une consommation élevée, l'énergie restante dans le système de stockage sera utilisée lorsque la charge dépasse une certaine puissance $P_{ch,max}$ définie, elle aussi, par le système de gestion. D'autre part, si $1 > R_{suff} > R_{lim}$ le SGB adopte la stratégie SGB3. Dans ce cas, la plupart des charges seront alimentées par le générateur photovoltaïque et les batteries, et l'énergie absorbée du réseau est faible [9]. Le diagramme dans la figure (2.6) représente le processus de choix de la stratégie à utiliser.

8 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons donné une modélisation du système photovoltaïque ainsi que le système de stockage par batteries. Des expressions des tensions de charge en fonction des courants, de l'état de charge et de la température des batteries sont données. Ensuite, nous avons exposé la procédure suivie par le système de gestion afin de mener à bien le processus de charge/ décharge des batteries, en choisissant des stratégies basées sur la comparaison entre l'énergie consommée et les énergie produite et stockée en définissant tout d'abord le paramètre du temps total de décharge (TDT, total discharge time en anglais), puis un paramètre d'autosuffisance. Dans le chapitre suivant, nous exposerons les résultats de notre travail de simulation de la gestion de charge/décharge des batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau et nous les discuterons après.

Bibliographie

- [1] G. Narducci et al., Battery storage application for covering the mismatch between scheduled and CHP plant production. In : Proceedings of the 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC); Heraklion; 2017. pp.1-6
- [2] F. Spertino et al., Matching between electric generation and load : Hybrid PV-wind system and tertiary-sector users. In : Proceedings of the 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC); Trent; 2015. pp.1-6
- [3] M. Koller et al., Dening a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system. In : Proceedings of the 2013 IEEE Grenoble Conference; Grenoble; 2013. pp.1-6
- [4] I. Ranaweera et al., Control strategies for residential battery energy storage systems coupled with PV systems. In : Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC); Milan; 2017. pp.1-6
- [5] Filippo Spertino et al., A Smart Battery Management System for Photovoltaic Plants in Households Based on Raw Production Forecast, In book : Green Energy Advances, DOI : <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80562>
- [6] Shane Duryea, Syed Islam, William Lawrance, A Battery Management System for Stand Alone Photovoltaic Energy Systems, School of Electrical and Computer Engineering Curtin University of Technology, Perth, WA 6845, Australia, 1999
- [7] Sony Venugopal, Akshay S Aspalli, Raveendra. R, Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems
- [8] M. Muller et al., Evaluating the IEC 61215 Ed.3 NMOT procedure against the existing NOCT procedure with PV modules in a side-by-side configuration. In : Proceedings of the 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference; Austin, TX; 2012. pp.697-702
- [9] J. B. Copetti et al, A general battery model for PV system simulation,1993
- [10] M. Bentrar H.E Chaouche, Gestion intelligente de charge et de décharge de batteries pour un système photovoltaïque relié au réseau, mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master, école supérieure en sciences appliquées Tlemcen, 2021

Chapitre 3

Résultats et discussion

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation de la technique de gestion de charge/décharge de batteries pour un système relié au réseau électrique et utilisant une ressource d'énergie photovoltaïque en vue d'alimenter une charge électrique d'une unité administrative d'une société algérienne (habitat tertiaire) implantée dans la région de Tlemcen. Les coordonnées géographiques du site concerné par l'étude sont données dans le tableau (3.1).

Site	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Tlemcen	-1.317 (E)	34.882 (N)	800

TABLE 3.1 – Données géographiques du site de Tlemcen [1].

1 Paramètres de simulation

Dans notre travail, la période de gestion de charge/décharge de batteries s'étale de 1 mars à 18h (6 p.m) jusqu'au 4 mars à 6h (6 a.m). Pour cela, nous avons considéré l'éclairement solaire (en unité de W/m^2) et les températures ambiantes [2] (en C) du site pendant ces jours-ci à intervalle de 5 minutes de l'année 2004 [1] (cas typique).

D'autre part, nous donnons dans le tableau (3.2) les paramètres techniques du générateur photovoltaïque et dans le tableau (3.3) les paramètres techniques des batteries.

Notons que la gestion de charge/décharge des batteries est étudiée pour une puissance nominale du générateur photovoltaïque $P_{PV,n} = 18 kW$, une capacité nominale d'une batterie $C_{10} = 110 Ah$, avec un banc composé de 6 branches en parallèle contenant chacune 15 batterie de 12V. La puissance maximale de la charge satisfaite par le réseau en cas d'une stratégie d'élimination de pics de consommation, $P_{charge, max} = 7.5 kW$, et une valeur limite pour le paramètre d'auto-suffisance en alimentation, R_{suff} , égale à $R_{lim} = 0.5$.

2 Résultats et discussion

2.1 Temps de décharge totale

Nous exposons dans le tableau suivant (3.4) les valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site considéré. Ainsi, la valeur $TDT = 36$ pour 1 mars dicte le choix d'une stratégie de gestion qui s'étalera sur 36 heures à partir 18 h (6 p.m) du même jour jusqu'à 6h (6 a.m) du 3 mars. Aussi, $TDT = 12$ pour 3 mars dicte le choix d'une

Paramètre	Désignation	Valeur
γ_{th}	facteur de température de la puissance photovoltaïque (C)	0.005
η_{cabl}	pertes de joule	0.99
$\eta_{DC/AC}$	rendement du convertisseur	0.97
η_{sal}	pertes dues à la saleté	0.98
η_{mis}	pertes dues au mismatch	0.97
η_{MPPT}	rendement du traqueur de la puissance maximale du PV	0.99
$\eta_{réfl}$	pertes dues à la réflexion	0.97
η_{ombr}	pertes dues à l'ombrage	1.0
$NOCT$	température de fonctionnement nominale de cellule ($\%C$)	45
G_{NOCT}	éclairage solaire pour des conditions de $NOCT$ (W/m^2)	800
T_{STC}	température à des conditions standards de test (C)	25

TABLE 3.2 – Paramètres techniques du générateur photovoltaïque. Les valeurs numériques peuvent être vérifiées sur l'article [3] et les références qui s'y réfère.

Paramètre	Désignation	Valeur
$V_{cellule}$	tension nominale d'une cellule de batterie	2.0 V
$V_{batterie}$	tension nominale d'une batterie	12.0 V
$V_{c,limite,max}$	tension de charge limite maximum d'une cellule	2.45 V
$V_{c,limite,min}$	tension de charge limite minimum d'une cellule	2.26 V
$V_{d,limite,min}$	tension de décharge limite minimum d'une cellule	1.8 V
C_{10}	capacité nominale d'une batterie	110 Ah
I_{10}	courant nominal extrait de la batterie pendant 10h	11 A
EDC_{ini}	état de charge initial des batteries	0.9
EDC_{min}	état de charge minimal	0.5
EDC_{max}	état de charge maximal	0.95

TABLE 3.3 – Paramètres techniques des batteries. Les valeurs numériques peuvent être vérifiées sur l'article [3] et les références qui s'y réfère.

stratégie de gestion qui s'étalera sur 12 heures à partir de 18 h (6 p.m) du même jour jusqu'à 6h (6 a.m) du 4 mars. Dans notre travail, nous avons fait l'étude de gestion sur une période de 4 jours.

jour	TDT (h)
1	36
2	36
3	12
4	12
5	12
6	36
7	12
8	12
9	36
10	12
11	12
12	12
13	36
14	36
15	36
16	36
17	36
18	36
19	36
20	36
21	12
22	12
23	36
24	12
25	36
26	36
27	12
28	36
29	12
30	36
31	12

TABLE 3.4 – Valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site de Tlemcen .

2.2 Stratégie 2 pour la gestion de la charge/décharge des batteries

Le calcul du paramètre d'auto-suffisance en alimentation R_{suff} pour les présentes conditions de simulation pour la journée (entre 6 a.m et 6 p.m) du 2 mars (une journée en avant) donne une valeur égale à 0.32, donc inférieure à la valeur limite que nous avons choisie, à savoir $R_{lim} = 0.5$. Par conséquent, le choix de la stratégie 2 de gestion charge/ décharge des batteries pour la période entre 18 h (1 mars) et 6h (3 mars) s'impose. Rappelons que la stratégie 2 consiste à utiliser la charge des batteries pour éliminer seulement les pics de consommation supérieurs à $P_{charge, max} = 7.5 kW$.

La figure (3.1) représente les valeurs des puissances photovoltaïque fournie, du banc de batteries, du réseau électrique et de la charge électrique, exprimées en (W), ainsi que l'état de charge du système de stockage pour chaque 5 min pendant la période s'étalant de 18 h (6 pm

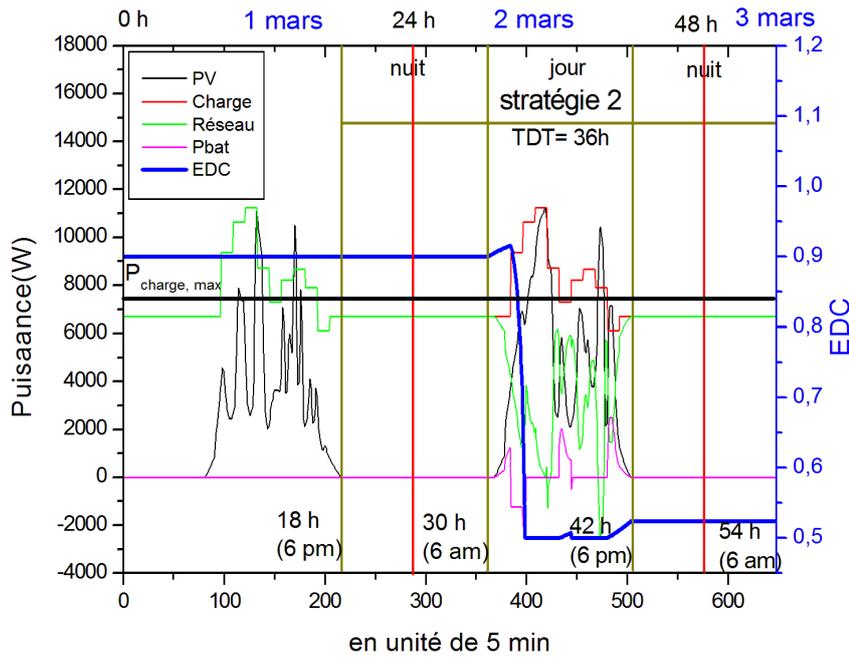


FIGURE 3.1 – Variation des puissances (en W) correspondant, respectivement, au générateur photovoltaïque, au réseau, aux batteries et à la charge électrique pendant la période entre 18 h (1 mars) et 6 h (3 mars) et ce pour la stratégie 2. La courbe représentant l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) est reportée sur le même graphe en bleu.

du 1 mars) à 54h (6 am du 3 mars) à une température des batteries égale à $T = 25$. Ainsi, l'état de charge EDC au début de l'étude (évalué à 18 h le 1 mars) est considéré égale à 90% de la capacité nominale (0.9). Dans la première nuit du 2 mars, les batteries ne se déchargent pas ($P_{bat} = 0$), comme cela est montré dans la figure (EDC constant), car la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximum $P_{charge, max} = 7.5 kW$ désignée par l'utilisateur. Ainsi, la charge est alimentée dans sa totalité par le réseau ($P_{réseau} = P_{charge}$), puisque dans la nuit, la puissance photovoltaïque est nulle ($P_{PV} = 0$). Dans la journée de 2 mars, les batteries commencent à se charger à partir de 30 h (6 am) lorsque l'énergie photovoltaïque est disponible et que la puissance de la charge est inférieure à $P_{charge, max} = 7.5 kW$ (pas de décharge). L'état de charge EDC atteint alors une valeur de 0.92 à 32 h (8 am du 2 mars) et les batteries se chargent à une puissance de $1.26 kW$. En ce moment précis, la puissance de la charge dépasse $P_{charge, max} = 7.5 kW$, ce qui entraîne la décharge des batteries (le processus de charge des batteries cesse) et l'état de charge des batteries passe d'une valeur de $EDC = 0.92$ à une valeur de $EDC = 0.5$ dans une période de temps égale à 1h et 20 minutes. Pendant ce temps, le banc de batteries délivre une puissance électrique qui peut atteindre une valeur de $2.5 kW$. Le processus de décharge s'interrompt car l'état de charge a atteint sa valeur minimum ($EDC = 0.5$). Dans ce cas, la différence de puissance sera prise en charge par le générateur photovoltaïque et le réseau. Nous avons même un surplus de puissance photovoltaïque qui sera vendu au réseau, d'où la valeur négative de $P_{réseau}$ vers 35h (11 heures du matin du 2 mars). Une période de charge des batteries apparaît vers 36 h (12 heures du 2 mars) avec une puissance maximum égale à $2 kW$ et qui dure une heure. Une fois la puissance de la charge dépasse $P_{charge, max} = 7.5 kW$ les batteries se mettent à se décharger mais juste sur une période de 5 minutes, puisque l'état de charge atteint sitôt la valeur de 0.5. L'état de charge étant égal à 0.5, les batteries ne se

déchargent pas, mais aussi elles ne se chargent pas puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée en ce moment à satisfaire la charge à l'aide du réseau. Vers 40 h (16 h du 2 mars), les batteries se mettent à se charger et la puissance de charge des batteries atteint une valeur maximum égale à $2.5 kW$. Cette période de charge des batteries dure presque 2 heures (1.9 heure). L'état de charge passe donc d'une valeur de $EDC = 0.50$ à une valeur de $EDC = 0.52$. Encore une fois, le surplus d'énergie photovoltaïque est vendu au réseau. Pendant la nuit du 3 mars, les batteries ne déchargent pas puisque la puissance de la charge est inférieure à $P_{charge, max} = 7.5 kW$. La charge est alors satisfaite par le réseau, à lui seul, puisque la puissance photovoltaïque est nulle.

2.3 Charge des batteries pendant la journée du 3 mars

Les batteries n'étant pas complètement chargées à la fin de la période de la stratégie 2 (à 6h du 3 mars), nous avons opté pour la charge des batteries, en profitant de l'abondance de l'énergie photovoltaïque pendant la journée du 3 mars, comme cela est indiqué sur la figure (3.2). En effet, les batteries commencent à se charger dès l'avènement de la puissance photovoltaïque à 6h du matin du 3 mars (54 h) et l'état de charge débute à une valeur $EDC = 0.52$ et atteint une valeur de $EDC = 0.92$ en fin de journée (6 pm du 3 mars). La puissance délivrée aux batteries (valeur positive) atteint une valeur maximum de $5.06 kW$ vers 61 h (13 h du 3 mars). La charge est complètement satisfaite par la puissance photovoltaïque avec des insuffisances comblées par le réseau. La puissance photovoltaïque étant abondante ce jour-ci, une partie de celle-ci est vendue au réseau, d'où le signe négative de la puissance du réseau.

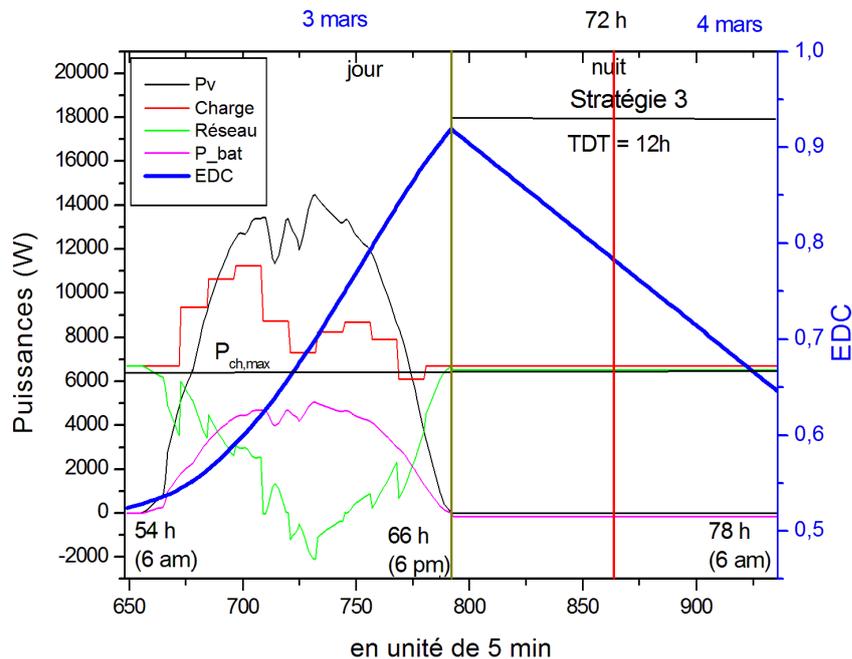


FIGURE 3.2 – Variation des puissances (en W) correspondant, respectivement, au générateur photovoltaïque, au réseau, aux batteries et à la charge électrique pendant la période entre 54 h (3 mars) et 78h (4 mars) et ce pour la stratégie 3. La courbe représentant l'état de charge EDC des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) est reportée sur le même graphe en bleu. La puissance de charge maximale au delà de laquelle les batteries se déchargent est $P_{charge, max} = 6.45 kW$. La chute de la valeur de EDC est lente.

2.4 Stratégie 3 pour la gestion de la charge/décharge des batteries

La valeur du paramètre d'auto-suffisance en alimentation R_{suff} pour la période entre 18 h (6 p.m) du 3 mars et 6h (6 a.m) du 4 mars étant égale à 0.85 (supérieure à $R_{lim} = 0.5$ et inférieure à 1), il serait judicieux d'appliquer la stratégie 3 de la gestion de la charge/ décharge des batteries, laquelle consiste à adopter un profil de déchargement dépendant du temps ainsi que l'élimination des pics de consommation. Cependant, il est clair de la figure (3.2) que, pendant cette période, la charge électrique manque de pics de consommation et la puissance de la charge est inférieure à $P_{charge, max} = 7.5 kW$. Afin de pouvoir appliquer la stratégie 3 à la décharge des batteries nous avons rabaisé la valeur de la puissance de charge maximum à une valeur égale à $P_{charge, max} = 6.45 kW$. D'autre part, le courant de décharge I_d est donné par

$$I_d = \frac{P_{charge} - P_{charge, max}}{\eta_{onduleur} V_{charge\ nominale}} \quad (3.1)$$

où P_{charge} est la puissance de la charge, $P_{charge, max}$ la puissance maximum de la charge à ne pas fournir par les batteries, $\eta_{onduleur}$ efficacité du convertisseur DC/AC et $V_{charge\ nominale}$ la tension nominale de la charge (AC).

Ainsi, pendant la nuit du 4 mars à partir de 6h (18 h du 3 mars) les batteries se mettent à se décharger à partir d'un état de charge $EDC = 0.92$ jusqu'à atteindre une valeur de $EDC = 0.648$ à 78 h(6 am du 4 mars). La puissance délivrée par les batteries pendant cette période est égale à 200 W (très petite). Un autre profil de décharge est présenté sur la figure (3.3) où le processus de décharge est plus court que le premier, puisque l'état de charge des batteries EDC atteint la valeur de 0.5 en une période de 2 heures. La puissance délivrée par les batteries est égale à 1 kW. La charge est alors satisfaite par le réseau.

Notons que les processus de charge et de décharge des batteries sont contrôlés par plusieurs paramètres : l'état de charge des batteries, la présence de la puissance photovoltaïque, la valeur de la puissance de la charge électrique, mais aussi par les tensions des batteries qui ne doivent pas dépasser certaines valeurs spécifiées par le fabricant afin de protéger les batteries et ainsi allonger la durée de vie de ces dernières. C'est dans cet esprit que nous avons calculé les tensions et les courants de charge/décharge des batteries pendant toute la période de gestion en utilisant des expressions des tensions de charge/ décharge des cellules de batteries déjà mentionnées dans le chapitre précédent.

Ainsi, la figure (3.4) illustre la variation des tensions (d'une cellule) et des courants de charge en fonction du temps (au pas de 5 min) dans la journée de 2 mars pour la stratégie 2 et ce pour deux températures de batteries différentes $T = 25, 35 C$. Les tensions de charge des cellules sont comprises entre 2.26 V (tension minimale) et 2.45 V (tension maximale), alors que le courant de charge atteint une valeur maximum de 2.5 A. En effet, les batteries, à $T = 25 C$ (figure à gauche), commencent à se charger à partir de 6 am du 2 mars à une tension constante de 2.45 V et un courant qui diminue à partir de 2.5 A jusqu'à atteindre la valeur de 0.35 A pour s'y stabiliser, alors que la tension chute vers une valeur de 2.43 V puis augmente pour atteindre la valeur 2.44 V. A ce point là, l'état de charge des batteries a atteint une valeur de 0.92. La charge des batteries s'interrompt au début de déchargement des batteries à cause d'un pic de consommation supérieur à la limite $P_{charge, max} = 7.5 kW$ désignée par le gérant. Une deuxième période de charge apparait à midi avec une tension constante de la cellule égale à 2.45 V et un courant de charge qui varie entre 0.35 A et 0.1 A, laquelle est suivie par une autre période de charge (à partir de 16 h) à une tension de 2.45 V et un courant qui diminue jusqu'à s'annuler. Sur la même figure à droite est illustrée la variation des tensions et des courants de charge pour la stratégie 2 et ce pour une température de la batterie égale à $T = 35$. Nous constatons que la chute du courant de charge est légèrement rapide pour une température $T = 35C$ que celle

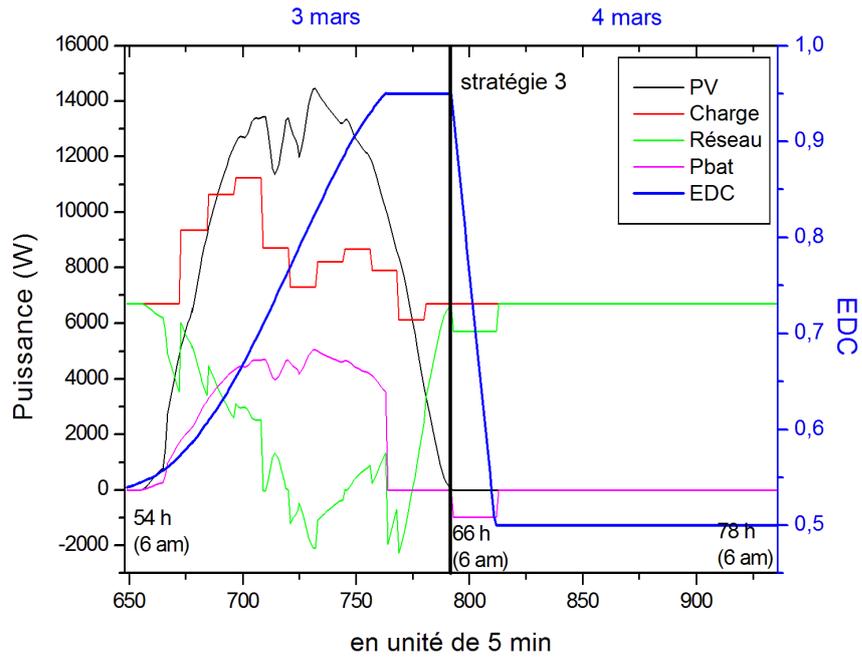


FIGURE 3.3 – Variation des puissances (en W) correspondant, respectivement, au générateur photovoltaïque, au réseau, aux batteries et à la charge électrique pendant la période entre 54 h (3 mars) et 78h (4 mars) et ce pour la stratégie 3. La courbe représentant l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) est reportée sur le même graphe en bleu. La puissance de charge maximale au delà de laquelle les batteries se déchargent est $P_{\text{charge, max}} = 6.45 \text{ kW}$. La chute de la valeur de EDC est rapide.

pour une température $T = 25C$. Aussi, la tension de charge à $T = 35C$ a une augmentation plus prononcée que celle pour une température $T = 25C$. Apparemment, la température a un effet d'accélération du processus de charge au sein des batteries.

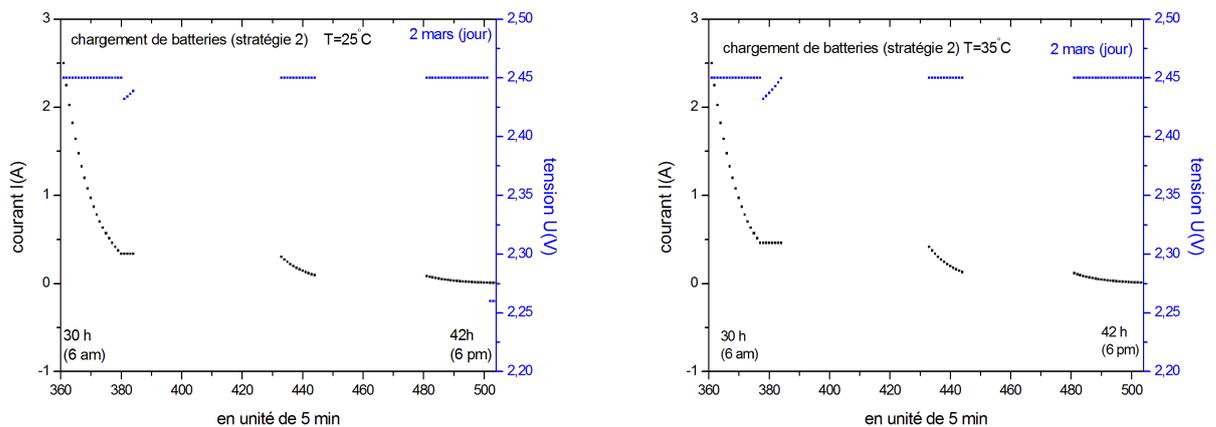


FIGURE 3.4 – Variation de la tension d'une cellule de batteries et du courant de charge pour la stratégie 2 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.

D'autre part, la figure (3.5) illustre la variation des tensions (d'une cellule) et des courants

de charge en fonction du temps (au pas de 5 min) dans la journée de 3 mars pour la stratégie 3 et ce pour deux températures de batteries différentes $T = 25, 35 C$. Les tensions de charge des cellules sont comprises entre $2.42 V$ et $2.45 V$ (tension maximale), alors que le courant de charge atteint une valeur maximum de $2.5 A$ et peut descendre jusqu'à une valeur de $0.5 A$. En effet, les batteries, à $T = 25 C$ (figure à gauche), commencent à se charger à partir de 6 am du 3 mars (abondance de la puissance photovoltaïque) à une tension constante de $2.45 V$ et un courant qui diminue à partir de $2.5 A$. La charge des batteries se fait à des tensions qui augmentent pendant que le courant reste constant. Les périodes de chargent se succèdent de la sorte avec des paliers de courants de charge de moins en moins élevées. Dans la dernière séquence de charge, le courant a augmenté vers une valeur de $2.5 A$ avec une tension qui atteint $2.434 A$. Notons que la charge des batteries s'interrompt lorsque le EDC atteint une valeur de 0.95 (protection des batteries). Sur la même figure à droite est illustrée la variation des tensions et des courants de charge pour la stratégie 3 et ce pour une température de la batterie égale à $T = 35 C$. Encore une fois, la chute du courant de charge est légèrement rapide pour une température $T = 35 C$ que celle pour une température $T = 25 C$. Aussi, la tension de charge à $T = 35 C$ ($U = 2.441 V$) a une augmentation plus prononcée que celle pour une température $T = 25 C$ ($U = 2.434 V$).

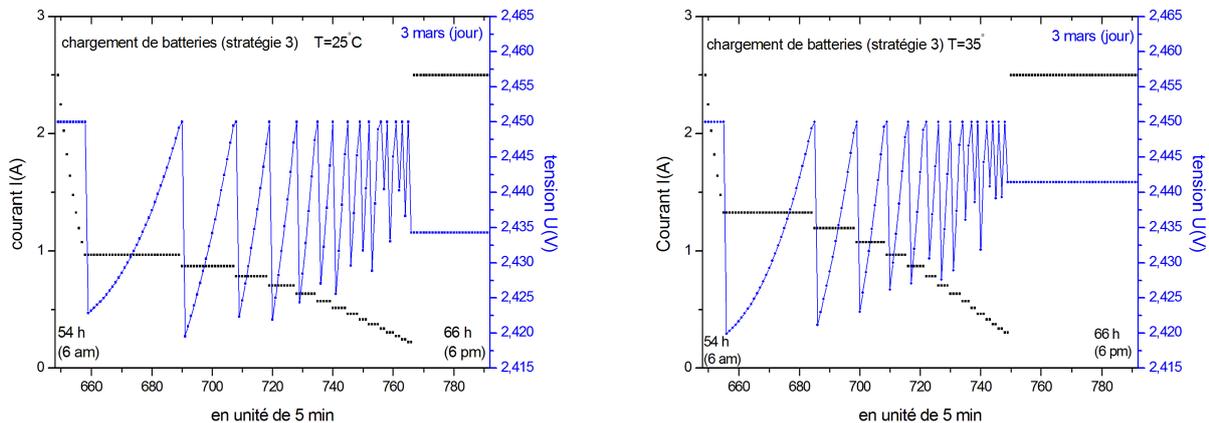


FIGURE 3.5 – Variation de la tension d'une cellule de batteries et du courant de charge pour la stratégie 3 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25 C$, à droite $T = 35 C$.

Concernant la décharge des batteries, on illustre sur la figure (3.6) la variation des tensions et des courants de décharge pour la stratégie 2 pour deux températures $T = 25, 35 C$. La décharge des batteries est déclenchée une fois la puissance de charge est supérieure à $P_{\text{charge, max}} = 7.5 kW$ et que l'état de charge EDC est au dessus de 0.5 . Notons que les batteries ne se déchargent pas dans la nuit de 2 mars car la puissance demandée par la charge est inférieure à $P_{\text{charge, max}} = 7.5 kW$. Trois périodes de décharge plus ou moins courtes apparaissent dans la journée de 2 mars. Une première décharge se fait à un courant $I = 9.5 A$ et une tension (de cellule) minimale de $U = 1.8 V$ (désignée par le gérant). Une deuxième décharge, plus courte, apparait à un courant $I = 16 A$ et une tension de $U = 1.8 V$. A ce point, la décharge s'interrompt car le EDC a atteint sa valeur minimale de 0.5 . Une très courte décharge s'ensuit pendant 5 min, puis s'arrête. Pour la même période, à température $T = 35 C$, les séquences de déchargent se ressemblent presque, à une différence minime pour le temps de décharge.

Pour la nuit de 4 mars, la figure (3.7) illustre la variation des tensions et des courants de décharge pour la stratégie 3 pour deux températures $T = 25, 35 C$. La décharge des batteries, à $T = 25 C$, se fait toute la nuit à un courant constant de décharge égal à $I = 1.3 A$ et une tension

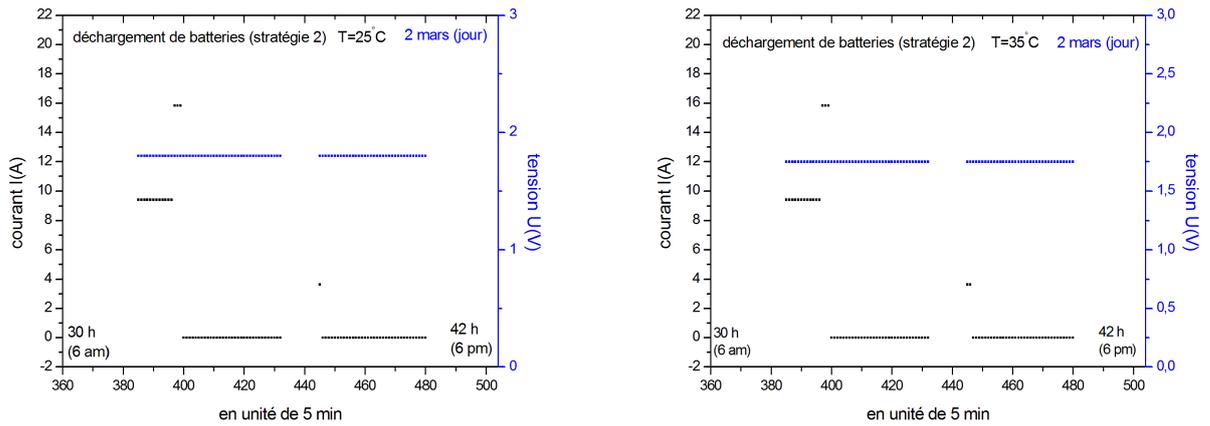


FIGURE 3.6 – Variation de la tension d’une cellule de batteries et du courant de décharge pour la stratégie 2 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.

constante de $U = 1.8 V$, sous la condition que EDC ne tombe pas au-dessous de 0.5. Pour une température de $T = 35C$, le courant de décharge est égal à $I = 1.3 A$ (constant) alors que la tension de décharge est partie d’une valeur de $U = 1.81 V$ en diminuant pour se stabiliser à la valeur $U = 1.80 V$.

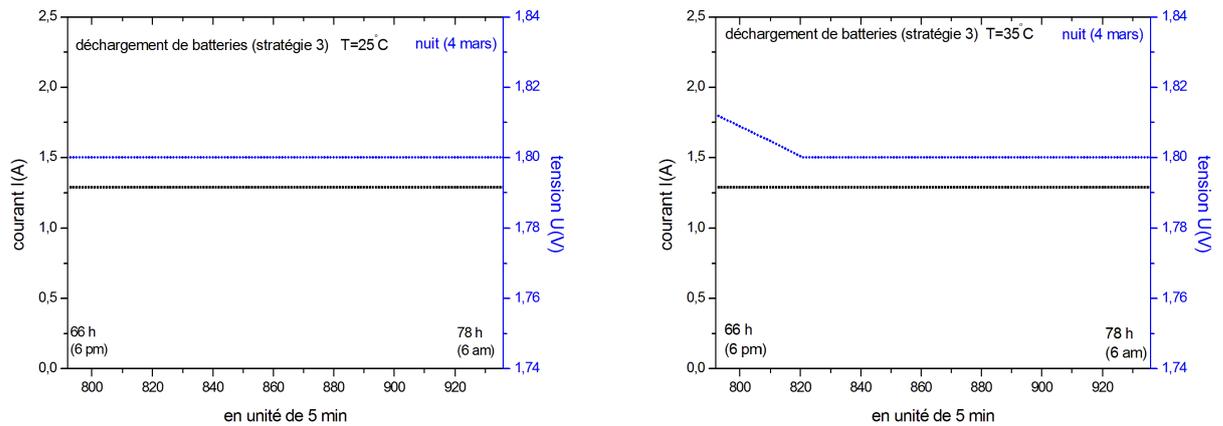


FIGURE 3.7 – Variation de la tension d’une cellule de batteries et du courant de décharge pour la stratégie 3 et ce pour deux températures des batteries : à gauche $T = 25C$, à droite $T = 35C$.

3 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré pour les résultats de simulation de la méthode de gestion de charge/décharge dédiée aux batteries, nous avons présenté dans les figures la variation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque, la puissance offerte par le réseau, la puissance de la demande par la charge, la puissance de la batterie et l’état de charge des batteries chaque 5 minutes, le travail a été fait pour la période du 1^{er} mars jusqu’au 4 mars, deux stratégies ont été utilisé pour la gestion du système de stockage, la stratégie 2 et la stratégie

3, le TDT trouvé en 1^{er} mars à 18h était de 36h (une journée et deux nuits), nous avons choisi la stratégie 2 pour cette période car le paramètre R_{suff} était inférieur à R_{lim} , cette stratégie consiste à décharger les batteries que s'il y aura lieu aux pics de consommation, dans la nuit, le réseau fourni toute la puissance demandée par la charge, dans le 3 mars à 18h, le TDT trouvé était de 12h, après avoir calculé le paramètre R_{suff} , la stratégie 3 à été maintenu, cette stratégie consiste à décharger les batteries quand il s'agit des pics de consommation, et dans la nuit pour réduire l'absorption du réseau (la stratégie offre des profils de décharge en fonction du temps), cette gestion du système de stockage nous permet de réduire la dépendance du réseau et parfois même de vendre le surplus d'énergie produite par le générateur photovoltaïque une fois les batteries sont pleinement chargées. La gestion intelligente est faite par un outil relié aux batteries, il doit avoir accès à internet et dans ce cas aucune intervention humaine ne sera requise, cette étude peut être faite pendant une longue durée à savoir quelques mois de l'année, cela assure une fiabilité importante du système de stockage. .

Bibliographie

- [1] <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>, Juin 2022
- [2] M. Bentrar et H. Chaouche, **Dimensionnement optimal d'un système énergétique hybride solaire-éolien-batteries utilisant la technique LPSP**, mémoire d'ingénieur, ESSA-Tlemcen (2021).
- [3] Filippo Spertino et al., **A Smart Battery Management System for Photovoltaic Plants in Households Based on Raw Production Forecast**, In book : Green Energy Advances, DOI : <http://dx.doi.org/10.5772/intecopen.80562>

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de mémoire de master se concentre sur la gestion intelligente de charge/décharge d'un système de stockage électrochimique pour l'alimentation d'une charge électrique (unité administrative) en utilisant un générateur photovoltaïque avec connexion au réseau électrique. Cette gestion s'étale sur 4 jours du mois de mars 2004 (du premier au 4 mars) et consiste à gérer la charge/décharge des batteries selon les valeurs des paramètres désignés par le gérant, à savoir l'état de charge des batteries, la disponibilité de la puissance photovoltaïque, la demande de la charge qui dépasse une certaine limite arrêtée par le gérant, mais aussi des tensions limites des batteries lors de la charge et la décharge. Le but de ces restrictions est de protéger les batteries des risques que peut causer une décharge profonde ou une surcharge, ce qui améliorera la durée de vie des batteries. L'auto décharge est considérée négligeable car les batteries sont presque toujours en fonctionnement continu. Les batteries ne se chargent qu'avec le surplus d'énergie produite par le générateur photovoltaïque et se déchargent pour écrêter des pics de consommation. La différence de puissance est fournie par le réseau.

La gestion des batteries utilise deux stratégies pour la charge/décharge dont le choix s'appuie sur la détermination de deux paramètres : le temps de décharge totale TDT et le paramètre d'autosuffisance R_{suff} . La stratégie 2 consiste à décharger les batteries juste pour écrêter les pics de consommation. Toutefois, nous nous sommes permis de charger les batteries à chaque fois que la puissance photovoltaïque est disponible et que les batteries ne se déchargent pas. D'autre part, la stratégie 3 a pour but d'écrêter, elle aussi, les pics de consommation et de proposer un profil de décharge pendant la nuit. Notons que la stratégie 1 ne nécessite aucune intervention de la part du système de gestion. Pendant toute la période de gestion, nous veillons à ce que l'état de charge des batteries ne dépasse pas les deux limites : $EDC = 0.95$ (limite supérieure) et $EDC = 0.5$ (limite inférieure), mais aussi que la tension de charge des cellules de batterie ne sorte pas de l'intervalle $[2.26 V, 2.45 V]$ et la tension de décharge ne passe pas au dessous de $1.8 V$ et ce dans le but de protéger les batteries.

Les résultats obtenus par simulation sont présentés sous forme de figures où les courbes de puissance des différents éléments du système énergétique sont superposées à la courbe de l'état de charge des batteries pour les deux stratégies. La variation des tensions et des courants de charge/décharge est aussi illustrée sur des figures.

Enfin, la présente étude nous a permis dans un premier temps d'assimiler la procédure de gestion de charge/décharge de batterie dans un système énergétique (relié au réseau) composé d'un générateur photovoltaïque et d'un banc de batteries. Ensuite, nous avons établi un code numérique qui permet la gestion de la procédure de charge/décharge tout en respectant les restrictions imposées en vue de protéger les batteries des risques et d'améliorer leur durée de vie.

Comme perspectives, il serait utile dans le futur d'améliorer davantage le code de gestion de la procédure charge/décharge afin de tenir en compte de tous les paramètres physiques qui interviennent dans cette procédure. Il serait aussi utile de prolonger la période de gestion de la charge/décharge pour plus de fiabilité de la procédure.