

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 :
BENTRAR Mohamed
CHAUCHE Hibet Errahmen

Thème

**Gestion intelligente de charge et de décharge
de batteries pour un système photovoltaïque
relié au réseau**

Soutenu publiquement, le 27 / 09 /2021, devant le jury composé de :

Mme I. Bousmaha	MCB	ESSA Tlemcen	Présidente
Mr. M. Mebrouki	MCA	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. A. Kerboua	MCA	ESSA Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mr F. Boukli Hacène	Pr.	ESSA Tlemcen	Examineur
Mme M. Bouchaour	MCA	Univ. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2020 /2021

Abréviations

1. STEP : Station de transfert d'énergie par pompage
2. SEAC : Stockage d'énergie par air comprimé (CAES, en anglais)
3. SESM : Stockage d'énergie par super-conduction magnétique (SMES, en anglais)
4. SGB : Système de gestion de batteries
5. PDD : Profondeur de décharge (DOD en anglais)
6. EDC : État de charge (SOC, en anglais)

Résumé

Ce mémoire est consacré à une technique de gestion de charge et de décharge de batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau. Ladite technique consiste à choisir entre deux stratégies de gestion de stockage : la première se limite à écrêter des pics de consommation lorsque la production d'énergie photovoltaïque est faible et n'arrive pas à couvrir la charge électrique, alors que la seconde, appliquée lorsque la production de l'énergie photovoltaïque est abondante, vise à adopter des profils de décharge adaptés aux restrictions de charge et décharge des batteries afin d'éviter leur endommagement rapide. La gestion intelligente de charge et de décharge des batteries permet d'assurer une longue durée de vie des batteries et une bonne exploitation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et même à vendre l'excès d'énergie au réseau.

Abstract

This dissertation is devoted to a technique for management of the charging and discharging of batteries in a grid-connected photovoltaic system. This technique consists in choosing between two storage management strategies : the first one is limited to peak shaving when the photovoltaic energy production is low and cannot cover the electrical load, while the second one, applied when the photovoltaic energy production is abundant, aims at adopting discharge profiles adapted to the charge and discharge restrictions of the batteries in order to avoid their rapid damage. The intelligent management of battery charging and discharging ensures a long battery life and a good use of the energy produced by the photovoltaic generator and even selling the surplus energy to the grid.

ملخص

هذه الأطروحة مخصصة لتقنية إدارة شحن وتفريغ البطاريات في نظام كهروضوئي متصل بالشبكة. تتمثل هذه التقنية في الاختيار بين استراتيجيتين لإدارة التخزين: الأولى تقتصر على التخلص من ذروات الأستهلاك عندما يكون إنتاج الطاقة الكهروضوئية منخفضًا ولا يمكن أن يغطي الحمل الكهربائي ، بينما الثانية ، والتي تُطبق عندما يكون إنتاج الطاقة الكهروضوئية وفيرًا ، تهدف إلى تبني منحنيات تفريغ متكيفة مع قيود الشحن والتفريغ للبطاريات من أجل تجنب تلفها السريع. تضمن الإدارة الذكية لشحن البطارية وتفريغها عمرًا طويلًا للبطارية واستخدامًا جيدًا للطاقة التي ينتجها المولد الكهروضوئي وحتى بيع الطاقة الفائضة للشبكة.

À mes chers parents.

Hibet Errahman

J

e dédie ce travail :

- à ma mère et mon père pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien durant mon travail.
- à mes sœurs, je leur souhaite une vie pleine de succès et de réussite
- à toute ma famille, petite et grande
- à tous mes enseignants depuis le primaire jusqu' à maintenant
- Enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.

BENTRAR MOHAMED

Remerciements

C'est très simple, en se basant sur la traduction d'une parole du Prophète Mohammed (que la prière d'Allah et son salut soient sur lui) qui disait : **Celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas Allah.**

Alors, nous sommes très heureux de trouver sur cette page l'occasion de rendre hommage et de remercier tous ceux qui ont participé à notre grande aventure scientifique et à notre succès.

Tout d'abord, nous aimerions exprimer notre profonde gratitude à monsieur Mebrouki Mohamed (encadreur) et à monsieur Kerboua Abdelfatah (co encadreur) de ce travail pour nous avoir donné le souffle de vie, la force, leur esprit critique, leur soutien et leurs conseils ainsi que l'intelligence nécessaire pour accomplir ce mémoire.

Nous voudrions aussi remercier également les membres du jury madame I. Bousmaha, madame M. Bouchaour et monsieur F. Boukli-Hacène qui nous rendent honneur en acceptant d'examiner notre modeste travail. Leur présence, l'intérêt qu'ils portent à notre projet, les conseils et les remarques qu'ils nous apporteront ne pourraient qu'enrichir ce travail. Enfin, nous remercions tous ceux 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 Stockage d'énergie	3
1 État de consommation mondiale de l'énergie	3
2 Types de stockage	3
2.1 Stockage mécanique	4
2.2 Stockage électrique	4
2.3 Stockage chimique	5
2.4 Stockage thermique	7
3 Batteries d'accumulateurs	7
3.1 Fonctionnement d'une batterie	7
3.2 Composants d'une batterie	8
3.3 Caractéristiques d'une batterie	9
4 Types de batterie	11
4.1 Batterie à base de plomb-acide	12
4.2 Batterie à base de Nickel-Cadmium	12
4.3 Batterie nickel- hydrure métallique	12
4.4 Batteries à base d'ions lithium	12
4.5 Comparaison entre accumulateurs	13
5 Enjeux de la conception des batteries grâce à la modélisation et à la simulation :	13
6 Conclusion	15
Bibliographie	17
2 Gestion intelligente de charge et de décharge de batteries	19
1 Introduction	19
2 Système PV-stockage simulé	20
2.1 Description du système	20
2.2 Modélisation des générateurs PV	20
2.3 Modélisation du stockage électrochimique	21
3 Bilan énergétique provisionnel et gestion du stockage	22
3.1 Définition du temps total de décharge	22

3.2	Sélection de la stratégie de gestion du stockage	22
4	Conclusion :	25
Bibliographie		27
3 Résultats et discussion		29
1	Paramètres de simulation	29
2	Résultats et discussion	29
2.1	Temps de décharge totale	29
2.2	Stratégie 2 pour la gestion de la charge/décharge des batteries	30
2.3	Charge des batteries pendant la journée du 3 mars	32
2.4	Stratégie 3 pour la gestion de la charge/décharge des batteries	33
3	Conclusion	36
Bibliographie		39
Conclusion générale et perspectives		41

Liste des figures

1. Figure (1.1) Processus de décharge dans une batterie.
2. Figure (1.2) Processus de charge dans une batterie.
3. Figure (1.3) Conventions générateur à droite, récepteur à droite.
4. Figure (1.4) Comparaison entre différents types d'accumulateurs.
5. Figure (2.1) Système PV-stockage étudié .
6. Figure (2.2) Définition du temps de décharge total.
7. Figure (3.1) Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 18 h (1 mars) et 6h (3 mars).
8. Figure (3.2) Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à une pente faiblement raide.
9. Figure (3.3) Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à une pente fortement raide.
10. Figure (3.4) Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à des pentes de raideur différentes.
11. Figure (3.5) Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à des pentes de raideur différentes avec des paliers.

Liste des tableaux

1. Tableau (1.1) Paramètres techniques des batteries de type acide-plomb.
2. Tableau (3.1) Donn géographiques du site de Tlemcen.
3. Tableau (3.2) Paramètres techniques du générateur photovoltaïque et des batteries. Les valeurs numériques peuvent être vérifié sur l'article [3]) et les références qui s'y réfère.
4. Tableau (3.3) Valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site de Tlemcen

Introduction

Les deux dernières décennies ont vu une intégration considérable des énergies renouvelables dans la part de la production mondiale de l'énergie électrique. Ce processus a été accéléré à cause, d'un coté, des risques de réchauffement climatique qui se fait sentir de plus en plus et de l'autre coté, par les avancées technologiques qui ont permis la maîtrise des mécanismes et des outils de production.

En raison du comportement intermittent des énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc), la production d'énergie à partir de ces ressources introduit une incertitude dans l'exploitation : l'énergie éolienne comme le solaire peut ne pas être disponible en cas de besoin d'électricité. L'intégration d'un système de stockage d'énergie afin de réduire l'incertitude liée à la production solaire-éolienne améliorera la fiabilité et la sécurité de la production. Ce système de stockage peut jouer un rôle déterminant dans la génération de l'énergie et ainsi lisser les variations de l'énergie produite sur une période temporelle souhaitée. Il peut être également utilisé pour atténuer les variations de la puissance de la charge. Le besoin de stockage d'énergie varie avec l'application.

Dans le domaine solaire, le système de stockage utilise des batteries d'accumulateurs au plomb-acide car ils peuvent résister à de nombreux cycles de charge et de décharge sans être endommagées, en plus de leur faible coût. Aussi, les batteries d'accumulateurs stockent l'excédent d'électricité produite puis le restituent en cas de besoin pour assurer le fonctionnement quand l'énergie solaire n'est pas suffisante ou indisponible. En outre, la batterie doit pouvoir répondre aux exigences d'une charge sur une période de plusieurs jours. Des contrôleurs de charge et de décharge sont alors requis pour limiter la profondeur de la décharge, limiter le courant de charge et empêcher les surcharges, tout en utilisant l'énergie solaire d'une manière optimale quand celle-ci est disponible.

Dans ce contexte, le travail présent est concentré sur l'application d'une procédure de gestion intelligente de charge et de décharge de batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau. L'objectif de notre étude est d'utiliser l'énergie photovoltaïque du jour pour charger des batteries pour utiliser leur stockage dans des périodes ultérieures lorsque l'énergie photovoltaïque est absente. Le recours au réseau permet d'éviter le risque d'interruption d'alimentation en énergie. Le stockage d'énergie permet donc d'écrêter les pics de consommation tout en veillant à ce que les batteries ne se déchargent pas complètement ou ne se surchargent pas. La gestion de charge et de décharge des batteries repose sur le calcul de paramètres qui vont nous servir d'indicateurs pour le choix des stratégies de gestion du stockage. Dans ce travail, nous avons choisi une période de 4 jours (les premiers jours de mars 2004), pour laquelle nous avons procuré les données météorologiques à partir de sites libres. La charge électrique à alimenter est celle d'une unité administrative d'une société algérienne.

Le présent mémoire est organisé de la manière suivante : Dans le premier chapitre nous introduisons le lecteur aux concepts fondamentaux du stockage d'énergie, ses caractéristiques et ses différents mécanismes. Dans le deuxième chapitre, nous exposerons les détails techniques de la procédure de gestion de charge et décharge des batteries pour un système photovoltaïque

relié au réseau. Le troisième chapitre est consacré aux résultats de la simulation numérique de la technique de gestion des batteries. Aussi, une discussion des résultats y est présentée. Le mémoire se termine par une conclusion où nous exposerons l'essentiel des résultats de notre travail avec des perspectives à suivre.

Chapitre 1

Stockage d'énergie

1 État de consommation mondiale de l'énergie

Tout le monde le sait, la majeure partie de l'énergie dans le monde vient des énergies fossiles (charbon, gaz et pétrole, etc) avec une consommation mondiale, en ce début du siècle, qui se situe entre $5 - 6 \times 10^{20} J$ avec un taux de consommation entre $1.5 - 1.8 \times 10^{13} W$ [1].

Avec une croissance terrible de la population mondiale qui peut atteindre les 9 milliards vers 2040 ; ce qui entrainera une demande croissante sur l'énergie, et un niveau de vie qui devient très exigeant dans les pays industrialisés, le tarissement de ce type de ressources est inévitable. Certains spécialistes du domaine pensent même que le pic de production sera atteint dans quelques décennies, si ce n'était pas déjà derrière nous [1]. En plus, l'exploitation des énergies fossiles entraîne l'émission du dioxyde de carbone qui est un facteur destructeur de l'environnement.

Ce constat plus qu'alarmant a poussé les chercheurs scientifiques de travailler dans un cadre de politiques d'état, à trouver des alternatives fiables qui peuvent remplacer graduellement les énergies fossiles tarissables.

Les énergies renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, biomasse, énergie géothermique, énergie marine) sont donc adoptées, et leur exploitation efficace est devenue un souci mondial avec des budgets colossaux. En effet, les énergies renouvelables offriront, à long terme, des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable. Nous vivons donc l'ère de la transition énergétique.

Cependant, un aspect important de la plupart de ces sources d'énergie alternatives est qu'elles sont intermittentes. Le soleil se lève et se couche, les vents vont et viennent, et les flux de marée sont périodiques. Cela pose un problème d'adaptation de la dépendance temporelle de la source d'énergie avec la dépendance temporelle des besoins en énergie, mais aussi le développement et l'utilisation de méthodes efficaces de stockage de l'énergie pour l'utiliser en différé. Le besoin de mécanismes de stockage dépend étroitement du type d'utilisation de l'énergie. C'est ainsi, qu'un nombre considérable de mécanismes (types) de stockage sont développés (certains sont récents et d'autres plus anciens).

2 Types de stockage

L'électricité est un moyen très pratique de transfert d'énergie, c'est une action qui place une certaine quantité d'énergie à un endroit donné pour une utilisation ultérieure. Mais il est difficile de stocker sous sa propre forme et doit être donc convertie en une autre forme d'énergie. Dans ce qui suit, nous énumérons les différents types de stockage d'énergie.

2.1 Stockage mécanique

Aujourd'hui, le stockage de l'électricité mécanique est principalement réalisé à travers trois technologies différentes, qui utilisent l'énergie potentielle (stockage hydraulique), l'énergie cinétique (volant d'inertie) et la compression.

Stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'eau

La station de transfert d'énergie par pompage (STEP) permet de stocker de grandes quantités d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Elle est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins (naturels comme les cours d'eau, la mer ou l'océan ou artificiels comme les lacs de barrage) situés à des altitudes différentes. Ainsi, la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à la quantité d'eau contenue dans le réservoir le plus haut et au dénivelé entre ces deux réserves d'eau. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lors d'un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée : la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques.

Stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé

Le stockage de l'énergie sous forme de potentiel d'air comprimé (CAES, Compressed Air Energy Storage en anglais) consiste à utiliser un grand réservoir de stockage souterrain, bien scellé, dans lequel l'air peut être comprimé. Selon la demande de stockage, lorsque la demande d'électricité est élevée, l'air comprimé sera acheminé vers la turbine à gaz qui entraîne le générateur : L'énergie potentielle de l'air comprimé est alors convertie en énergie électrique. La construction de CAES est limitée par les conditions géographiques et géologiques, et peut également être utilisée dans les anciennes mines de charbon ou de sel, les anciens puits de pétrole et les grottes souterraines étanches.

Stockage d'énergie cinétique dans une masse tournante

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique dans un dispositif à volant d'inertie, qui a la forme d'une roue qui tourne autour de son axe central, avec inversion d'énergie. Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par le moteur. L'énergie mécanique est stockée dans le volant sous forme d'énergie cinétique de la masse en rotation. Dans le processus de décharge, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par le biais d'un générateur. Il n'y a généralement qu'une seule machine qui peut fonctionner comme un moteur ou un générateur. Le système peut récupérer plus de 80% de l'énergie électrique accumulée, mais le temps de stockage est limité.

2.2 Stockage électrique

Stockage d'énergie par condensateur

Les condensateurs sont des composants passifs ; ils stockent temporairement la charge entre deux électrodes, séparées par un matériau isolant appelé diélectrique. Leurs propriétés électriques dépendent de la nature du diélectrique et de la structure électrode-isolant-électrode. La permittivité relative du diélectrique détermine la capacité du dispositif à stocker de l'énergie

électrostatique. Par conséquent, l'introduction d'une substance diélectrique dans un condensateur augmente l'énergie emmagasiner à une tension donnée, notamment lorsque la constante diélectrique est élevée. Les condensateurs sont classés en trois grandes familles : condensateurs céramiques, condensateurs électrochimiques et condensateurs films, et sont utilisés dans tous les domaines de l'électronique : télé communications, informatique, automobile, spatial, grand public, etc [2].

Stockage d'énergie par supraconducteurs

Le stockage d'énergie par supraconducteurs (SMES : superconduction magnetic energy storage) est la seule technologie qui stocke l'énergie directement à partir de l'énergie électrique [3]. Un supraconducteur est un matériau qui voit sa résistance diminuer drastiquement à basse température avec une mobilité électrique très élevée (température critique). Le système SMES se compose généralement de trois composants principaux : une unité supraconductrice, un réfrigérateur cryogénique et une cuve isolée sous vide. En faisant passer le courant à travers une bobine supraconductrice court-circuitée, la base de stockage d'énergie sous forme magnétique peut être bien réalisée. Le courant électrique circule dans le supraconducteur sans perte de joule et une certaine quantité d'énergie est stockée pendant une durée théoriquement infinie.

Le stockage de type SMES est utilisé pour stabiliser les réseaux électriques et de distribution. En outre, le SMES utilise l'absorption ou l'alimentation électrique pour contrôler la puissance active et réactive et améliorer le rendement des parcs éoliens. Il peut rapidement répondre à la demande de puissance active et réactive et stabiliser la fréquence du système. Comparé à d'autres systèmes de stockage, celui-ci se caractérise par sa vitesse de réponse rapide (millisecondes), sa longue durée de vie, et son efficacité élevée de stockage.

Stockage d'énergie par super-condensateur

Un super-condensateur est constitué de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), de deux électrodes électro-conductrices de surface très spécifique immergées dans un électrolyte (conducteur ionique pur, isolant électronique) et d'une membrane de séparation poreuse. Deux couches de surcharges de polarité opposées sont obtenues à l'interface entre le carbone et l'électrolyte, appelée double couche électrochimique. C'est là un composant d'une nouvelle génération qui stocke l'énergie électrique sous forme d'électricité statique. Par conséquent, le stockage de l'électricité est affecté par le simple mouvement des électrons et des charges ioniques. Donc, l'énergie est stockée dans la double couche électrique. L'électrode est à base de charbon actif, et l'électrolyte doit être un conducteur ionique, organique ou aqueux, tel que l'acide sulfurique.

2.3 Stockage chimique

Piles à combustibles

Une pile à combustible (fuel cell en anglais) est un générateur électrochimique qui convertit l'énergie chimique du carburant (hydrogène, gaz naturel, monoxyde de carbone, méthanol, etc.) en énergie électrique à travers une réaction chimique sans aucune chaleur de processus ou action mécanique externe. La pile à combustible est considérée comme une source d'énergie en raison de sa haute densité d'énergie. Il existe de nombreux types de piles à combustible, qui ont toutes en commun les caractéristiques suivantes :

- Elles se composent essentiellement de deux plaques (plaques bipolaires) qui permettent seulement l'alimentation en gaz, le captage du courant et assurent la résistance mécanique,

mais sont également constituées de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte.

- La réaction d'oxydation électrochimique du composé hydrogène (carburant) sur l'anode produit des électrons et implique des ions.
- La nécessité d'avoir un catalyseur sur chaque électrode dans les réactions électrochimiques. De plus, elles génèrent de la chaleur et de l'eau.
- Une réaction de réduction électrochimique est déclenchée sur la cathode, lorsque l'oxygène (oxydant) et les électrons proviennent de l'anode via une charge externe, et les électrons mettent en jeu les mêmes ions qu'à l'anode. Généralement le carburant est l'oxygène de l'air.
- L'électrolyte entre ces deux électrodes permet le transfert des ions impliqués et est en même temps un isolant électrique vis-à-vis des électrons produits par l'anode (L'électrolyte peut être solide ou liquide) [4].

Stockage par production d'hydrogène

L'hydrogène est un carburant propre, léger et efficace, et c'est un bon support de stockage. Du côté positif, c'est un vecteur d'énergie comme l'électricité, mais pas une source d'énergie majeure comme c'est le cas du gaz naturel. Pour faire de l'hydrogène un carburant renouvelable, on doit utiliser des énergies renouvelables comme l'énergie éolienne ou solaire. La demande locale limitée d'hydrogène peut être satisfaite par l'électrolyse de l'eau ou par la conversion thermochimique de la biomasse. La technique «Power-to-Hydrogen» est une technologie qui stocke l'énergie électrique en la convertissant en hydrogène, qui peut être utilisé comme molécules chimiques utilisées pour raffiner le pétrole lourd, ou les molécules chimiques extraites sous forme de carburant, ou bien injecté directement dans le réseau gazier. Les réseaux de gaz naturel et les lieux de stockage associés constituent un important moyen de stockage d'énergie. L'hydrogène brûle proprement et ne produit presque pas d'émissions nocives ni de dioxyde de carbone. Parmi tous les carburants connus, il a le contenu énergétique le plus élevé par unité de poids. Lorsque l'hydrogène est utilisé dans les piles à combustible, le seul déchet est l'eau.

Stocker l'hydrogène puis l'utiliser pour produire de l'électricité ne peut fournir que 45% à 55% de l'énergie d'origine, contre 92% si elle est directement transmise par l'électricité. Par conséquent, les revenus d'utilisation finale fournis par les énergies renouvelables envoyées sous forme d'électricité sont environ le double de ceux des énergies renouvelables fournies sous forme de H_2 [5]. La possibilité d'une utilisation à grande échelle de l'hydrogène dans le secteur des transports ou dans la production d'électricité de haute qualité augmentera le potentiel de développement des énergies renouvelables.

Accumulateurs électrochimiques :

Les accumulateurs électrochimiques ou batteries sont la technologie la plus ancienne utilisée pour stocker l'énergie électrique (Pile de Volta en 1800). C'est un système qui convertit l'énergie électrique en énergie potentielle chimique pendant la phase de charge, et convertit l'énergie potentielle chimique en énergie électrique pendant la décharge. Ils sont considérés comme les meilleurs systèmes de stockage, car compatibles avec les sources d'énergie d'alimentation et sont moins nocifs pour l'environnement, selon le type de batterie (plomb-acide, lithium-ion, nickel-hydrure métallique, etc.). Les accumulateurs électrochimiques offrent également des bénéfices opérationnels importants pour le réseau électrique public, notamment une réponse rapide aux changements de charge et une stabilité améliorée du système. Les batteries ont une efficacité énergétique élevée (60–95%), mais la plupart des batteries contiennent des substances toxiques

et les batteries rechargeables constituent la base du stockage de l'énergie électrique.

2.4 Stockage thermique

Stockage d'énergie thermique sensible

En mettant en contact un objet à haute température (par exemple, un fluide caloporteur) avec un matériau, l'énergie est stockée sous la forme d'une augmentation de température de celui-ci, d'une manière qui ne dépasse pas la température de transition de phase. L'énergie stockée est proportionnelle au volume du matériau de stockage, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau [6]. Dans ce type de stockage, le matériau de stockage est soit sous forme liquide, soit sous forme solide, soit les deux. Le matériau de stockage de chaleur le plus raisonnable utilisé est l'eau liquide, car elle a une capacité d'absorption de chaleur élevée, en raison de sa capacité thermique élevée : $C = 4180 \text{ J/kg.K}$ à 20°C . C'est là le principe de fonctionnement des chauffe-eau solaires : ils récupèrent et dégagent de la chaleur pendant la journée. Pour les systèmes les plus récents, le rendement moyen est d'environ 40%.

Stockage d'énergie thermique latente

La chaleur latente d'un matériau ou encore son enthalpie du changement d'état est utilisée pour stocker de l'énergie. Le stockage de chaleur latente permet de stocker de grandes quantités d'énergie avec de petits changements de masse et de température. Lors du chauffage du matériau, une grande quantité d'énergie s'accumule pour l'amener à la température de transition de phase. L'énergie fournie au matériau n'est plus chauffée, mais utilisée pour compléter le changement de phase. Tant que le corps maintient un état de chaleur latente, la chaleur est stockée de manière isotherme. Une fois la conversion terminée, la température augmentera proportionnellement à la puissance fournie jusqu'à ce que la température de la source de chaleur soit atteinte. Les métaux et les sels sont les matériaux à changement de phase les plus couramment utilisés (transformations liquide-solide).

Stockage d'énergie thermochimique

Dans ce type de stockage, les liaisons chimiques des matériaux sont le vecteur de stockage d'énergie. Le principe consiste à rompre et reformer les liaisons chimiques par des réactions chimiques afin que l'énergie puisse être stockée et libérée [7]. Dans l'étape de chargement, le matériau (C) est chauffé jusqu'à ce qu'il soit décomposé chimiquement en deux éléments stables indépendants (A) et (B). Lors de la réaction chimique exothermique de (A) et (B), l'énergie thermique stockée (enthalpie de décomposition) sera récupérée. Le dispositif de stockage chimique nécessite un réservoir séparé contenant les produits de réaction. Les réactions chimiques réversibles suivantes peuvent stocker de la chaleur [8] :



3 Batteries d'accumulateurs

3.1 Fonctionnement d'une batterie

Réaction d'oxydoréduction

C'est une réaction chimique entre le réducteur d'un couple l'oxydant d'un autre couple. Puisque un électron ne peut exister à l'état libre en solution aqueuse, la réaction consiste en

un transfert d'électrons du réducteur à l'oxydant.

Processus de décharge

La batterie est complètement chargée; il y a un surplus d'électron sur l'anode et un déficit d'électron sur la cathode. En reliant les pôles de batterie par une charge, on obtient une circulation des électrons d'électrode négative vers l'électrode positive (voir figure (1.1)).

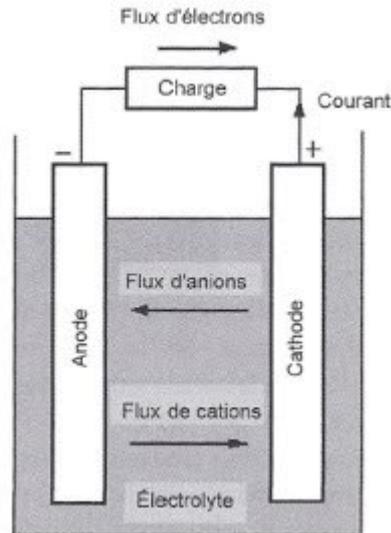


FIGURE 1.1 – Processus de décharge dans une batterie.

Processus de charge

La charge est le processus inverse de la décharge. L'accumulateur est chargé par un courant constant, ce qui cause le déplacement des électrons de l'anode (borne positive dans ce cas) vers la cathode (borne négative). Le processus est arrêté lorsque l'anode atteindra un excès d'électrons et la cathode un déficit d'électrons (voir figure (1.2)).

3.2 Composants d'une batterie

Typiquement, une cellule d'un accumulateur se compose des éléments suivants [9] :

Cathode

La cathode est l'électrode positive où se produit la réaction de réduction. Elle est constituée d'un élément oxydant capable de capter un ou plusieurs électrons.



Anode :

L'anode est une électrode négative où se produit la réaction d'oxydation. Elle est constituée d'un élément réducteur capable de céder un ou plusieurs électrons.



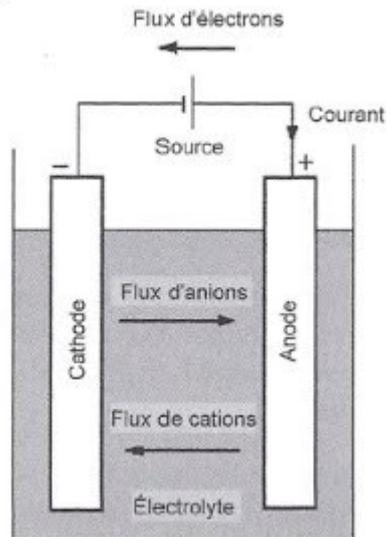


FIGURE 1.2 – Processus de charge dans une batterie.

Électrolyte

L'électrolyte est le milieu ionique conducteur dans lequel la cathode et l'anode baignent. La réaction entre la solution et les deux électrodes est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans le milieu ionique. Le déplacement de charge est fourni à travers les ions dans l'électrolyte, de sorte que les ions négatifs se déplacent dans la direction opposée au courant et les ions positifs dans la direction directe.

Séparateur

C'est un isolant qui permet de séparer les deux électrodes pour éviter un court-circuit et le risque de surchauffe, tout en laissant le passage des ions positifs et négatifs dans le milieu ionique.

3.3 Caractéristiques d'une batterie

Les batteries ont quelques paramètres qui les caractérisent ; on cite parmi eux :

Force électromotrice d'une batterie

La force électromotrice d'une batterie est la différence potentielle qui existe, en circuit ouvert, entre la cathode et l'anode.

Tension et courant

La tension U aux bornes du générateur électrochimique est la différence de potentiel entre ses électrodes positive et négative. Par définition, elle est représentée par un nombre positif. L'orientation des conducteurs dans un générateur électrochimique est habituellement choisie pour que l'intensité du courant (I) soit positive, et ce en utilisant la convention génératrice pour une pile ou un accumulateur en décharge et la convention récepteur pour un accumulateur en charge (voir figure (1.3)).



FIGURE 1.3 – Conventions générateur à droite, récepteur à droite

Capacité

La capacité d'une batterie est la quantité de charge maximale qu'elle peut fournir dans des conditions de décharge spécifiques données et est déclarée par le fabricant comme l'intensité de courant de décharge, la tension d'arrêt et la température de fonctionnement :

$$Q = \int_0^{\Delta t} i dt \quad (1.4)$$

où Q est la quantité de charge (mesurée en coulomb (C)), i l'intensité du courant (mesurée en ampère (A)) et Δt la durée en seconde (s). Si le courant de sortie a une intensité constante I , la formule peut être simplifiée en :

$$Q = I\Delta t \quad (1.5)$$

Indication $1Ah = 1000mAh = 3600Coulomb$

Profondeur de décharge et état de charge

La profondeur de décharge (PDD) (depth of discharge (DOD), en anglais) d'une batterie est définie par :

$$PDD(\%) = 100\% - \frac{Q_d}{Q} \quad (1.6)$$

où Q est la charge totale de la batterie et Q_d la charge tirée de celle-ci. La profondeur de décharge est une caractéristique importante des batteries à ne pas dépasser. D'autre part, l'état de charge d'une batterie (EDC) (state of charge (SOC), en anglais) est définie comme :

$$EDC(\%) = \left(1 - \frac{DOD}{100}\right) \times 100 \quad (1.7)$$

Énergie massique et énergie volumique

Dans beaucoup d'applications, il est important de disposer d'un générateur électrochimique emmagasinant le plus d'énergie possible pour une masse ou un volume le plus faible possible. On est donc amené à définir :

- l'énergie massique E_m qui est le rapport de l'énergie Wh que peut fournir le générateur électrochimique à sa masse m : $Wh_m = \frac{E}{m}$ ($Wh.kg^{-1}$)
- l'énergie volumique E_v qui est le rapport de l'énergie Wh que peut fournir le générateur électrochimique à son volume V : $Wh_v = \frac{W}{v}$ ($Wh.L^{-1}$)

Énergie emmagasinée

C'est l'énergie chimique totale susceptible d'être transformée en énergie électrique. Si un générateur électrochimique débite un courant d'intensité instantanée i et que la tension instantanée à ses bornes est U , l'énergie électrique Wh produite pendant la durée Δt est donnée par la relation :

$$Wh = \int_0^{\Delta t} U.i dt \quad (1.8)$$

L'unité pratique d'énergie emmagasinée par un générateur électrochimique est plutôt le watt-heure (Wh) qui correspond à $3600 J$.

Cyclabilité

Une qualité essentielle pour un accumulateur est de pouvoir être rechargée un grand nombre de fois. On appelle cyclabilité l'aptitude à supporter des cycles successifs de charge et de décharge. Elle est chiffrée par le nombre maximal de cycles de charge et décharge. Pour avoir un nombre élevé de cycles (charge-décharge) il est recommandé à ne pas laisser la batterie trop se décharger.

Coefficient d'auto-décharge

Pour tout générateur électrochimique, il est important de limiter le phénomène d'auto-décharge afin que la capacité ne diminue pas trop lorsque le dispositif n'est pas utilisé. Le coefficient d'auto-décharge c_a d'un générateur électrochimique d'une capacité de Q est défini comme :

$$c_a = \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} \quad (1.9)$$

c_a est un nombre négatif (la capacité diminue au cours du temps) qui s'exprime en inverse de seconde (s^{-1}).

Taux C (C-rate)

C'est le courant de charge ou décharge d'une batterie, mesuré en taux C (C-rate, en anglais). C'est-à-dire qu'une batterie de capacité $10 Ah$ peut fournir un courant de $10 A$ pendant une heure à un taux $10 C$. La même batterie avec un taux égale $5 C$ peut fournir un courant de charge ou de décharge égal à $20 A$ pendant 5 heure.

4 Types de batterie

Deux types de batterie existe selon le nombre des cycles de charge et de décharge [9] :

Cellule primaire Une cellule primaire est une cellule non rechargeable qui ne peut être utilisée qu'une seule fois, puis jetée une fois déchargée. C'est le cas, par exemple, des piles sèches pour les commandes de téléviseurs.

Cellule secondaire Une cellule secondaire est une cellule rechargeable, que l'on peut charger et décharger plusieurs fois. C'est le cas par exemple des batteries de véhicules hybrides, batterie de lithium polymère ions, etc.

4.1 Batterie à base de plomb-acide

C'est la batterie la plus utilisée par l'industrie ; elle a été inventée par Gaston Planté en 1859. Cette technologie est bien connue et très largement utilisée à cause de son coût de fabrication relativement faible par rapport à d'autres technologies. Le tableau (1.1) illustre quelques caractéristiques d'une batterie acide-plomb.

Tension à vide	C
Capacité spécifique théorique	120 Ah/kg
Densité énergétique massique	20-35 wh /kg
Densité énergétique pratique	50-90 wh/L
Température d'utilisation	20-60°C

TABLE 1.1 – Paramètres techniques des batteries de type acide-plomb.

4.2 Batterie à base de Nickel–Cadmium

La batterie Nickel- Cadmium a été inventée en 1899 par Waldemar Jünger. Elle a été utilisée dans le vingtième siècle pour des applications aéronautiques. Aujourd'hui, cette technologie concurrence la batterie aux ions lithium.

Caractéristiques

La tension nominale est de $1.2V$ et la résistance interne est faible, ce qui donne un bon comportement aux forts courants. L'énergie massique est de l'ordre de 30 à $60Wh/kg$ et la gamme de température de fonctionnement est étendue entre de $-20^{\circ}C$ et $60^{\circ}C$. Les batteries Nickel – Cadmium présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux batteries d'acide-plomb. En effet, elles sont plus légères, leur durée de vie plus longue (2000 cycles). Elle ne doivent pas être rechargées que lorsqu'elles sont complètement déchargées.

4.3 Batterie nickel- hydrure métallique

La batterie nickel-hydrure métallique est une amélioration significative par rapport aux batteries nickel-cadmium. Elle a été découverte dans les années 1970 et elle sera commercialisée à partir des années 1990.

Caractéristiques

La batterie de nickel hydrure métallique a une tension nominale égale à $1.2V$. Elle a une plus grande capacité mais une masse un peu plus élevée par rapport à la batterie de Nickel-Cadmium. Aussi, elle a une énergie massique qui peut atteindre $100Wh/kg$. La gamme de la température de fonctionnement s'étend de $-20^{\circ}C$ à $60^{\circ}C$ et une durée de vie égale à 1200 cycles. Cette technologie peut souffrir d'un effet de mémoire quand elle est soumise à des cycles de décharge et charge partielles.

4.4 Batteries à base d'ions lithium

La batterie à base de lithium a été utilisée pour la première fois en 1980 ; mais elle ne donna pas satisfaction. Il a fallu attendre l'année 1991 pour assister au développement de la

technologie utilisant des ions lithium qui rencontrera alors un succès commercial.

Caractéristiques

Les batteries à base d'ions lithium possèdent une tension nominale élevée ($3.6V$). Elles offrent une grande énergie massique $150Wh/kg$, une énergie volumique de $300Wh/L$, une durée de vie de 1000 cycles et une fourchette de température de fonctionnement ($-20C$ à $60C$).

Toutefois, ce type de batteries peut être dangereux s'il n'est pas utilisé avec certaines précautions : un échauffement excessif ou une surcharge, même minime, peuvent conduire à une explosion. Un contrôle rigoureux du processus de charge est indispensable pour que la tension de pleine charge ne soit pas dépassée. De plus, une décharge trop profonde endommage l'accumulateur de façon irréversible. Les éléments aux ions lithium ne sont vendus qu'avec un système électronique de commande et de protection intégré qui empêche les surcharges et les décharges trop profondes. L'accumulateur aux ions lithium présente également l'inconvénient de vieillir même sans être utilisé. La durée de vie est de l'ordre de deux à trois ans après fabrication.

Électronique portable Les batteries lithium-ion dominent actuellement dans les applications grand public : portables nécessitant des performances élevées, photos, vidéos, téléphones, ordinateurs portables, lecteurs MP3...

Véhicules électriques De nombreux prototypes de véhicules électriques utilisent des batteries lithium-ion. Les valeurs élevées d'énergie spécifique et de densité d'énergie permettent une qualité et une taille raisonnables avec une bonne autonomie ; mais le prix reste le principal obstacle au développement de cette technologie.

Applications spatiales L'énergie massique élevée des accumulateurs aux ions lithium est un atout fondamental dans les applications spatiales comme les satellites et les lanceurs, car elle permet une réduction de la masse dans un domaine où le coût n'est pas un paramètre déterminant. Des satellites géostationnaires utilisent actuellement cette technologie qui a toutes les qualités pour étendre ses applications dans ce domaine.

Alimentations de secours Dans quelques cas particuliers, les accumulateurs aux ions lithium peuvent être rencontrés dans les alimentations de secours. Citons par exemple les batteries faisant office de source d'alimentation pour le démarrage et le secours de l'Airbus A350.

4.5 Comparaison entre accumulateurs

La figure (1.4) donne une comparaison entre différents types d'accumulateurs.

5 Enjeux de la conception des batteries grâce à la modélisation et à la simulation :

Les plus grands défis de la conception des batteries sont la densité d'énergie, la densité de puissance, le temps de charge, la durée de vie, le coût et la durabilité. La simulation multi physique permet aux chercheurs, développeurs et concepteurs de relever les défis suivants :

	commerciaux. [17]-[21][24]			
	Plomb-acide (Pb)	Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH)	Lithium-ion (Li-ion)
Electrode positive	PbO ₂	NiOOH	NiOOH	LiCoO ₂
Electrode négative	Pb	Cd	MH	C ₆
Tension / V	2	1,2	1,2	3,6
Densité d'énergie massique / Wh.kg ⁻¹	30-50	45-80	60-110	120-250
Densité d'énergie volumique / Wh.L ⁻¹	75-120	80-150	220-330	300-600
Nombre de cycles	400-1200	2000	1500	500-2000
Température de fonctionnement	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C
Coûts / €.KWh ⁻¹	200-250	600	1500-2000	1000-2000
Autodécharge / %	5	20	30	10
Avantages	Faible coût Autodécharge Puissance Recyclage	Fiabilité Performances à froid Puissance	Densité d'énergie Cyclabilité	Tension et densité d'énergie Cyclabilité
Inconvénients	Faible énergie	Faible énergie Toxicité	Autodécharge Coût	Recyclage Sécurité Coût

FIGURE 1.4 – Comparaison entre différents types d'accumulateurs.

Densité d'énergie :

La densité d'énergie est limitée par la chimie de la batterie, même s'il n'y a pas de perte, la chimie de la batterie limitera la densité d'énergie théorique. La chimie est définie par le matériau de l'électrode et la composition de l'électrolyte. Cependant, les composants nécessaires à la gestion de la chaleur et à la collecte du courant ajoutent au poids total du système de batterie. La conception de ces composants affectera sérieusement la densité d'énergie du système de batterie.

Densité de puissance et recharge rapide

La densité de puissance de la batterie est très importante pour l'efficacité des véhicules électriques. Lors d'un freinage par récupération ou d'une charge rapide, une densité de puissance élevée est nécessaire pour récupérer une grande quantité d'énergie en peu de temps. Ceci présente un problème d'optimisation difficile car le système doit gérer des densités de courant très élevées pendant la charge et des densités de courant relativement faibles pendant la décharge. Ceci est également lié à la gestion thermique et à la conception des capteurs de courant.

Durée de vie, fiabilité et sécurité

La durée de vie est une considération majeure étroitement liée à la sécurité et à la fiabilité. La décharge du système de gestion thermique peut accélérer l'usure et augmenter les risques de défaillance. En effet, la distribution inégale de la densité de courant et un mauvais contrôle des systèmes de décharge / charge et de gestion thermique accéléreront l'usure et augmenteront le risque de défaillance. Aussi, les courts-circuits formés par dépôt de métal peuvent entraîner une dégradation des performances et un risque accru d'échauffement. Une technologie de surveillance de la santé est nécessaire pour évaluer en permanence l'état et le risque de défaillance du système de batterie.

Durabilité

Le développement de nouvelles batteries doit inclure des aspects de durabilité. Il doit y avoir une stratégie d'extraction, de recyclage et de production. Il s'agit principalement d'une question juridique, ainsi que d'une considération commerciale des fabricants de batteries et des constructeurs automobiles.

Modélisation et simulations

Grâce à la modélisation et à la simulation, la compréhension et l'optimisation des composants de base de la batterie (tels que les électrodes, les électrolytes et les séparateurs) peuvent être accélérées. Il est aussi possible d'utiliser la simulation multi physique haute fidélité pour développer des systèmes de gestion thermique, de collecte de courant et de surveillance de l'état de santé des batteries.

Économique, géopolitique

Le marché des batteries représente des enjeux économiques importants. La demande mondiale de batteries est en augmentation permanente. De plus, les batteries sont également un enjeu stratégique pour l'industrie automobile : elles représentent 30 à 40% du prix des véhicules électriques. Enfin, ces batteries présentent en outre des enjeux géopolitiques. Actuellement, il existe un équilibre des pouvoirs entre ceux qui produisent du pétrole et du gaz et ceux qui en dépendent. Les batteries peuvent être le problème énergétique de demain : il s'avère que près de 90% des batteries sont aujourd'hui produites en Chine.

6 Conclusion

Il a été question dans ce chapitre d'introduire le lecteur à un aspect très important du processus d'alimentation en énergie électrique, à savoir le stockage d'énergie. En effet, le manque de synchronisation entre la production et la demande en énergie a fait surgir le besoin de stocker l'énergie pour l'utiliser ultérieurement quand c'est nécessaire. Plusieurs mécanismes de stockage d'énergie, certaines plus récentes et d'autres plus anciennes, ont été élaborés. Il s'agissait donc dans ce chapitre de les passer en revue. Dans ce travail, nous nous concentrons sur le stockage électrochimique (batteries) utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Pour cela, nous avons énuméré les différentes technologies qui ont été mises en place durant deux siècles, ainsi que leurs caractéristiques techniques et physico-chimiques. Dans le chapitre suivant nous exposerons la technique de gestion de charge et de décharge de batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau.

Bibliographie

- [1] Robert A. Huggins, **Energy storage**, Springer. ISBN 978-1-4419-1023-3 (2010)
- [2] J. Beauger et al., **Condensateurs** in : Technique de l'ingénieur, Vol. E19925, (2007)
- [3] M. Abdullah Al Zaman et al., **An overview of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) and Its Applications**. In : International Conference on Nanotechnology and Condensed Matter Physics 2018 (ICNCMP 2018) January 11–12, 2018, BUET –Dhaka, Bangladesh
- [4] Majid Zandi, **Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique** ; thèse de doctorat à l'université de Vandoeuvre-les-Nancy- France (2010).
- [5] Abdulkader Tabanja, **Modelling, control and supervision of multi-source system connected to the network with a buffer storage of electrical energy via hydrogen vector** ; thèse de doctorat à l'université de Technologie de Belfort-Montbeliard- France (2015).
- [6] Adrien Lomonaco, **Stockage d'énergie thermique par matériaux à changements de phase adapté aux centrales solaires thermodynamiques** ; thèse de doctorat à l'université de Pau- France (2015).
- [7] A. Sharma et al., **Review on thermal energy storage with phase change materials and applications**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp. 318–345 (2009).
- [8] Laurie Andre, **Stockage thermochimique de l'énergie solaire concentrée à partir de matériaux innovants par réactions solide-gaz réversibles** ; thèse de doctorat à l'université de Perpignan- France, (2017).
- [9] M. A. Laughton, **Renewable Energy Sources**, Report Number 22, Taylor and Francis Books. Inc (2003).

Chapitre 2

Gestion intelligente de charge et de décharge de batteries

1 Introduction

L'insertion de plus en plus considérable des énergies renouvelables, et plus particulièrement les générateurs photovoltaïques (PV), a introduit de nouveaux défis de gestion qui peuvent affecter le bon fonctionnement du système énergétique. Pour cette raison, des chercheurs du domaine ont commencé à envisager de nouvelles méthodes de gestion de ces systèmes, au moyen de procédures de reconfiguration optimale basée sur différentes méthodologies et périodes [1, 2].

En effet, le principal inconvénient des énergies renouvelables est l'intermittence de la production d'électricité, qui se traduit souvent par une mauvaise adéquation entre la consommation électrique et les profils de production [3, 4] avec pour conséquence des écarts de tension et des problèmes d'inversion du flux d'électricité [5]. A cet effet, plusieurs solutions ont été mises en place pour atténuer ou éliminer les problèmes d'injection de puissance, parmi lesquelles l'utilisation du stockage électrochimique (banc de batteries) avec les générateurs PV. Cette solution est très prometteuse car le stockage est devenu de plus en plus facile à installer et à gérer, en plus de son coût qui ne cesse de diminuer, bien qu'il soit encore à des prix prohibitifs, au point qu'il n'est pas encore possible au systèmes de stockage d'assurer la corrélation saisonnière entre les faibles charges et la forte production de énergies renouvelables et vice versa [6]. L'utilisation d'un système de batterie s'avère donc très utile, dans le cas de faibles et moyennes charges, afin de réduire les pics d'absorption ou d'injection et d'augmenter le niveau d'autosuffisance en alimentation du système.

Un système de gestion de batteries (SGB) est une solution (matériel+logiciel) qui vérifie le bon fonctionnement des batteries : Dans sa version de base, il se contente de charger les batteries, lorsqu'elles sont vides, et de les décharger lorsque cela est nécessaire. Elle limite le fonctionnement des batteries uniquement pour les protéger. Le dépassement des limites minimales et maximales de l'état de charge (EDC) et les cycles de charge/décharge rapides ne sont pas autorisés pour éviter une dégradation rapide [7]. Une amélioration de la gestion de charge et de décharge des batteries consiste à prévoir des profils de charge et de production photovoltaïque [8, 9]. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer d'informations précises sur les profils de production, qui font généralement défaut. En outre, la technique de gestion doit obtenir en permanence des prévisions météorologiques précises, qui ne sont pas facilement disponibles. Plusieurs stratégies de contrôle de batteries couplées à un générateur PV ont été proposées [10].

2 Système PV-stockage simulé

2.1 Description du système

Le schéma d'un système résidentiel de stockage PV est présenté sur la figure (2.1). Les principaux composants du système électrique sont un générateur PV, un SGB (BMS : Battery Management System) électrochimique, des convertisseurs de puissance DC/DC et DC/AC, des charges AC et le réseau de distribution. Les modules PV sont reliés à un traqueur du point de puissance maximale (MPPT). Le SGB mesure le courant et la tension CC et la température des batteries. L'état de charge (EDC) est calculé en continu afin d'estimer la charge résiduelle du stockage ; ce qui permet au SGB d'éviter une dégradation anormale des batteries due à des schémas de charge non optimaux, à une surcharge, à une sous-charge et à des températures anormales [6].

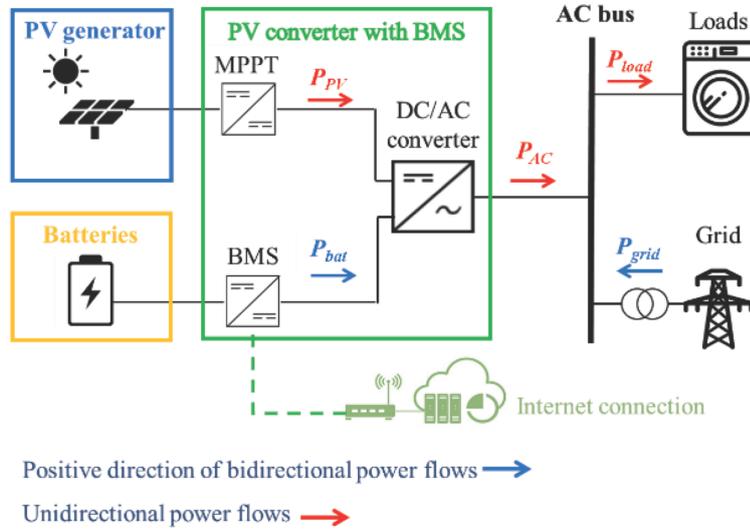


FIGURE 2.1 – Système PV-stockage étudié [6].

Le convertisseur DC/AC connecte le système PV et le SGB au bus AC (charges locales et au réseau). En outre, le dispositif est connecté à Internet et télécharge les prévisions météorologiques brutes d'une journée à l'avance, compare la charge provisoire et le profil de production, et adopte la meilleure stratégie pour réduire les pics de consommation [6]. Dans notre cas, nous avons utilisé la base de données de l'éclairement solaire et de la température journaliers sur le site de Tlemcen fournie par le site [11] pour le mois de mars 2004, avec une inclinaison pour les panneaux photovoltaïques égale par rapport à l'horizon à 34° et dirigés vers le sud. Aussi, le profil de la charge électrique est celui d'une unité administrative dans une société algérienne et dont la forme sera donnée dans le chapitre suivant.

2.2 Modélisation des générateurs PV

La production d'énergie photovoltaïque convertie en courant alternatif, P_{AC} , est calculée selon le modèle suivant [12] :

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

où $P_{PV,r}$ est la puissance nominale du générateur PV, G l'éclairement solaire (mesuré en W/m^2), G_{STC} l'éclairement pour des conditions de test standards, η_{mix} le rendement des différentes

pertes de sources technique ou environnementale, η_{therm} le rendement des pertes thermiques du générateur photovoltaïque et enfin $\eta_{DC/AC}$ les rendement de la conversion DC/AC .

En effet, le rendement η_{mix} s'écrit comme :

$$\eta_{mix} = \eta_{sal} \eta_{rfl} \eta_{mis} \eta_{MPPT} \eta_{cabl} \eta_{ombr} \quad (2.2)$$

où η_{sal} représente les pertes due à poussière (et autres saletés) qui peut recouvrir les panneaux, η_{rfl} les pertes par réflexion du verre des panneaux, η_{mis} les pertes par désadaptation (mismatch) dues à la non-uniformité des caractéristiques I-V des modules connectés en série ou en parallèle, η_{MPPT} les pertes à cause d'un fonctionnement qui ne correspond pas parfaitement au point optimum, η_{cabl} les pertes par effet joule sur les lignes et enfin η_{ombr} les pertes dues à l'ombrage.

D'autre part, et afin d'estimer les pertes de température η_{therm} , la température des cellules PV, T_c , est calculée, à chaque pas de temps, à partir de la température de l'air mesurée T_a par l'équation suivante [12] :

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

$NOCT$ est la température normale de fonctionnement des cellules, généralement fournie par le fabricant des modules PV ; dans ce travail, elle correspond à une valeur typique $NOCT = 45^\circ C$. G_{NOCT} est l'irradiation solaire se produisant à la condition $NOCT$ et elle est de $800W/m^2$; les pertes par surchauffe η_{therm} (par rapport à $T_{STC} = 25^\circ C$) sont calculées par la formule :

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

où γ_{th} est le facteur de température pour la puissance du générateur PV ($\%/C$)(temperature factor of power of PV generator, en anglais)

2.3 Modélisation du stockage électrochimique

Plusieurs modèles de stockage des batteries à même d'évaluer les flux d'énergie et de simuler leur fonctionnement sont proposés [6]. Bien évidemment, chaque modèle présente des avantages et des inconvénients. Dans notre cas, nous utilisons un modèle énergétique simple permettant de simuler l'état de charge EDC avec une bonne approximation, sans mesures expérimentales et avec un faible effort de calcul (seules deux formules sont utilisées).

En effet, le modèle énergétique permet d'estimer l'état de charge des batteries, c'est-à-dire la quantité d'énergie stockée ou pouvant être stockée dans une batterie ayant une capacité énergétique nominale C_{bat} , par comparaison avec les limites imposées pour préserver la vie des batteries. Le calcul de $EDC(t)$ à l'instant t est fonction de l'état de charge $EDC(t - 1)$ au pas de temps précédent, de la puissance échangée P_{bat} pendant le pas de temps Δt (dans ce travail, $\Delta t = 5$ min) et du rendement de charge η_{bat} . Pendant la phase de charge, les batteries se comportent comme un générateur ($P_{bat} > 0$) avec un rendement de charge $\eta_{bat} = 0,88$; pendant la décharge ($P_{bat} < 0$), le rendement est considéré comme unitaire.

$$EDC(t) = EDC(t - 1) + \frac{\eta_{bat} P_{bat} \Delta t}{C_{bat}}, \quad P_{bat} > 0 \quad (2.5)$$

et

$$EDC(t) = EDC(t - 1) + \frac{P_{bat} \Delta t}{C_{bat}}, \quad P_{bat} < 0 \quad (2.6)$$

3 Bilan énergétique provisionnel et gestion du stockage

Le GSB proposé définit périodiquement une stratégie pour minimiser l'absorption de puissance du réseau. La sélection de la stratégie est effectuée deux fois par jour pour mieux correspondre aux pics de consommation de l'unité. Ainsi, la journée est divisée en trois tranches de temps. La première tranche horaire commence à minuit (24 h) et se termine à 6h00 (6 a.m). La deuxième tranche horaire se situe entre 6h00 et 18h00 (6 p.m), pendant laquelle la production en énergie photovoltaïque est dominante et une partie de la production est auto-consommée. La troisième tranche horaire commence à 18h00 et se termine à minuit. L'heure de 18h00 est choisie pour la mise à jour de la stratégie de gestion des batteries. En effet, à 18h00, la production PV est presque terminée : le GBS peut calculer avec précision la quantité d'énergie stockée, qui sera disponible pour les heures suivantes. En fait, pendant la soirée et la nuit, les batteries ne seront pas chargées : l'alimentation par le réseau n'est pas prise en compte. Le bilan énergétique provisoire pour 1 jour à venir est réalisé en comparant la production et la consommation d'énergie estimées. La consommation d'énergie est calculée sur la base du profil de la charge électrique de l'unité.

3.1 Définition du temps total de décharge

La première étape dans la gestion intelligente des batteries consiste à définir le temps de décharge total (TDT) : La figure (2.2) montre l'organigramme de la procédure. Tout d'abord, à 18h00, tout en ayant les prévisions de production d'énergie photovoltaïque, le bilan provisionnel entre la production attendue (dans la journée d'après) $E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}}$ et les charges $E_{Charge, 1 \text{ jour à l'avance}, 6 \text{ a.m.}-6 \text{ p.m.}}$, survenant dans la tranche horaire 6h00 -6h00 du jour suivant est effectué. Dans le cas d'une production d'énergie PV supérieure aux charges $E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}} > E_{Charge, 1 \text{ jour à l'avance}, 6 \text{ a.m.}-6 \text{ p.m.}}$, une gestion du stockage pour satisfaire les charges jusqu'à un jour à l'avance, à 6 :00 a.m., est effectuée. Dans ce cas, la TDT sera égale à 12 h. En effet, le lendemain, pendant la journée (heures de lumière), l'énergie sera auto-consommée, et le surplus de production PV chargera les batteries ou sera injecté dans le réseau. D'autre part, pour une faible production et de fortes charges $E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}} < E_{Charge, 1 \text{ jour à l'avance}, 6 \text{ a.m.}-6 \text{ p.m.}}$, une gestion de batteries est nécessaire non seulement pour une 1 journée en avance mais plutôt pour 2 journées en avance. Dans ce cas, la production PV ne peut pas satisfaire les charge électrique et le stockage doit être capable de réduire la consommation électrique pendant deux nuits. La valeur de TDT sera donc égale à 36 h.

Les batteries étant très chères, il est utile de noter qu'un stockage avec une capacité trop élevée n'est pas rentable pour un réseau électrique. Pour cette raison, dans le présent travail le GBS peut distribuer l'énergie stockée dans un TDT maximum égal à 36 h. Cela signifie que le stockage doit être capable d'alimenter la charge lorsqu'un seul jour nuageux se produit (2 nuits et 1 jour) [6].

3.2 Sélection de la stratégie de gestion du stockage

Après la définition du temps total de décharge (TDT), la procédure se poursuit avec la deuxième partie qui consiste à définir la stratégie de gestion du stockage. Ainsi, l'état de charge (EDC) des batteries est calculé à 18h00 par le GSB. La capacité nominale du stockage et le EDC permettent de calculer l'énergie qui peut être fournie aux charges $E_{Bat, dcharge}$ (énergie de décharge des batteries). La production d'énergie estimée $E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}}$ est la même quantité que celle utilisée à l'étape précédente, tandis que la consommation $E_{Charge, TDT}$ correspond aux charges estimées pendant le temps de décharge totale. Ces quantités d'énergie brutes sont com-

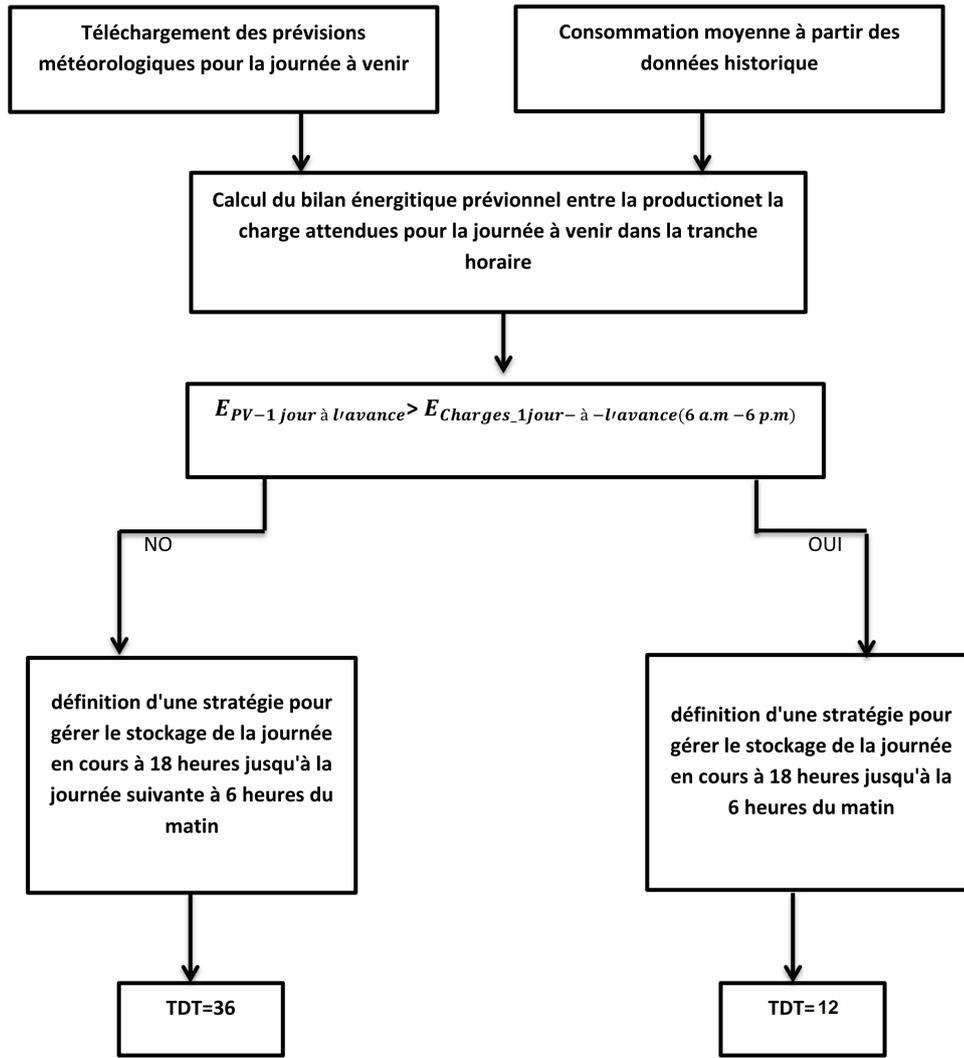


FIGURE 2.2 – Définition du temps de décharge totale [6].

parées afin de voir s'il y a un déficit énergétique $E_{PV,1 \text{ jour à l'avance}} + E_{Bat,dcharge} \geq E_{Charge,TDT}$ ou un surplus $E_{PV,1 \text{ jour à l'avance}} + E_{bat,dcharge} \geq E_{Charge,TDT}$. Si la production PV et le stockage peuvent satisfaire la charge dans le TDT sélectionné, aucune gestion avancée des batteries n'est nécessaire (stratégie GSB 1). Par contre, si les charges sont trop élevées, une stratégie d'écrêtement (shaving en anglais) des pics de consommation (stratégie GSB 2) est nécessaire ou encore des profils de décharge appropriés (stratégie GSB 3) sont adoptés. Pour sélectionner la méthode la plus appropriée entre ces deux stratégies, un paramètre d'autosuffisance provisoire R_{suff} est utilisé :

$$R_{suff} = \frac{E_{PV,1 \text{ jour à l'avance}} + E_{Bat,décharge}}{E_{Charge,TDT}} \quad (2.7)$$

qui est défini comme le rapport entre la production PV provisionnelle plus l'énergie disponible de la batterie et la charge locale provisionnelle pendant le TDT. Lorsque le rapport R_{suff} est inférieur à un seuil R_{lim} défini par l'utilisateur, le GSB adopte la stratégie 2 : le générateur photovoltaïque et le système de stockage fourniront une faible quantité d'énergie à la charge, laquelle sera principalement alimentée par le réseau. Cela peut entraîner des pics d'absorption élevés. Dans ce cas, la faible quantité d'énergie stockée dans les batteries ne sera utilisée

que lorsque la charge dépassera une limite maximale $P_{charge,max}$, définie par l'utilisateur. En revanche, la stratégie 3 est adoptée lorsque le rapport R_{suff} est supérieur au seuil défini par l'utilisateur R_{lim} et inférieur à la valeur unitaire. Dans ce cas, une grande partie de la charge sera alimentée par le PV et le stockage, et la quote-part du réseau est faible. Enfin, l'organigramme pour la définition de la stratégie de gestion de charge et décharge des batteries est illustré sur la figure (2.3).

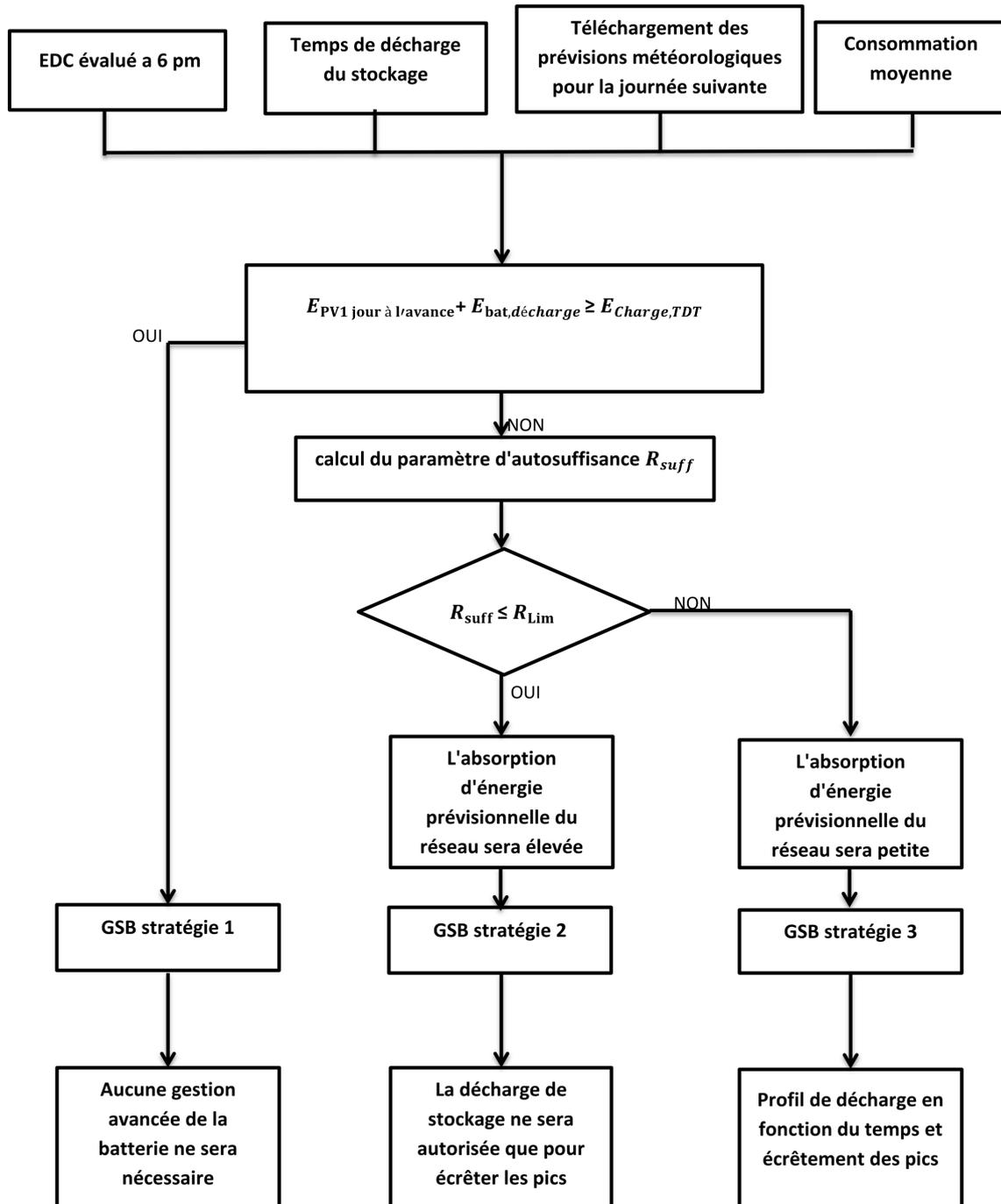


FIGURE 2.3 – Organigramme pour la définition de la stratégie de gestion de charge et de décharge des batteries [6].

4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'exposition des stratégies de contrôle de charge et de décharge des batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau. Dans un premier temps, nous avons passé en revue les modèles mathématiques utilisés pour la simulation des fonctionnements respectifs d'un générateur photovoltaïque et d'un système de stockage électrochimique (batteries). Ensuite, nous avons donné la méthode de calcul du temps de décharge totale, qui nous servira comme indicateur sur la période pendant laquelle une stratégie de contrôle du stockage sera appliquée. Le choix de la stratégie de contrôle du stockage est dicté par la valeur du paramètre d'autosuffisance en alimentation qui fait intervenir le rapport entre l'énergie disponible (photovoltaïque et batteries) et l'énergie nécessaire pour satisfaire la charge pendant le temps de décharge totale. Dans le chapitre suivant, nous exposerons et discuterons les résultats de notre simulation.

Bibliographie

- [1] G. Chicco and A. Mazza, **An overview of the probability-based methods for optimal electrical distribution system reconfiguration**. In : Proceedings of the 2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE) ; Galati ; 2013. pp.1-10
- [2] A. Mazza et al., **Determination of the relevant periods for intraday distribution system minimum loss reconfiguration**. International Transactions on Electrical Energy Systems. 2015 ;25 :1992-2023. DOI : 10.1002/etep.1941.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] A. Ciocia et al., **Voltage control in low voltage grids : A comparison between the use of distributed photovoltaic converters or centralized devices**. In : Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ICPS Europe) ; Milan ; 2017. pp.1-6
- [6] 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>
- [7] M. Koller et al., **Defining 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
- [8] F. Bizzarri et al., **Model of photovoltaic power plants for performance analysis and production forecast**. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2012 ;4 :278-285. DOI : 10.1109/TSTE.2012. 2219563
- [9] M. Brenna et al., **Mint : Solar radiation and load power consumption forecasting using neural network**. In : Proceedings of the 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP) ; Santa Margherita Ligure ; 2017. pp.726-731
- [10] 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
- [11] <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>
- [12] 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

Chapitre 3

Résultats et discussion

Après avoir passé en revue les bases théoriques de la technique de gestion de charge et décharge des batteries pour un système relié au réseau électrique et utilisant une ressource énergétique renouvelable, en l'occurrence l'énergie photovoltaïque, nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation de ladite gestion des batteries en vue d'alimenter une charge électrique d'une unité administrative d'une société algérienne (habitat tertiaire) implantée dans la région de Tlemcen dont les coordonnées géographiques sont données dans la 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

Nous débutons notre travail par donner les valeurs numériques des différents paramètres de simulation. Ainsi, nous noterons que la période de gestion de charge/décharge des batteries s'étale de 1 mars à 18h (6 p.m) jusqu'au 4 mars à 6h (6 a.m), où nous avons pris 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].

D'autre part, les paramètres techniques du générateur photovoltaïque ainsi que les batteries sont données dans le tableau (3.2).

Aussi, la gestion de charge/décharge des batteries est étudiée pour une puissance nominale du générateur photovoltaïque $P_{PV,n} = 18 kW$, une capacité nominale des batteries $C_{bat} = 30 kWh$, une puissance maximale de la charge satisfaite par le réseau en cas d'une stratégie d'élimination de pics de consommation, $P_{charge, max} = 8.5 kW$, 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

Le tableau (3.3) donne les valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site de Tlemcen. En effet, la valeur $TDT = 36$ pour 1 mars implique un choix d'une stratégie de gestion qui s'étalera sur 36 heures à partir 18 h (6 p.m) du même jour

Paramètre	Désignation	Valeur
γ_{th}	facteur de température de la puissance photovoltaïque ($^{\circ}C$)	0.005
η_{cabl}	pertes de joule	0.99
η_{disch}	rendement de décharge des batteries	1.0
η_{ch}	rendement de charge des batteries	0.88
$\eta_{DC/AC}$	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 ($^{\circ}C$)	25

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

jusqu'à 6h (6 a.m) du 3 mars. Aussi, $TDT = 12$ pour 3 mars implique un choix d'une 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 ce travail, nous nous sommes restreints à cette période de 4 jours.

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 0.21, 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 $P_{charge, max} = 8.5 kW$. A cet effet, la figure (3.1) illustre la variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 18 h (1 mars) et 6h (3 mars). Aussi, l'état de charge initiale (à 18 h du 1 mars) des batteries est prise égale à 0.9 (les batteries sont pleines à 90% de leur capacité nominale). Nous remarquons que pendant la nuit du 1 au 2 mars, les batteries ne se déchargent pas car la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la charge satisfaite par le réseau, $P_{charge, max} = 8.5 kW$. La charge est alors alimentée en sa totalité par le réseau. L'état de charge EDC reste alors constante. D'autre part, dans la journée du 2 mars les batteries commencent à se charger à travers la puissance photovoltaïque présente au matin. La puissance de charge des batteries est comptée positivement et la valeur de EDC est passée de 0.9 à 0.92. Ceci est possible car les batteries ne se déchargent pas encore à cause de l'absence de pics de consommation. Un pic de consommation apparaît à partir de 8h du 2 mars, et les batteries se mettent à se décharger

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

pendant 4 heures. La puissance de décharge est comptée négativement et l'état de charge des batteries est passée alors de 0.92 à 0.64. Pendant ce temps, la charge électrique est alimentée par trois sources : le générateur photovoltaïque, le réseau et les batteries. Cependant, il est utile de noter que l'abondance de l'énergie photovoltaïque pendant cette période nous a permis de vendre une partie de l'énergie photovoltaïque au réseau, ce qui explique la valeur négative de la puissance du réseau sur la figure. Les pics de consommation étant presque passés, les batteries recommencent à se charger à partir de 13 heures (2 mars) puis se déchargent lorsqu'un dernier pic apparaît vers 13h 15. D'autre part, la puissance photovoltaïque perd de sa valeur vers l'après midi. Il serait alors impossible de vendre de l'énergie au réseau. La puissance photovoltaïque sert alors à charger les batteries, mais aussi à alimenter la charge électrique avec l'aide du réseau. L'état de charge EDC augmente de presque 0.64 à 0.76 et restera constante pendant

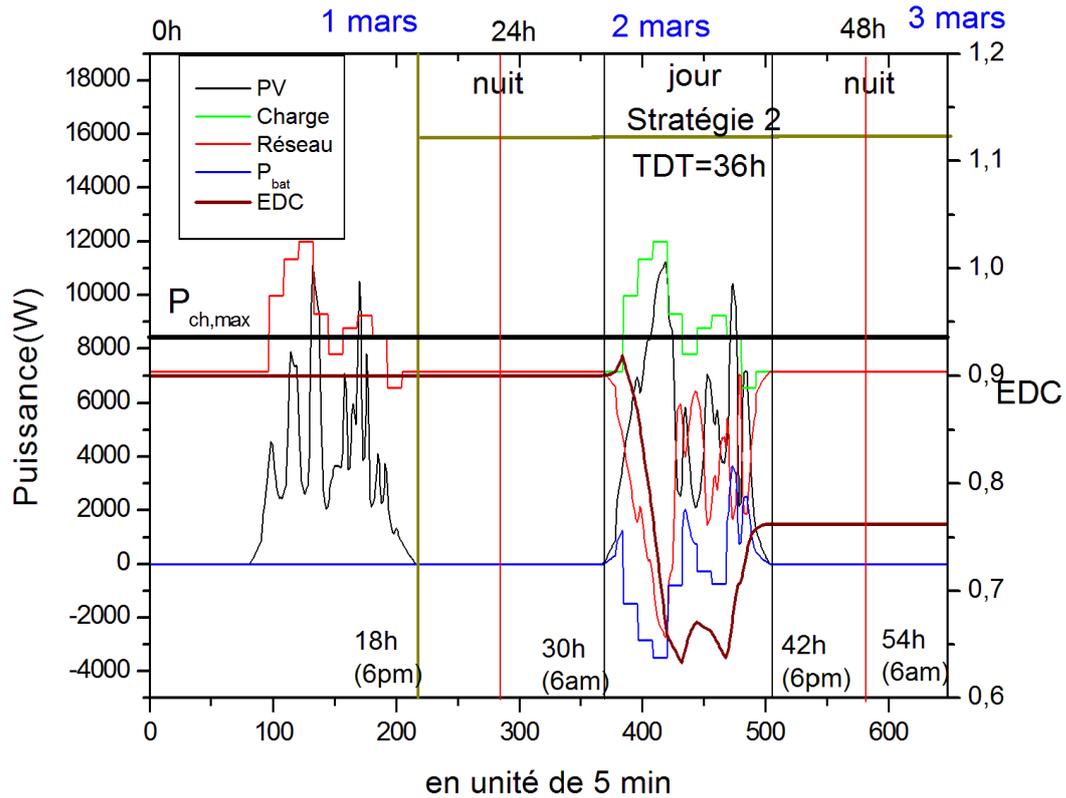


FIGURE 3.1 – Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 18 h (1 mars) et 6 h (3 mars)

la nuit du 2 au 3 mars. En effet, pendant cette période, nous aurons recours au réseau pour alimenter la charge en sa totalité à cause de l'absence évidente de l'énergie solaire, mais aussi parce que la puissance maximale de la charge satisfaite par le réseau, $P_{charge, max} = 8.5 kW$ est supérieure à la charge électrique ($7.15 kW$) (pas de pics de consommation). C'est ainsi que s'achève la stratégie 2 de gestion de la charge/ décharge des batteries.

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 se chargent complètement vers 10h 30, d'où la valeur 1 de EDC constatée sur la figure. Les batteries restent pleines et ne se déchargent pas pendant cette journée (de 6h jusqu'à 18h du même jour). La puissance de décharge des batteries est alors nulle. Aussi, l'abondance de l'énergie photovoltaïque pendant la journée a permis de vendre de l'énergie électrique au réseau entre 10h 30 et 16h.

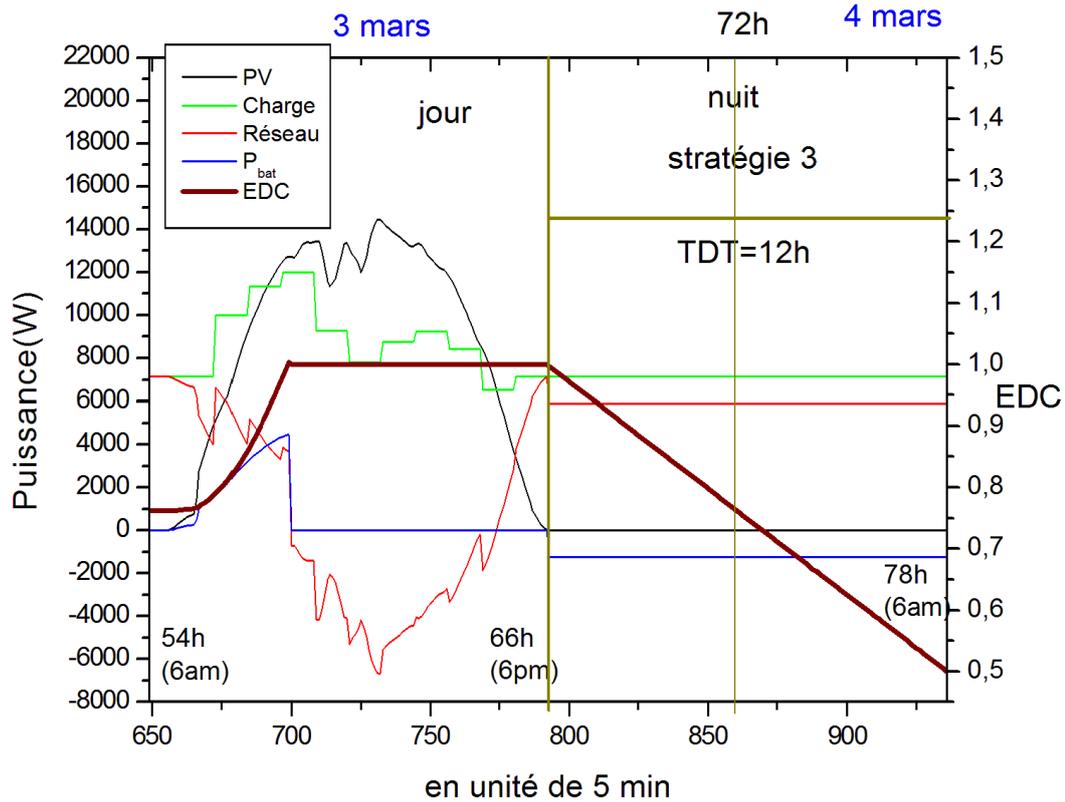


FIGURE 3.2 – Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6 h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à une pente faiblement raide.

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 0.989 (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. Rappelons que ladite stratégie 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. Nous ne pouvons pas donc utiliser les batteries pour éliminer des pics de consommation. Toutefois, il est possible d'adopter des profils de déchargement des batteries pendant cette période. A cet effet, nous avons choisi quatre profils de décharge des batteries :

1. Un profil de décharge **linéaire avec une pente lente** (voir figure (3.2)). L'état de charge des batteries EDC passe de la valeur 1 (batteries complètement chargées à 18 h du 3 mars) à une valeur minimum de 0.5 (batteries à moitié pleines à 6 h du 4 mars). La valeur minimum de décharge $EDC = 0.5$ correspond à des batteries de type acide-plomb. Pendant ce temps, la puissance de décharge des batteries est constante et est égale à $1.25 kW$. D'autre part, le quote-part du réseau en puissance d'alimentation est égal à $5.89 kW$. Aussi, l'énergie délivrée, pendant cette période, par le réseau est égale à $70.48 kWh$.

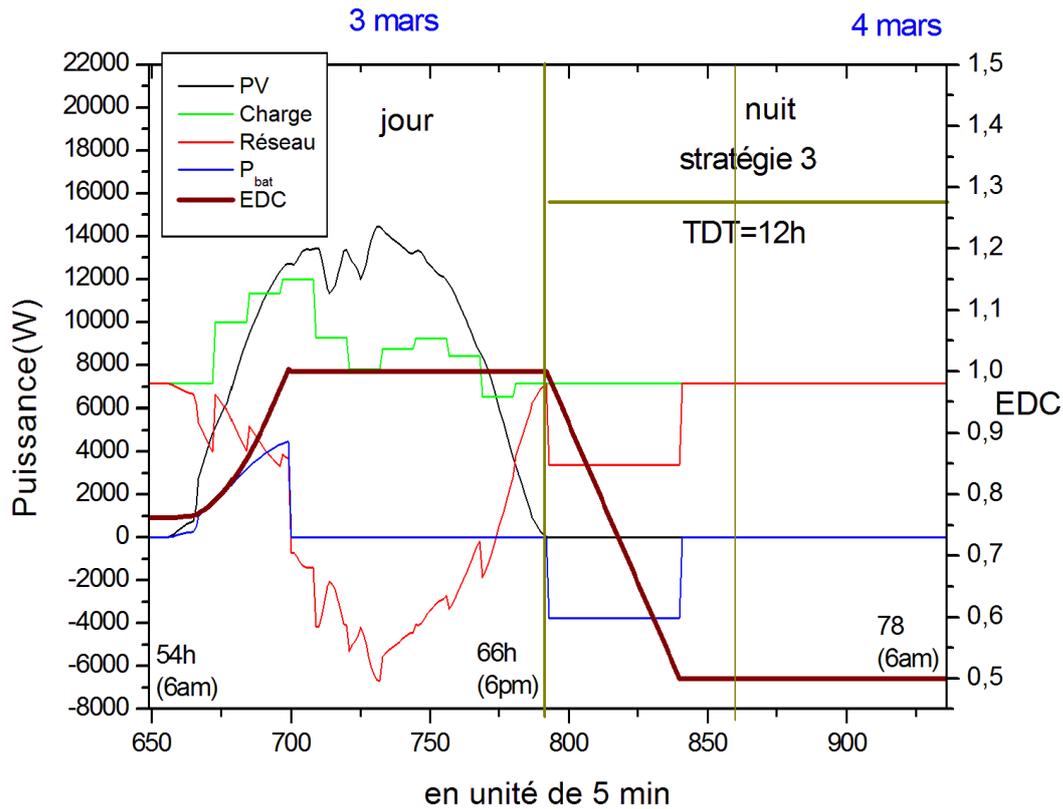


FIGURE 3.3 – Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à une pente fortement raide.

2. Un profil de décharge **linéaire avec une pente rapide** (voir figure (3.3)). L'état de charge des batteries EDC passe de la valeur 1 à une valeur minimum de 0.5. Dans ce cas, les batteries se déchargeront pendant 4 heures et restent toute la nuit à moitié déchargées. Pendant ce temps, la puissance de décharge des batteries est constante et est égale à 3.76 kW . D'autre part, le quote-part du réseau en puissance d'alimentation est égal à 3.39 kW . Après 4 heures de décharge, les batteries ne peuvent plus se décharger ($EDC = 0.5$) et c'est au réseau qu'incombe le rôle d'alimentation de la charge électrique avec une puissance constante égale à 7.15 kW . L'énergie délivrée, pendant cette période, par le réseau est égale à 70.48 kWh qui est la même que celle pour le premier cas de profil.
3. Un profil de décharge **linéaire avec trois pentes différentes** (voir figure (3.4)). L'état de charge des batteries EDC passe de la valeur 1 à une valeur minimum de 0.5. Dans ce cas, les batteries se déchargeront pendant 12 heures avec des pentes différentes d'état de charge EDC. Pendant ce temps, la puissance de décharge des batteries varie selon les trois pentes de EDC. En effet, celle-ci passe d'une valeur de 1.13 kW (pendant 4 heures) à une valeur de 1.5 kW (pendant 4 heures) puis revient à la valeur de 1.13 kW (pendant 4 heures). D'autre part, le quote-part du réseau en puissance d'alimentation passe d'une valeur de 6.02 kW à une valeur de 5.64 kW puis revient de 6.02 kW . L'énergie délivrée, pendant cette période, par le réseau est égale à 70.48 kWh qui est la même que celles pour les deux premiers cas de profil.

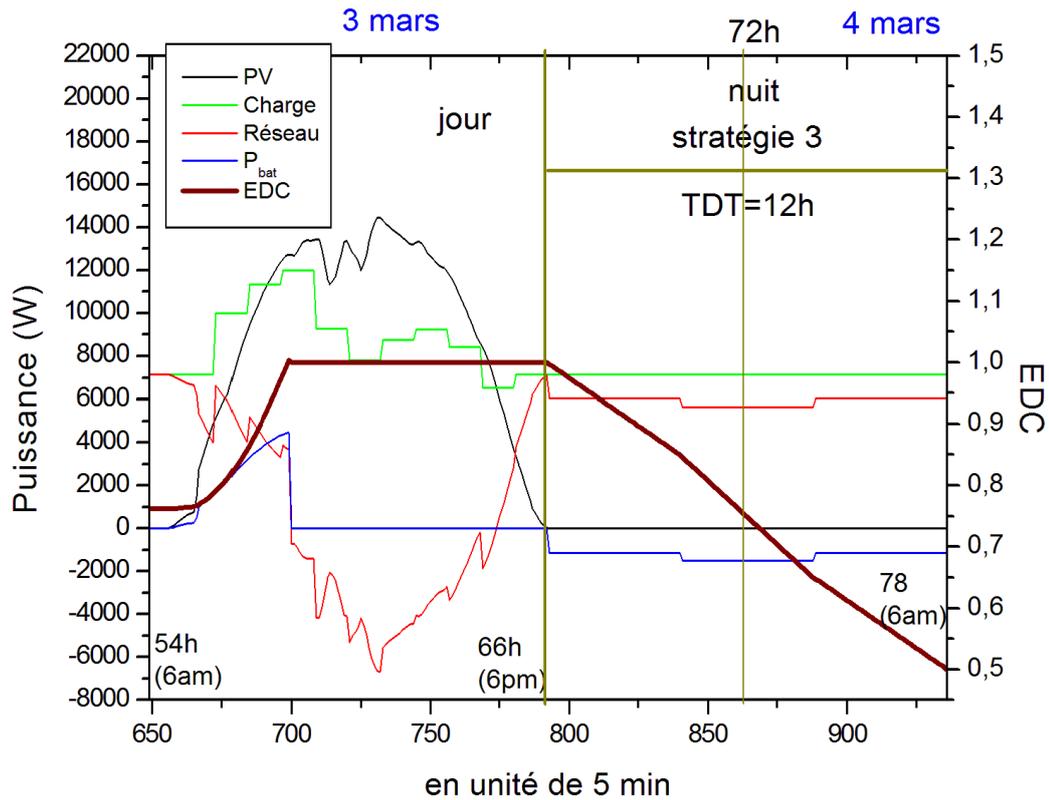


FIGURE 3.4 – Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à des pentes de raideur différentes.

- Un profil de décharge **linéaire avec trois pentes différentes et des paliers** (voir figure (3.5)). L'état de charge des batteries EDC passe de la valeur 1 à une valeur minimum de 0.5 selon une variation dans le temps choisie. Dans ce cas, les batteries se déchargeront pendant 12 heures avec des pentes différentes d'état de charge EDC et des paliers (pente nulle). Pendant ce temps, la puissance de décharge des batteries change selon la variation de EDC. En effet, celle-ci passe d'une valeur de 1.5 kW (pendant 3 heures) puis devient nulle pendant une heure (pas de décharge), ensuite elle passe à une valeur de 2.0 kW (pendant 3 heures) puis devient nulle pendant une heure. Pendant les trois heures qui suivent, la puissance de décharge est égale à 1.5 kW , puis devient nulle pendant la dernière heure de cette période. D'autre part, le quote-part du réseau en puissance d'alimentation passe d'une valeur de 5.6 kW (pendant 3 heures) à une valeur de 7.15 kW (pendant une heure) puis à une valeur de 5.14 kW (pendant trois heures), ensuite passe à une valeur de 7.15 kW (pendant une heure) puis devient égale à 5.64 kW (pendant trois heures) et enfin à une valeur de 7.15 kW (pendant une heure). L'énergie délivrée, pendant cette période, par le réseau est égale à 70.48 kWh (la même que celles pour les trois premiers cas de profil).

Notons que les aspects positifs concernant la stabilité du réseau (fréquence et contrôle de la tension) ne sont pas pris en compte, et seul l'avantage pour les utilisateurs, consistant en la réduction des pics d'absorption avec une possible réduction conséquente de la puissance

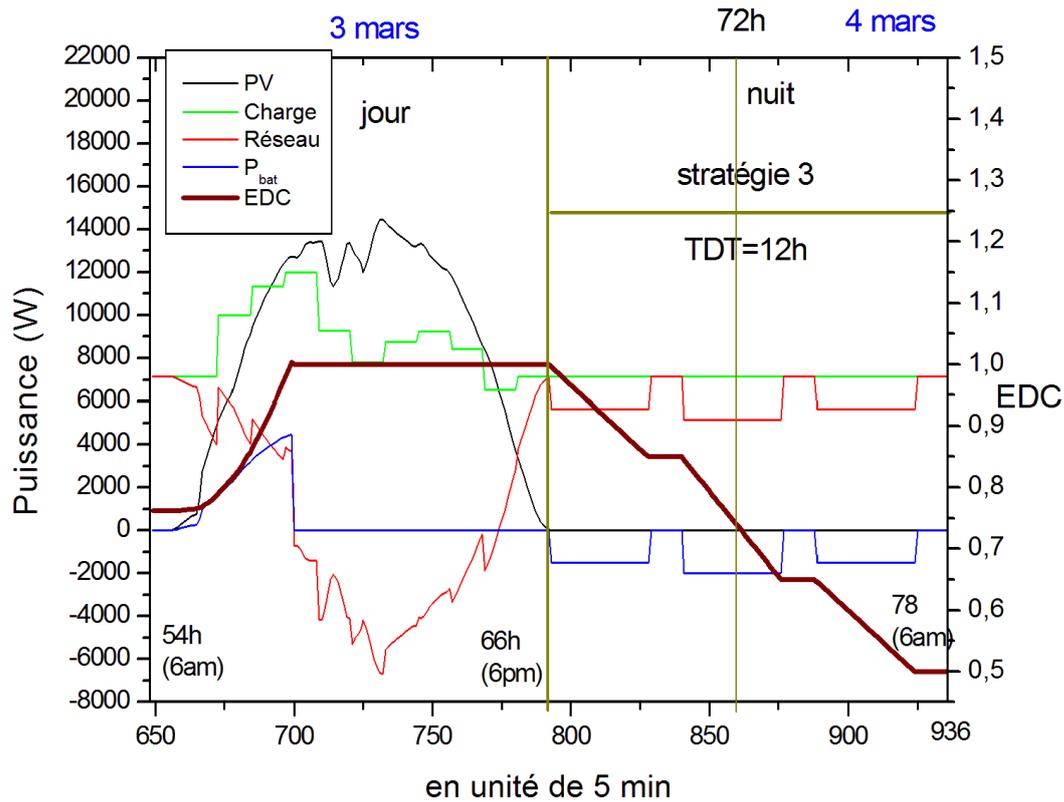


FIGURE 3.5 – Variation des puissances (en W) correspondant au générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unité de 5 minutes) pendant la période entre 6 h (3 mars) et 6 h (4 mars). Dans ce cas, l'état de charge EDC varie à des pentes de raideur différentes avec des paliers.

contractée, est étudié.

Aussi, il est utile de noter que le profil de décharge des batteries affecte la santé des batteries (durée de vie) de manière directe; ce qui exige l'adoption d'un profil convenable. Toutefois, l'examen de ce problème sort du cadre de la présente étude. Notons aussi que la stratégie 1 ne requiert aucune gestion de charge et décharge des batteries; elle a été donc omise dans ce travail.

3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats de la simulation d'une procédure de gestion intelligente de charge et de décharge de batteries dans un système photovoltaïque relié au réseau électrique pour les premiers quatre jours de mars. En effet, nous avons adopté deux stratégies de gestion selon les valeurs respectives de deux paramètres; à savoir le temps de décharge totale TDT et le paramètre d'auto-suffisance en alimentation R_{suff} . Le choix des stratégies est tributaire, d'un côté, de l'énergie requise pour alimenter la charge et, de l'autre côté, de l'énergie disponible (photovoltaïque, réseau et batteries). En effet, la stratégie 2 consiste à éliminer les pics de consommation alors que la stratégie 3, en plus de l'élimination des pics de consommation, propose des profils de décharge dépendant du temps. Les résultats de simulation sont présentés sous forme de variation dans le temps des puissances des différentes sources

d'énergie disponibles, ainsi que l'état de charge des batteries EDC. Ainsi, la gestion intelligente de charge et de décharge des batteries a permis de minimiser le recours au réseau et même à vendre une partie de l'énergie photovoltaïque produite à celui-ci. D'autre part, la présente étude peut être étendue à plusieurs jours et même à plusieurs mois de l'année, afin de prévoir une meilleure gestion de charge et de décharge des batteries.

Bibliographie

- [1] <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-3-archives-for-free>
- [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/intechopen.80562>

Conclusion générale et perspectives

Dans le cadre du travail de ce mémoire, nous nous sommes intéressé à l'application d'une technique de gestion de charge et de décharge de batteries pour un système photovoltaïque relié au réseau (Battery Management System, en anglais). La technique utilisée vise à alimenter une charge d'une unité administrative en assurant la gestion intelligente de stockage d'énergie dans des bancs de batteries. Ladite technique consiste à charger les batteries à l'aide d'un générateur photovoltaïque, lorsque l'énergie solaire est présente, et à décharger les batteries pour écrêter des pics de consommation ; ce qui permet une exploitation efficace de l'énergie solaire et diminuer ainsi le quote part du réseau à l'alimentation de la charge électrique. Tout cela est fait dans le respect des restrictions sur la charge maximum et la décharge profonde des batteries, ainsi que le nombre de cycles de charge/ décharge pour éviter l'endommagement rapide de celles-ci. En effet, la technique de base consiste à procurer au fur et à mesure les données météorologiques du site pour pouvoir calculer l'énergie électrique que pourrait fournir le générateur photovoltaïque, ainsi que la charge électrique à alimenter, laquelle est supposée variable. Dans notre cas, la charge électrique est supposée constante, et les données météorologiques sont tirées d'un site spécialisé libre. La période d'étude s'étale sur quatre jours (premiers jour du mois de mars 2004). La technique de gestion prévoit le calcul de paramètres physiques en relation avec l'énergie produite par le générateur photovoltaïque ainsi que l'énergie requise par la charge électrique durant une période de temps précise. C'est ainsi que le temps de décharge totale est calculé afin de prévoir la durée de la période de gestion de charge et de décharge des batteries. Le choix de la stratégie de gestion à suivre est dicté par la valeur numérique du coefficient d'autosuffisance en alimentation, après le consommateur ait fixe valeur limite. Les résultats de la simulation montrent qu'il est possible, à l'aide de stratégies se basant sur des paramètres pertinents de calcul d'énergie, d'améliorer efficacement l'exploitation de l'énergie photovoltaïque dans un système relié au réseau, tout en protégeant les batteries contre la détérioration prématurée. La technique appliquée prévoit même une vente du surplus d'électricité au réseau.

Enfin, ce mémoire ouvre la porte à plus de travaux sur la présente technique en vue de l'améliorer que ce soit sur le plan numérique ; en cherchant des paramètres plus pertinents dans la prise de décision sur le type de stratégie à suivre, ou encore de l'appliquer à une charge instantanément variable, avec une réception en temps réel des données météorologiques sur une période plus longue ; soit sur le plan de matériel en élaborant un circuit électrique qui assurera la gestion en temps réel de la charge et décharge des batteries.