

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--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 : **GOUTI Faiza**  
**METIDJI Zaki**

Thème

Gestion d'un système de batteries pour un  
système hybride en utilisant l'ANN

Soutenu publiquement, le 02/07/2024 , devant le jury composé de :

Mme N.Benahmed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mr. M.Mebrouki	MCA	ESSA.Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. A.Tahour	Professeur	ESSA.Tlemcen	Examineur 1
Mr.F.Oudjama	MAB	ESSA.Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2023/2024

July 10, 2024

## ملخص

تتناول هذه الأطروحة تقنية إدارة شحن وتفريغ البطاريات في نظام كهروضوئي متصل بالشبكة. تعتمد هذه التقنية على اختيار بين استراتيجيتين لإدارة التخزين. تركز الاستراتيجية الأولى على تقليل ذروات الاستهلاك عندما يكون إنتاج الطاقة الكهروضوئية منخفضًا ولا يكفي لتغطية الحمل الكهربائي. أما الاستراتيجية الثانية، التي تُستخدم عند زيادة إنتاج الطاقة الكهروضوئية، فتهدف إلى تبني منحنيات تفريغ تتكيف مع قيود الشحن والتفريغ للبطاريات لتجنب تلفها السريع. تضمن الإدارة الذكية لشحن وتفريغ البطاريات عمرًا أطول واستخدامًا أمثل للطاقة المنتجة من النظام كهروضوئي، وكذلك إمكانية بيع الفائض من الطاقة إلى الشبكة.

# Résumé

Le sujet de ce mémoire concerne une méthode pour gérer la charge et la décharge des batteries dans un système photovoltaïque connecté au réseau. La technique en question implique de sélectionner deux stratégies de gestion de stockage : la première consiste à prévenir les pics de consommation lorsque la production d'énergie photovoltaïque est faible et ne peut pas couvrir la charge électrique, tandis que la seconde, utilisée lorsque la production d'énergie photovoltaïque est abondante, vise à adopter des profils de décharge adaptés aux restrictions de charge et de décharge des batteries pour prévenir leur détérioration rapide. Grâce à une gestion intelligente de la charge et de la décharge des batteries, il est possible de garantir une durée de vie prolongée des batteries et une utilisation optimale de l'énergie générée par le générateur photovoltaïque et même à vendre l'excès d'énergie au réseau.

**Mots-clés:** Énergie renouvelable, énergie photovoltaïque, système de gestion de batterie, état de charge.

# Abstract

In a grid-connected photovoltaic system, this dissertation focuses on a method for controlling battery charging and discharging. This method involves selecting one of two storage management strategies: the first, which is only effective during peak shaving periods when photovoltaic energy production is low and unable to meet the electrical load, is used in conjunction with an aim to adopt discharge profiles that are compatible with the batteries' charge and discharge limitations in order to prevent rapid battery damage. Effective control over battery charging and discharging guarantees extended battery life, efficient utilization of photovoltaic generating energy, and even the possibility to sell excess energy back to the grid.

**keywords:** Renewable energy, photovoltaic energy, battery management system, state of charge.

# Dédicace

À mes chers parents,

Cette réalisation est le fruit de votre amour inconditionnel, de votre soutien indéfectible et de vos sacrifices incessants. Votre confiance en moi m'a toujours poussé à viser plus haut et à poursuivre mes rêves. Cette dédicace est un humble témoignage de ma gratitude éternelle envers vous.

À mes précieux amis, Votre encouragement, votre camaraderie et vos sourires ont illuminé chaque étape de ce voyage académique. Vos mots d'encouragement ont été une source constante d'inspiration. Cette dédicace est un petit hommage à notre amitié qui transcende les frontières du temps et de l'espace.

À mes enseignants et mentors, Votre expertise, votre guidance et votre passion pour l'enseignement ont été des phares dans mon parcours éducatif. Je suis reconnaissant(e) pour votre patience, votre dévouement et vos efforts constants pour élargir mes horizons intellectuels. Cette dédicace est un témoignage de mon profond respect pour vous.

À toutes les personnes qui ont croisé mon chemin, Chaque interaction, chaque conseil et chaque encouragement ont contribué à façonner mon parcours académique. Votre présence dans ma vie a été une bénédiction. Cette dédicace est un humble hommage à notre connexion, quelle qu'elle soit.

À moi-même, À travers les hauts et les bas, les victoires et les défis, j'ai persévéré et grandi. Cette dédicace est un rappel de ma force intérieure, de ma détermination et de ma capacité à atteindre mes objectifs, peu importe les obstacles. À la vie, à l'apprentissage et à l'avenir qui nous attend, Cette dédicace est un toast à de nouveaux départs, à de nouvelles aventures et à de nouveaux défis. Que chaque pas en avant soit empreint de courage, de sagesse et de compassion.

Faiza

## Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier Dieu, qui me donne la force et la persévérance pour continuer mes études. Alhamdoulilah.

Je souhaite exprimer ma gratitude infinie à ma famille, en particulier à mon père et à ma mère, qui ont toujours été à mes côtés, me soutenant inlassablement dans tous mes efforts. Votre amour et votre dévouement sont les piliers de ma réussite. Merci infiniment.

Je voudrais également remercier ma sœur, dont la présence me rend fort, patient et inébranlable. Que Dieu la guérisse. Vous êtes une source de réconfort et d'inspiration.

Je tiens à remercier mes deux frères, Sami et Rami, pour leur soutien constant et leur encouragement. Je vous souhaite un avenir radieux.

Un grand salut à ma famille élargie : mes oncles, mes tantes et ma grand-mère, qui m'ont toujours entouré d'amour et de bienveillance.

Je tiens à remercier tous les professeurs avec qui j'ai étudié. Je suis honoré d'avoir eu l'opportunité d'apprendre avec des éducateurs de votre calibre. Votre guidance a été inestimable.

Tout d'abord, je tiens à remercier l'encadrant Monsieur Mebrouki, qui nous a aidés à finaliser ce mémoire. Merci beaucoup, Monsieur. Je tiens également à remercier les professeurs Mr. Ghouti, Mr. Ghezouani et Madame Bousmaha. Je suis honoré d'avoir étudié avec vous. Merci beaucoup.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à ma deuxième famille, la famille Abid. Merci beaucoup pour tout ce que vous m'avez donné. Vous m'avez traité comme votre fils et il n'y a pas de mots pour exprimer mon amour et ma reconnaissance pour vous.

Je voudrais aussi remercier mes amis que j'apprécie plus que des frères : Abiza Abdel Hadi, Abid Amin, Abid Mounir, Bella Rami, Nadir Bahria, Youssef Saidani et Benmoussa Ikkal. Merci d'être dans ma vie.

Je tiens à remercier mes amis du lycée avec qui j'ai passé de merveilleux moments : Belaidi Hamza, Mezrag Aissa, Bouferkas Abdesslam, Boudissa Sidali, Kazouit Faicel, Medah Fouad et Adjoudj AHCEN.

Je souhaite enfin exprimer ma gratitude à tous ceux que j'ai connus à l'école de l'ENSTP, tant les travailleurs que les étudiants : Larbi Mohamed, Debbich Badr Eddine, Hanachi Chams Eddine, Bouarou Samy, Bourahla Tayeb, Boudjnah Mahi Eddine, Benayache Sif Eddine, Bouhadi Alaa Eddine, Sidahmed, Mokrane ChoaiB, Abes Yacine, Guendouz Anis, Hachid Imad, Tayeb l'agent, Boumerdassi Tinhinen, et bien d'autres. Vous êtes vraiment merveilleux.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à tous les étudiants que j'ai connus à l'école de l'EPAU : Bouarouri Azzouz, Lazaoui Tarek, Bouchouka Slimane, Sidahmed et à tous ceux avec qui j'ai partagé cette expérience.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude à tous les étudiants de l'école ESSAT que j'ai connus : Souda Abd Elkrim, Guerouaz Abd Elkrim, Guenim Amine, Chanafi Taha, Diab Djaber, Neggar Anes, Benaissa Aymen ainsi qu'à tous les étudiants de cinquième année en génie électrique, automatique et génie industriel.

Merci à tous.

Zaki



# Remerciment

Chers [Monsieur Mebrouki],

Nous tenons à vous exprimer toute notre gratitude pour votre soutien, votre encadrement et votre guidance tout au long de notre projet de fin d'études. Votre expertise et vos conseils ont été d'une valeur inestimable pour nous, et ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement toute l'équipe [de l'École Supérieure des Sciences Appliquées] pour leur collaboration et leur assistance précieuse. Leur expertise et leur disponibilité ont été des éléments clés dans la réalisation de ce projet.

Enfin, nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers nos proches, notre famille et nos amis, pour leur soutien constant et leur encouragement tout au long de cette période exigeante.

Ce projet de fin d'études a été une expérience enrichissante et formatrice pour nous, et nous sommes reconnaissants d'avoir eu l'opportunité de le mener à bien. Nous sommes fiers du travail accompli et reconnaissants envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réussite.

Merci encore pour tout.

Bien cordialement,

# Table de Matières

Resume	i
Dédicace	iii
Dédicace	iv
Remerciment	vi
Liste de Figures	x
Liste de Tableaux	xii
Abbréviations	xiii
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>Généralités sur les batteries</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction . . . . .	5
I.2 Description des différents types de stockage: . . . . .	5
I.3 Batteries: . . . . .	5
I.4 Les différentes technologies: . . . . .	6
I.4.1 La batterie Plomb-acide . . . . .	7
I.4.2 La batterie Nickel-Cadmium: . . . . .	7
I.4.3 La batterie Lithium: . . . . .	7
I.5 Constitution et principe de fonctionnement d'une batterie: . . . . .	8
I.6 Caractéristiques de performance de la batterie: . . . . .	9
I.6.1 Batterie en charge: . . . . .	9
I.6.2 Charge globale ou normale: . . . . .	9
I.6.3 Charge flottante ou de finition: . . . . .	9
I.6.4 Charge d'égalisation: . . . . .	10
I.7 Décharge de la batterie: . . . . .	10
I.7.1 Profondeur de décharge: . . . . .	10
I.7.2 État de charge: . . . . .	10
I.7.3 Auto-décharge: . . . . .	11
I.7.4 Durée de vie de la batterie: . . . . .	11
I.7.5 Effets de la température: . . . . .	11

I.8	Capacité de stockage de la batterie: . . . . .	12
I.9	Types de batteries : . . . . .	13
I.9.1	Accumulateur au plomb : . . . . .	13
I.9.2	Accumulateur Ni-Cd et Ni-MH : . . . . .	13
I.9.3	Accumulateurs Lithium : . . . . .	14
I.10	Conclusion: . . . . .	15
<b>SYSTÈME DE GESTION DES BATTERIES</b>		<b>16</b>
II.1	Introduction . . . . .	17
II.2	Système de gestion de batterie : . . . . .	17
II.3	Topologie : . . . . .	18
II.3.1	BMS centralisé : . . . . .	19
II.3.2	BMS modulaire : . . . . .	20
II.3.3	BMS distribué: . . . . .	21
II.3.4	BMS maître-esclave : . . . . .	22
II.4	Fonctionnalités assurées par le BMS: . . . . .	22
II.5	Contrôle de la charge de batterie: . . . . .	23
II.6	Estimation de l'état de charge : . . . . .	24
II.7	Gestion intelligente de charge et de décharge de batteries: . . . . .	24
II.7.1	Description du système: . . . . .	24
II.8	Modélisation des générateurs PV: . . . . .	26
II.9	Modélisation du stockage électrochimique: . . . . .	27
II.10	Bilan énergétique provisionnel et gestion du stockage: . . . . .	28
II.11	Définition du temps total de décharge: . . . . .	29
II.12	Sélection de la stratégie de gérer le stockage: . . . . .	31
II.13	Mise en place de stratégies de gestion du stockage : . . . . .	32
II.14	Conclusion . . . . .	34
<b>Généralités sur les réseaux de neurones</b>		<b>36</b>
III.1	Introduction . . . . .	36
III.2	Base biologique : . . . . .	36
III.3	Modélisation mathématique du neurone biologique: . . . . .	36
III.3.1	Le neurone artificiel : . . . . .	36
III.4	Principes d'un neurone artificiel : . . . . .	37

III.5 Fonctions d'activations : . . . . .	38
III.6 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones: . . . . .	39
III.6.1 Avantages des réseaux de neurones : . . . . .	39
III.6.2 Inconvénients des réseaux de neurones : . . . . .	40
III.7 Utilisation de la méthode des réseaux de neurones artificiels dans la gestion de charge et de décharge des batteries: . . . . .	40
III.8 Conclusion: . . . . .	41
<b>Chapitre 4: RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>42</b>
IV.1 Introduction: . . . . .	43
IV.2 Paramètres de simulation: . . . . .	43
IV.3 Temps de décharge totale: . . . . .	44
IV.4 Stratégie 2 pour la gestion de la charge/décharge des batteries . . . . .	50
IV.5 Stratégie 3 pour la gestion de la charge/décharge des batteries: . . . . .	51
IV.6 Stratégie de chargement batteries dans la journée: . . . . .	52
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>55</b>

# Liste de Figures

I.1	Schéma de principe de fonctionnement de la pile . . . . .	6
I.2	Constitution d'une batterie . . . . .	8
I.3	Batterie Plomb-Acide[1] . . . . .	13
I.4	Les batteries Nickel Métal Hydride (Ni-MH) . . . . .	14
I.5	Les batteries Nickel Cadmium (Ni-cd) . . . . .	14
I.6	Les batteries Lithium (Li-ion) . . . . .	15
II.1	Diagramme générique d'un BMS police . . . . .	18
II.2	Schéma synoptique de BMS centralisé . . . . .	19
II.3	Schéma synoptique de BMS modulaire . . . . .	20
II.4	Schéma synoptique de BMS distribuée . . . . .	21
II.5	Schéma synoptique de BMS maitre-esclave . . . . .	22
II.6	Architecture fonctionnelle d'un système de gestion de batterie (BMS) . . . . .	23
II.7	Système PV-stockage étudié [23]. . . . .	25
II.8	Définition du temps de décharge totale [23]. . . . .	30
II.9	Organigramme pour la définition de la stratégie de gestion de charge et de décharge des batteries [23] . . . . .	33
III.1	Neurone biologique. . . . .	36
III.2	Modèle d'un neurone artificiel . . . . .	38
III.3	principes d'un neurone artificiel. . . . .	38
III.4	Fonctions d'activations les plus utilisées. . . . .	39
IV.1	Variations des puissances ainsi que la variation de l'état de charge pendant un mois tous les stratégies de charge/décharge pendant le mois de mars 2004 à Tlemcen . . . . .	48
IV.2	Puissances (en Watts) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unités de 5 minutes) pendant la période du 3 mars à 18 heures au 4 mars à 6 heures. . . . .	49
IV.3	Puissances (en Watts) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unités de 5 minutes) pendant la période de 36 heures, du 5 mars au 7 mars. . . . .	51

IV.4 Puissances (en W) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unités de 5 minutes) entre 6 h le 22 mars et 6 h le 24 mars. Dans cette situation, l'état de charge (EDC) fluctue avec une pente légèrement abrupte. . .	52
IV.5 Évolution de la puissance électrique (en W) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge, ainsi que l'état de charge des batteries sur une période de 6h à 18h le 24 mars, avec chargement de la batterie. . . . .	53

# Liste de Tableaux

III.1 L'analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels . . . . .	39
III.2 Tableau des actions en fonction des conditions . . . . .	41
IV.1 Données géographiques du site de Tlemcen . . . . .	43
IV.2 Paramètres techniques du générateur photovoltaïque et des batteries. . . . .	44
IV.3 Valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site de Tlemcen . . . . .	45
IV.4 Tableau des stratégies et batteries avec les intervalles correspondants. Le temps est pris en unité de 5 minutes à partir de 1 mars à 00 h jusqu'à 31 mars . . . . .	47

# Abbréviations

**S.E.H:** système d'énergie hybride

**PV:** photovoltaïque



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cours des deux dernières décennies, on a constaté une augmentation significative de la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité. Ce processus a été accéléré en raison, d'un côté, des risques de réchauffement climatique qui se font de plus en plus sentir et, de l'autre côté, grâce aux progrès technologiques qui ont facilité la maîtrise des mécanismes et des outils professionnels. Parce que les énergies renouvelables (solaire, éolienne, etc.) ont un comportement intermittent, la production d'énergie à partir de ces ressources crée une incertitude dans leur exploitation

En cas de besoin d'électricité, l'énergie éolienne ainsi que le solaire peuvent ne pas être disponibles. La mise en place d'un système de stockage d'énergie pour réduire l'incertitude liée à la production solaire-éolienne renforcera la fiabilité et la sûreté de la production. Ce modèle de stockage peut jouer un rôle essentiel dans la gestion de l'énergie et ainsi neutraliser les fluctuations de l'énergie produite sur une période temporelle désirée. Il peut également servir à réduire les fluctuations de la puissance de la charge. Le stockage d'énergie nécessaire varie en fonction de l'application. En matière de stockage solaire, les batteries d'accumulateurs au plomb-acide sont utilisées car elles peuvent résister à de nombreux cycles de charge et de décharge sans être endommagées, en plus de leur faible coût.

Le surplus d'électricité produite est ensuite restitué en cas de besoin afin de garantir le fonctionnement lorsque l'énergie solaire n'est pas suffisante ou indisponible. De plus, la batterie doit être capable de répondre aux besoins d'une charge sur une période de plusieurs jours. Il est donc nécessaire d'avoir des régulateurs de charge et de décharge afin de restreindre la profondeur de la décharge, de limiter le courant de charge et d'éviter les surcharges, tout en optimisant l'utilisation de l'énergie solaire lorsque celle-ci est disponible.

Dans cette situation, l'accent est mis principalement sur l'utilisation d'une méthode de gestion intelligente de la charge et de la décharge des batteries dans un système photovoltaïque connecté au réseau. Le but de notre recherche est d'exploiter l'énergie solaire du jour pour charger des batteries afin de les utiliser ultérieurement pour le stockage lorsque l'énergie solaire est absente. Le fait d'utiliser le réseau permet d'éviter tout risque d'interruption de l'alimentation en énergie.

Ainsi, le stockage d'énergie permet de limiter les pics de consommation tout en garantissant que les batteries ne se vident pas complètement ou ne se surchargent pas.

La gestion de la charge et de la décharge des batteries dépend du calcul de paramètres qui nous serviront d'indicateurs pour sélectionner les stratégies de stockage. Dans ce travail, nous avons choisi une période d'un mois (mars 2004) pour laquelle nous avons recueilli les données météorologiques à partir de sites à accès libre. L'alimentation électrique est celle d'une unité

administrative d'une société algérienne.

L'organisation du présent mémoire est la suivante : Dans le premier chapitre, nous introduisons le lecteur aux concepts essentiels du stockage d'énergie, à ses caractéristiques et à ses différentes méthodes. Au cours du deuxième chapitre, nous examinons le système de gestion de la batterie avec ses différentes formes et fonctionnalités, ainsi que les détails techniques sur la gestion de la charge et de la décharge des batteries pour un système photovoltaïque connecté au réseau. Le dernier chapitre se focalise sur les résultats de la simulation numérique de la technique de gestion des batteries. De plus, il y a une discussion sur les résultats. Le mémoire se termine par une conclusion où nous présenterons les résultats principaux de notre travail, ainsi que les perspectives.

# Chapitre 01 : Généralités sur les batteries

## I.1 Introduction

Depuis que Gaston Planté a inventé la première batterie rechargeable au plomb-acide en 1859, les batteries ont bouleversé la manière dont l'énergie est stockée. Aujourd'hui, elles ont rendu possible une mobilité et une indépendance considérables pour des secteurs qui étaient auparavant condamnés à être fixes (comme les télécommunications, les instruments de mesure, les appareillages médicaux...etc.). D'autre part, les batteries sont des solutions incontournables dans le domaine de l'aéronautique, de l'espace (lanceurs, satellites) et récemment dans les smartphones, les tablettes et les véhicules électriques.

Ce chapitre se concentre sur la définition du principe de fonctionnement des batteries, ainsi qu'une classification des diverses catégories de batteries. Par la suite, nous aborderons les diverses technologies des batteries.

## I.2 Description des différents types de stockage:

Les unités de stockage jouent un rôle crucial dans les systèmes isolés. En effet, lorsqu'elles sont correctement dimensionnées, elles contribuent à assurer l'indépendance du site en servant de réserve d'énergie lorsque les sources produisent en surplus, et en la restituant lorsqu'elles ne produisent plus suffisamment. Cependant, en dehors de cette gestion à moyen terme, elles sont tout à fait nécessaires dans un système isolé du réseau afin de garantir à chaque instant l'équilibre énergétique dans le circuit. Effectivement, le principe de conservation stipule que la puissance générée par les sources est proportionnelle à la somme de la puissance consommée par l'utilisateur et de celle absorbée par le système lui-même, en cas de pertes environnantes. À un certain moment, il est peu probable que la puissance générée soit égale à celle consommée. Il n'est possible d'absorber la différence que par un réseau connecté à d'autres sources ou utilisateurs afin d'équilibrer l'équation. Il est donc essentiel d'avoir une solution de stockage pour garantir cet équilibre, ce qui entraîne une variation de l'énergie interne du système. Nous examinerons les divers éléments qui peuvent jouer ce rôle dans le cas d'un système de petite puissance qui peut être utilisé par un individu.[9]

## I.3 Batteries:

**Principe de fonctionnement:** Les batteries d'accumulateurs constituent la méthode la plus couramment employée pour le stockage d'électrochimiques de petite taille . En offrant des technologies avancées et à des prix abordables, elles effectuent une réaction d'oxydoréduction

en utilisant le principe de la pile afin de stocker de l'énergie électrique à la charge, qui peut être efficacement restituée à la décharge. environ 85 % en fonction des types d'accumulateurs. Les électrodes, l'anode et la cathode, sont immergées dans une solution ionique, comme illustré dans la figure I.1. En présence d'un courant de charge, les molécules de la cathode subissent une oxydation, ce qui entraîne la perte d'électrons. Ces éléments sont transmis dans le réseau électrique, engendrant ainsi le courant spécifique. Ensuite, les électrons se rendent à l'anode afin de produire une réduction sur les molécules qui la composent. Les électrodes trouvent donc les ions qui découlent de deux demi-équations (voir littérature) dans leurs solutions ioniques respectives. On les sépare grâce à l'utilisation d'un électrolyte, une solution ionique non réactive. D'après les exigences, les ions positifs et négatifs se déplacent respectivement vers la solution de l'anode et de la cathode, ce qui produit une neutralité électronique des deux solutions. Lors de la décharge, les réactions d'oxydation et de réduction inverses se déroulent en raison du courant inverse, ce qui permet à nouveau de faire migrer les électrons de l'anode vers la cathode. Au fur et à mesure que les électrodes se reconstruisent, les concentrations d'ions diminuent dans les solutions, ce qui entraîne une reconstruction de l'électrolyte.

Au cours du dernier siècle, de nombreuses technologies ont été développées en se basant sur ce principe.[9]

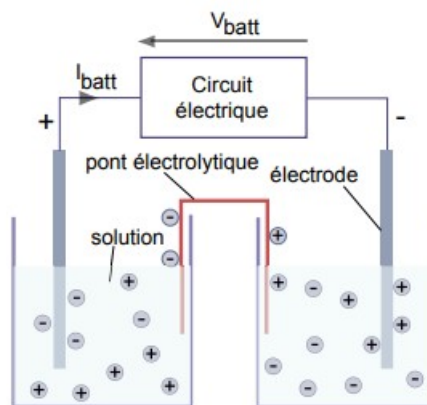


Figure I.1: Schéma de principe de fonctionnement de la pile [9].

#### I.4 Les différentes technologies:

Les industriels utilisent actuellement trois catégories de batteries en fonction de la nature de leurs électrodes : les batteries à plomb-acide, les batteries à nickel et les batteries à lithium [?][25]. La tension nominale en charge d'un élément de batterie, l'accumulateur, d'une technologie spécifique est déterminée par le couple oxydo-réducteur utilisé. Cette tension correspond

au potentiel d'oxydoréduction spécifique à ce couple. La capacité  $C_{batt}$  en Ah est la deuxième caractéristique essentielle, qui détermine le courant qui permet de recharger complètement une batterie en un délai spécifique. Deux critères essentiels permettent de déterminer s'ils conviennent à l'application souhaitée. Tout d'abord, leur durée de vie est évaluée en fonction du nombre de cycles de charge-décharge profonde qu'ils peuvent réaliser. La décharge profonde est limitée à 80 % de leur capacité de fonctionnement. Ensuite, l'énergie spécifique des accumulateurs, qui correspond à leur énergie massique ou volumique, peut être stockée par unité de masse ou de volume. Ainsi, elle reflète la légèreté et la compacité de la méthode de stockage utilisée.

#### **I.4.1 La batterie Plomb-acide**

Le stockage électrochimique rechargeable est le type de stockage le plus ancien, créé en 1859 par le physicien Gaston Planté. Aujourd'hui encore employées, en particulier dans les voitures à moteur thermique, elles profitent d'une avancée technologique remarquable et sont abordables, ce qui en fait une option toujours attrayante. Une cathode en oxyde de plomb  $PbO_2$  et une anode en plomb  $Pb$  sont présentes. Une tension de pleine charge de 2,1 V est observée, au-delà de laquelle se produit un processus de gazéification de l'électrolyte en sulfate de plomb.

#### **I.4.2 La batterie Nickel-Cadmium:**

a obtenu son brevet en 1899. Cette technologie ancienne, qui utilise des électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en cadmium, ainsi qu'un électrolyte alcalin, présente une faible énergie spécifique, allant de 45 à 85 Wh/kg, et utilise principalement des matériaux polluants. Il est donc préférable d'opter pour une alternative plus récente, la batterie Nickel-Hydrure Métallique. Elle emploie des électrodes fabriquées à partir d'hydroxyde de nickel et d'hydrure métallique, qui sont moins polluants que le cadmium, ainsi que de la potasse. Comme son précédent, elle se sert d'accumulateurs avec une tension nominale de 1,25 V.

#### **I.4.3 La batterie Lithium:**

La batterie Lithium est largement utilisée dans l'électronique embarquée dans des produits de grande consommation, comme les ordinateurs et les téléphones portables, depuis environ vingt ans. La batterie Lithium-Métal de première génération utilise du lithium sous forme métallique, ce qui peut entraîner une explosion en cas de défaut d'étanchéité. La batterie Lithium-Ion qui est couramment utilisée est celle qui est ionique et oxydée, ce qui réduit les problèmes de

sécurité et offre une tension nominale de 3,6 V ou 3,7 V.[13]

## I.5 Constitution et principe de fonctionnement d'une batterie:

Une batterie est un appareil qui transforme directement l'énergie chimique en énergie électrique. Il s'agit d'une ou plusieurs cellules de conversion de l'énergie.[5] Les deux électrodes (une cath-

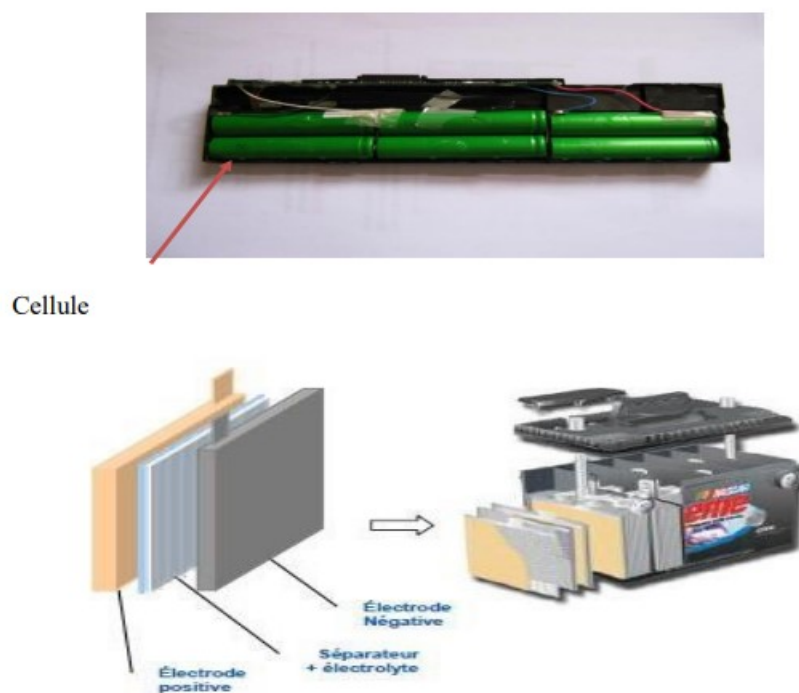


Figure I.2: Constitution d'une batterie  
[5]

ode et une anode) ainsi qu'un séparateur et un électrolyte constituent chaque cellule. En ce qui concerne la charge de la batterie, la vitesse de charge dépend de la capacité en Ah de celle-ci.

En théorie, une source de courant de 400 mA permettrait de recharger une batterie de 400mAh en une heure. Effectivement, la capacité d'une batterie est restreinte par la quantité de matériaux actifs contenus dans chaque dispositif. Prenons l'exemple d'une batterie chargée à 100% au début du cycle de décharge. En interaction avec une charge électrique, chaque cellule de la batterie subit une réaction d'oxydo-réduction. Ainsi, les électrons se déplacent de l'anode vers la cathode. L'énergie chimique est transformée en énergie électrique par ce transfert, et le courant qui en découle traverse le circuit extérieur. Effectivement, lorsque l'on charge une cellule de la batterie, cela signifie que l'électrode négative est placée à un potentiel plus positif que son potentiel d'équilibre, tandis que l'électrode positive est placée à un potentiel plus négatif que son potentiel d'équilibre. Une réaction d'oxydation se produit lorsque le potentiel



remonte sur l'électrode négative : l'espèce réactive de l'électrode va céder ses électrons afin de se rapprocher du potentiel externe que nous lui imposons.

De son côté, la réaction de réduction se produit sur l'électrode positive où nous provoquons une diminution du potentiel. En d'autres termes, l'espèce réactive de l'électrode va capter les électrons qui ont traversé le dispositif extérieur afin de se rapprocher du potentiel que nous lui imposons de l'extérieur.

Ainsi, il est évident que la décharge d'une pile implique des échanges ioniques entre les électrodes, à travers la solution électrolytique : des cations se déplacent vers l'anode ou des anions vers la cathode, ou les deux. Il est nécessaire de garantir la neutralité électrochimique au sein de l'électrolyte, ce qui entraîne des variations de concentration des espèces et des transferts de ces espèces par diffusion et migration [6].

## **I.6 Caractéristiques de performance de la batterie:**

### **I.6.1 Batterie en charge:**

Les différentes méthodes et procédures de charge des batteries varient considérablement. Dans la section suivante consacrée aux régulateurs de charge de batterie, nous étudierons les différentes approches et les aspects liés à la charge des batteries. En outre, les constructeurs de batteries distinguent habituellement trois types de charges pour les batteries : la charge normale ou en vrac, la charge de finition ou flottante, et la charge d'égalisation[2].

### **I.6.2 Charge globale ou normale:**

La phase initiale d'un cycle de charge est la charge en vrac ou normale, où la batterie est chargée à un niveau qui empêche la tension de la cellule de dépasser la tension de gazéification. En général, ce type de charge se produit jusqu'à ce que l'état de charge atteigne environ 80 à 90 %[2].

### **I.6.3 Charge flottante ou de finition:**

La batterie est chargée de manière flottante ou de finition lorsque son état de charge complet approche. À ce moment-là, une grande partie du matériau actif présent dans la batterie a déjà été transformée en sa forme initiale. En règle générale, il est nécessaire de réguler la tension

et/ou le courant afin de contrôler la charge fournie à la batterie afin d'éviter la surcharge. En général, la charge de finition est réalisée à des taux de charge assez bas à moyens[2].

#### **I.6.4 Charge d'égalisation:**

On utilise régulièrement des charges d'égalisation ou de rafraîchissement pour assurer l'homogénéité entre les cellules individuelles. En général, une charge d'égalisation se réfère à une charge à courant limité qui atteint des limites de tension supérieures à celles de la charge de finition ou flottante. Pour les batteries qui sont continuellement déchargées, il est conseillé d'effectuer une charge d'égalisation toutes les une à deux semaines. Pour les batteries dont la décharge est moins fréquente, il peut être nécessaire de les égaliser seulement toutes les une à deux mois. Il est recommandé de maintenir la charge pendant une charge d'égalisation jusqu'à ce que les tensions des cellules et les densités spécifiques demeurent constantes pendant quelques heures.[2].

### **I.7 Décharge de la batterie:**

#### **I.7.1 Profondeur de décharge:**

La profondeur de décharge (DOD: Depth of discharge en anglais) joue un rôle essentiel dans la gestion des batteries. Elle correspond au pourcentage de la capacité d'une batterie qui a été déchargée par rapport à sa capacité totale. Il est crucial de surveiller et de contrôler la DOD afin d'assurer des performances optimales de la batterie et sa durée de vie, car décharger une batterie au-delà de sa DOD recommandée peut endommager sa longévité et réduire ses performances globales. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la DOD, telles que des mesures de tension ou l'utilisation de jauges de contrainte pour surveiller les modifications structurelles au sein de la batterie. Il est essentiel de comprendre et de gérer la DOD dans le cadre de ce mémoire, car cela a un impact direct sur l'efficacité et la durabilité des systèmes de batterie [12][8].

#### **I.7.2 État de charge:**

La capacité disponible d'une batterie est mesurée par l'état de charge (SOC: state of charge en anglais), qui est exprimé en pourcentage de sa capacité nominale. Il est crucial de prendre en compte ce paramètre dans les systèmes de batterie dans différentes applications, telles que les véhicules électriques, le stockage d'énergie renouvelable et les appareils mobiles. En mesurant de manière précise et en comprenant le SOC, il est possible de gérer et d'utiliser de manière

efficace les systèmes de batterie, assurant ainsi des performances optimales et un fonctionnement robuste. Ainsi, dans le cadre de ce mémoire, il est crucial d'analyser l'état de charge des batteries afin de saisir leur comportement et leur efficacité dans diverses situations concrètes[18][11].

### **I.7.3 Auto-décharge:**

Le terme "autodécharge" désigne la diminution progressive de la capacité électrique d'une batterie lorsqu'elle n'est pas utilisée, due à des processus électrochimiques internes. Ce phénomène est plus marqué lorsque les températures augmentent. Afin de limiter l'autodécharge, il est possible de stocker les batteries à des températures plus basses, ce qui contribue à diminuer la perte de capacité au fil du temps. Il est essentiel de bien gérer l'autodécharge afin d'assurer l'efficacité et les performances à long terme des batteries[15].

### **I.7.4 Durée de vie de la batterie:**

Dans la gestion des batteries, il est essentiel de prendre en compte la durée de vie de la batterie, car elles vieillissent inévitablement au fil du temps et peuvent perdre leur capacité à stocker et à fournir de l'énergie de manière efficace. Les avancées technologiques dans ce domaine ont démontré des opportunités pour améliorer la durée de vie des batteries, à la fois en termes de production et de gestion. Toutefois, il est difficile de prédire de manière précise la durée de vie en raison de la simplification des modèles et des erreurs de mesure dans les systèmes de test. Les modèles de vieillissement physico-chimique sont souvent employés pour la prédiction en raison de leur simplicité et de leur faible charge de travail. Ces méthodes peuvent constituer des outils précieux pour évaluer la rentabilité des stratégies d'optimisation et améliorer la qualité de l'énergie renouvelable. Cependant, il est essentiel de développer davantage pour les intégrer dans les systèmes électriques [28][14].

### **I.7.5 Effets de la température:**

L'influence de la température sur les performances des cellules électrochimiques, y compris des batteries, est importante. Le taux des réactions électrochimiques est généralement double à une augmentation de température de 10°C, ce qui entraîne une diminution d'un facteur deux de la durée de vie des batteries pour chaque augmentation de 10°C de la température de fonctionnement moyenne. La corrosion des grilles de la plaque positive peut être accélérée par des températures plus élevées, ce qui entraîne une augmentation de la formation de gaz et de la perte d'électrolite. En revanche, une température de fonctionnement plus faible favorise

généralement une longue durée de vie de la batterie. Toutefois, une baisse de température entraîne également une diminution importante de la capacité, en particulier dans le cas des batteries au plomb-acide. Afin de réduire les conséquences des fluctuations de température importantes, les batteries sont généralement stockées dans des boîtiers isolés ou régulés en température afin de réduire au minimum les conséquences néfastes sur les performances de la batterie[2].

## I.8 Capacité de stockage de la batterie:

La quantité d'énergie stockée dans une batterie est proportionnelle à sa capacité de stockage. En règle générale, elle est exprimée en Ah (ampères-heures). La quantité de matériel d'électrolyte et d'électrodes présente dans la cellule a un impact sur sa capacité de stockage, et vice versa. En fait, une cellule plus petite a une capacité de stockage inférieure à celle d'une cellule plus grande, même si elles développent la même tension en circuit ouvert[5].

La durée de décharge prévue est toujours liée à la capacité nominale de la batterie:

$$t = \frac{Q}{I} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

Q : est la capacité de stockage de la batterie, en mAh ou en Ah

I : est le courant débité en mA ou en A.

t : est le temps en heure que la batterie met pour une décharge complète.

La capacité de la batterie varie également en fonction de son mode de décharge. Dans le cas où une batterie est déchargée à un taux plus élevé, la capacité disponible sera inférieure à celle prévue. W. Peukert a d'abord fourni une explication mathématique de la cause de ce phénomène en 1897. Ainsi, ce phénomène suit une loi qui peut être décrite de la manière suivante [5].

$$Q = I^K \cdot t \quad (\text{I.2})$$

Avec :

Q : est la capacité de stockage de la batterie en Ah.

I : est le courant de décharge en A.

t : est le temps de décharge en heure

K : est la constante de Peukert pour une technologie de batterie donnée

## I.9 Types de batteries :

Une fois que nous avons présenté le principe de fonctionnement et les divers paramètres de performance d'une batterie, nous allons aborder les différents types de batteries les plus couramment utilisés :[10]

- Accumulateur au plomb (batteries de voitures).
- Accumulateur Ni-Cd et Ni-MH (petits accumulateurs pour appareils électroniques).
- Accumulateur aux ions Lithium (ordinateurs et téléphones portables, appareils photo, voitures électriques)

### I.9.1 Accumulateur au plomb :

La batterie au plomb acide est la méthode la plus répandue pour stocker de l'énergie électrique, en raison de son prix relativement abordable et de sa disponibilité élevée.



Figure I.3: Batterie Plomb-Acide[1]

### I.9.2 Accumulateur Ni-Cd et Ni-MH :

L'énergie volumique des accumulateurs NI-MH est supérieure d'au moins 30% par rapport aux accumulateurs Ni-Cd (Cadmium-Nickel). Actuellement, les voitures hybrides utilisent généralement des batteries Ni-MH (moteur à combustion + moteur électrique). Bien que leurs performances soient inférieures à celles des batteries à base de lithium, elles conservent l'avantage de faire face à des courants de charge et de décharge élevés et sont bien plus sécurisées en cas de surchauffe. En outre, elles présentent des bénéfices indéniables en ce qui concerne la préservation de l'environnement par rapport aux batteries Ni-Cd et sont peu affectées par l'effet latente. L'accumulateur ne peut plus se décharger comme auparavant, ce qui donne l'impression de pouvoir stocker moins d'énergie. Cependant, en réalité, c'est plutôt la restitution qui pose

problème car l'énergie n'est plus accessible de la même manière. En général, cette diminution des performances est constatée lorsqu'une utilisation occasionnelle est plus exigeante que l'utilisation habituelle (par exemple, une batterie qui décharge habituellement 60% de manière répétitive et à laquelle nous demandons une décharge complète).[26]



Figure I.4: Les batteries Nickel Métal Hydride (Ni-MH)

[26]

Les accumulateurs Ni-CD se distinguent par leur solidité et leur longévité exceptionnelle pour des conditions moins exigeantes que d'autres couples. C'est pourquoi ils sont employés dans les applications portables qui nécessitent une puissance élevée ou une température relativement élevée (comme les blocs d'éclairage de sécurité autonomes). Certains modèles offrent également la possibilité de charger très rapidement (15 minutes). En résumé, l'utilisation de ces accumulateurs diminue en raison du risque de contamination de l'environnement. Cependant, il est assez facile de recycler le cadmium dans l'application des batteries.[26]



Figure I.5: Les batteries Nickel Cadmium (Ni-cd)

[26]

### I.9.3 Accumulateurs Lithium :

Les batteries au lithium ont toujours suscité un vif intérêt, non seulement parce que le lithium est le métal le plus léger, mais aussi parce qu'il possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui fait qu'il peut facilement se transformer en ion  $\text{Li}^+$ .

L'échange réversible de l'ion lithium entre l'électrode positive et l'électrode négative est l'élément clé de la batterie lithium-ion. Selon la technologie, la tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 V ou 3,7 V.[5]



Figure I.6: Les batteries Lithium (Li-ion)

[5]

## I.10 Conclusion:

Ce chapitre a exposé des concepts généraux, des notions et des définitions sur les différents types de batteries, en expliquant le principe de fonctionnement des batteries. Nous avons parlé en général de la caractéristique de performance des batteries ainsi que la capacité de stockage des batteries.

Chapitre 02 :  
SYSTÈME DE GESTION DES BATTERIES



## II.1 Introduction

Les mesures de sécurité de fonctionnement pour les technologies de stockage à base de lithium sont indispensables en raison des dangers identifiés et analysés lors des essais abusifs (conditions de fonctionnement extrêmes). Pour un usage domestique, il est primordial que les éléments de stockage exposés à divers accidents, soient soumis à diverses mesures de sécurité garantissant la sécurité du public et du personnel de secours (pompiers) lors des interventions.

Il est primordial de prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter que les divers éléments ne sortent de leur zone de fonctionnement optimale, ce qui restreint leur vieillissement. De ce fait, un système de gestion des batteries (BMS: Battery management system en anglais) constitué de diverses fonctions de gestion plutôt complexes, comme la gestion et la supervision est plus que nécessaire. Nous présentons dans ce chapitre le système de gestion de batterie, ainsi que ses diverses fonctions et leurs objectifs clés.

## II.2 Système de gestion de batterie :

Un système de gestion de batteries (BMS) est un ensemble de circuits et de composants électriques qui est lié au bon fonctionnement de la batterie. Comme le montre la figure [II.1](#).

Le module de stockage est équipé d'un système de gestion et de distribution d'énergie appelé système de gestion de batterie (BMS) pour certaines applications alimentées par batterie. Afin d'améliorer ses résultats en fonction des exigences de la mission tout en réduisant les risques de détérioration de la batterie, ce système interagit avec les autres modules intégrés et fonctionne en temps réel pour le contrôle de la charge/décharge. La batterie est protégée contre la surcharge et la surdécharge grâce à ce contrôle. Pendant toute la mission, un BMS est chargé de réaliser diverses tâches telles que la détection de l'état de charge, la gestion électrique et la sécurité[5][7][27].

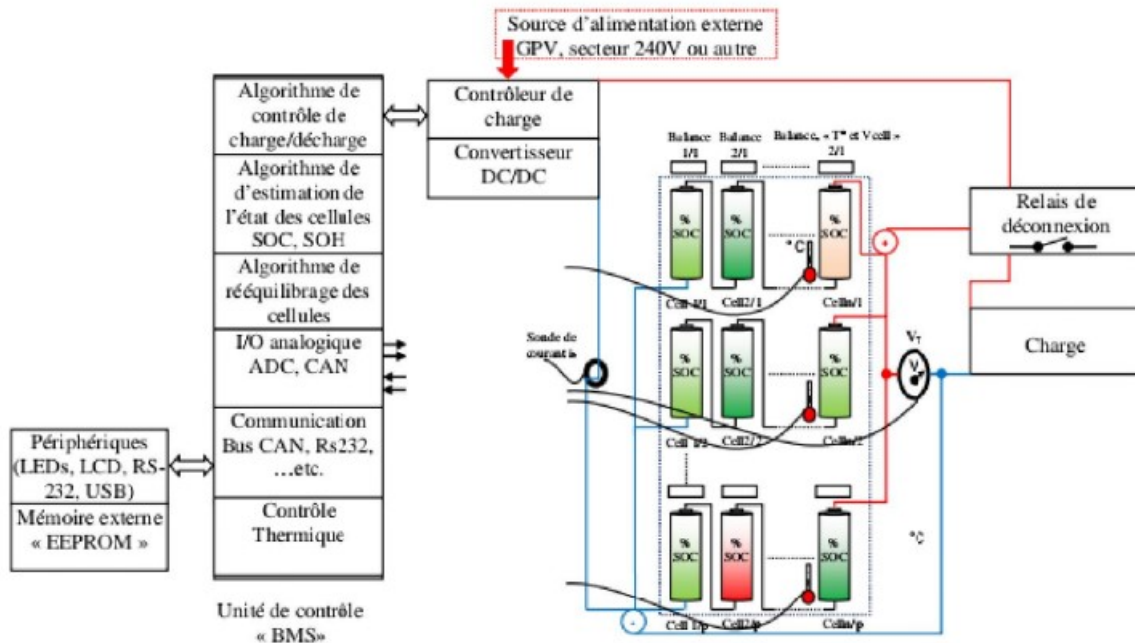


Figure II.1: Diagramme générique d'un BMS police [5]

### II.3 Topologie :

Différentes topologies sont utilisées dans la conception des BMS. En fonction de l'architecture et de la complexité de la batterie, il est possible d'opter pour une topologie plus appropriée. D'après Andrea, Saw et Weiker, il existe quatre types principaux de topologies de BMS [20]. Il existe diverses catégories de BMS qui peuvent différer selon la complexité et les performances requises :

- Des régulateurs passifs simples permettent de maintenir un équilibre entre chaque cellule en "évitant" certaines cellules lorsque leur tension atteint un niveau spécifique.
- Régulateurs intelligents actifs qui permettent de démarrer et de mettre fin à une partie du chargement.
- Un système de gestion complète qui affiche l'état de la batterie et protège la batterie en cas de dysfonctionnement.

On peut classer les BMS en trois catégories :

### II.3.1 BMS centralisé :

Selon la figure II.2, le BMS centralisé est composé d'une seule unité de contrôle qui enregistre la tension de chaque cellule, le courant de sortie de la batterie et réalise les algorithmes d'estimation. Il est adapté aux batteries de petite taille en raison de sa simplicité, mais le câblage peut devenir extrêmement complexe lorsque le nombre de cellules augmente. L'installation et la maintenance d'une batterie de grande taille peuvent être ardues. Cette topologie est peu fiable en raison du grand nombre de fils, car chaque fil présente un risque de défaillance. Cependant, l'électronique permet de diminuer le coût car il requiert un seul circuit et le refroidissement des composants de balancement des cellules se trouve à un seul endroit [20].

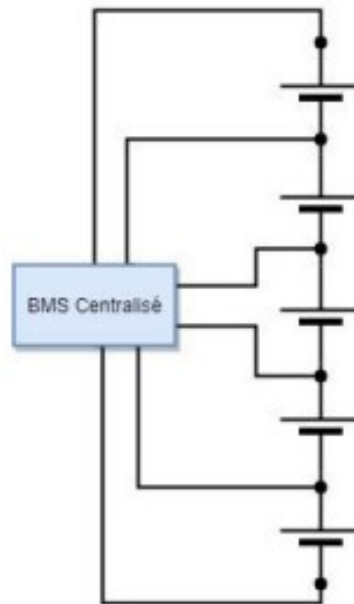


Figure II.2: Schéma synoptique de BMS centralisé [20]

### II.3.2 BMS modulaire :

Différents contrôleurs connectés à plusieurs cellules, avec une communication entre les contrôleurs [3]. La sélection d'une topologie modulaire est influencée par la conciliation entre les contraintes financières, la complexité de la mise en place et la maintenance en cours [16].

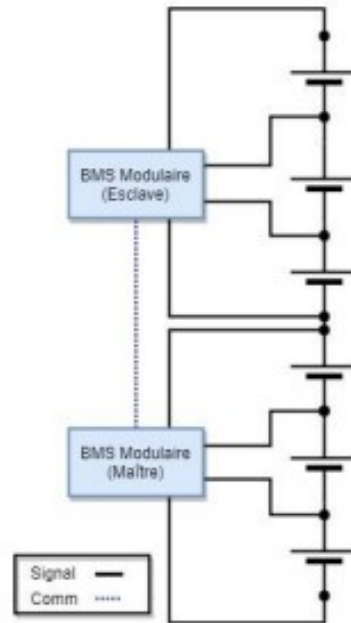


Figure II.3: Schéma synoptique de BMS modulaire [16]

### II.3.3 BMS distribué:

Chaque cellule est équipée d'un contrôleur, avec un câble de communication unique reliant la batterie au contrôleur [3]. En revanche, contrairement aux topologies centralisées, chaque cellule est directement connectée à un BMS. Ainsi, le nombre de fils est bien inférieur à celui du cas précédent (seulement pour connecter le BMS à son contrôleur) et en cas de modification du pack, il n'y a aucun souci pour ajouter des cellules avec leur BMS correspondant. En revanche, la nécessité de monter individuellement plusieurs éléments sur chaque cellule accroît le coût du système et rend sa maintenance compliquée car il est nécessaire d'avoir un accès direct aux cellules [16].

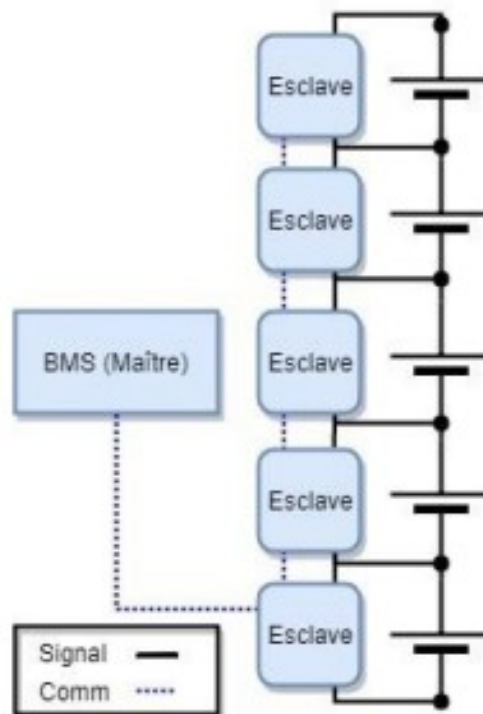


Figure II.4: Schéma synoptique de BMS distribuée [16]

### II.3.4 BMS maître-esclave :

La figure II.5 présente le BMS maître-esclave, qui est constitué de deux circuits électroniques distincts qui ont chacun des fonctions distinctes. L'interface entre la batterie et les autres sous-systèmes du véhicule, comme l'ordinateur de bord ou le chargeur, est assurée par le circuit principal. Sa puissance de microcontrôleur est supérieure à celle des esclaves, ce qui lui permet de réaliser les calculs d'estimation de la charge, de la santé, des stratégies de balancement et de sécurité [20].

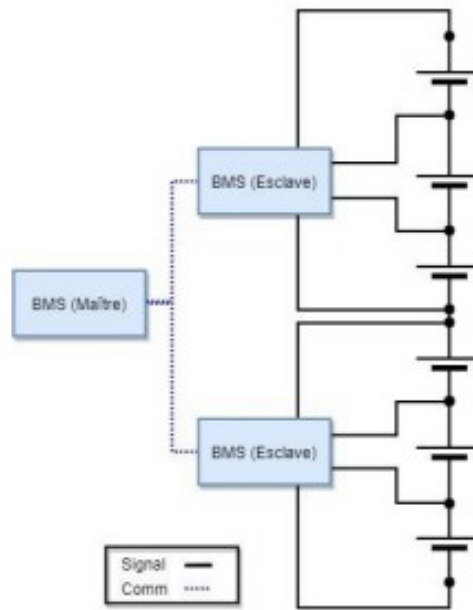


Figure II.5: Schéma synoptique de BMS maître-esclave [20]

## II.4 Fonctionnalités assurées par le BMS:

Le terme "système de gestion de batterie" englobe diverses fonctions, notamment :

- La collecte et la transmission de données à travers un bus de communication.
- Garder les cellules en sécurité
- Gérer la charge
- Équilibrer les cellules par la mesure de la condition physique
- La mesure de la charge
- La gestion optimale de l'énergie

- La gestion thermique du banc de batteries.

L'objectif principal de ces fonctions est de préserver les batteries de tous les dommages éventuels, de prolonger la durée de vie de ces composants et de garantir un bon fonctionnement de la batterie.

La figure II.6 illustre un BMS, avec les blocs essentiels décrits dans les paragraphes suivants [27].

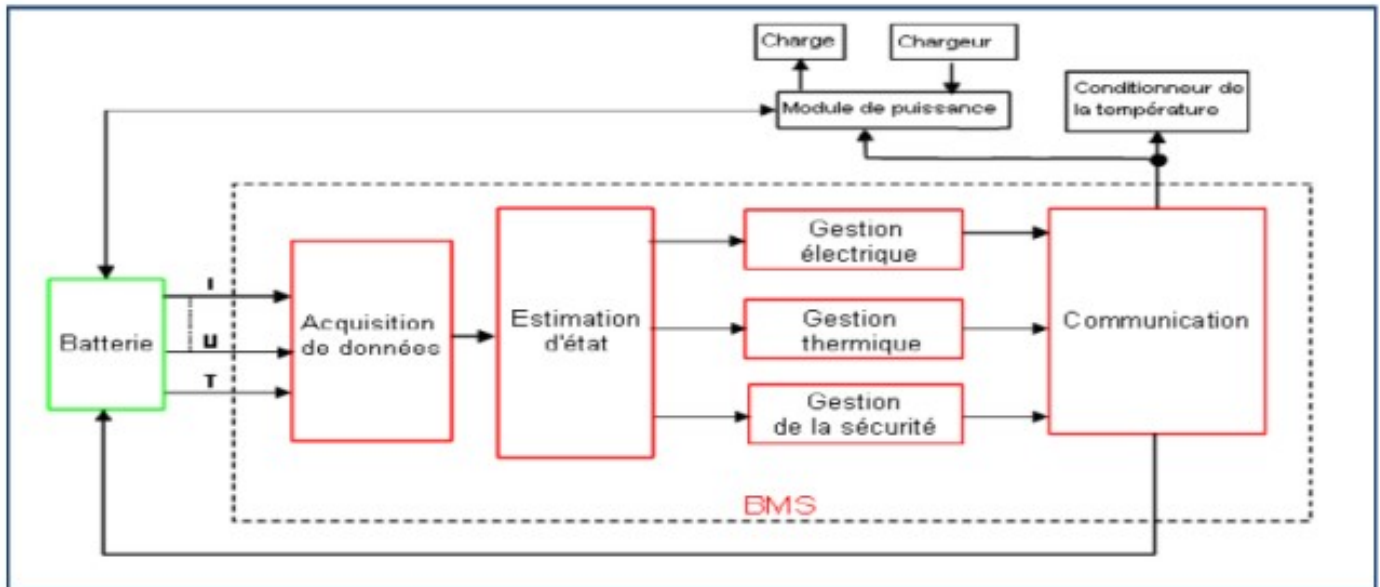


Figure II.6: Architecture fonctionnelle d'un système de gestion de batterie (BMS)

[27]

## II.5 Contrôle de la charge de batterie:

Le BMS a également pour mission de superviser la charge de la batterie. Il garantit que le chargeur régule le courant de manière à ce qu'il respecte les limites, qu'aucune cellule ne dépasse la tension maximale et qu'il n'y ait pas de surchauffe de la batterie. Il est possible de se limiter à cela. La charge est effectuée en se basant sur la tension des cellules, mais la tension mesurée aux bornes des cellules est erronée en raison de la baisse de tension due à la résistance interne. L'augmentation du courant entraînera une augmentation de l'erreur entre la tension du circuit ouvert et la tension aux bornes. Un contrôle de la charge en fonction de l'état de charge est bien plus performant et permet de déterminer l'énergie qui a été utilisée. Il est également possible de réduire progressivement le courant de charge pour terminer la charge en réduisant au minimum les pertes résistives et en appliquant toujours une tension inférieure à la tension maximale recommandée aux bornes de la batterie. Si un souci survient ou si la

charge est terminée, il signalera au chargeur de se mettre hors service et ouvrira le circuit de charge [20].

## II.6 Estimation de l'état de charge :

Il s'agit d'une fonction essentielle dans un BMS. L'objectif est de mesurer la quantité de charge disponible dans une cellule ou un pack à un moment précis. Le SOC (State of Charge), également connu sous le nom d'autonomie restante, correspond à cette quantité de charge disponible. Il est nécessaire pour de nombreuses applications de savoir quand la batterie est chargée (ou même des différentes cellules). Il est tout simplement nécessaire de connaître le SOC afin de fournir à l'utilisateur des informations sur l'état de charge et donc sur l'autonomie restante (exprimée en pourcentage, où 0% représente une batterie déchargée et 100% représente une batterie complètement chargée).

Il est également utilisé dans des circuits de contrôle afin d'améliorer l'utilisation, que ce soit pour la charge ou la décharge de la batterie. Il y a plusieurs façons d'évaluer l'état de charge d'une batterie. Les méthodes les plus courantes reposent sur la mesure de la tension et la compréhension de la variation de la tension en fonction de l'état de charge [16].

## II.7 Gestion intelligente de charge et de décharge de batteries:

### II.7.1 Description du système:

La figure II.7 illustre le schéma d'un système de stockage PV résidentiel. Les éléments essentiels du système électrique comprennent un générateur photovoltaïque, un système de gestion des batteries électrochimique (SGB), des convertisseurs de puissance DC/DC et DC/AC, des charges électriques et le réseau de distribution. Un traqueur du point de puissance maximale (MPPT) est connecté aux modules PV. Le SGB enregistre le niveau de courant et de tension  $CC$  ainsi que la température des batteries. Le calcul continu de l'état de charge (EDC) permet d'évaluer la charge résiduelle du stockage, ce qui permet au SGB d'éviter une détérioration inattendue des batteries causée par des schémas de charge incomplets, une surcharge, une sous-charge et des températures anormales [23].



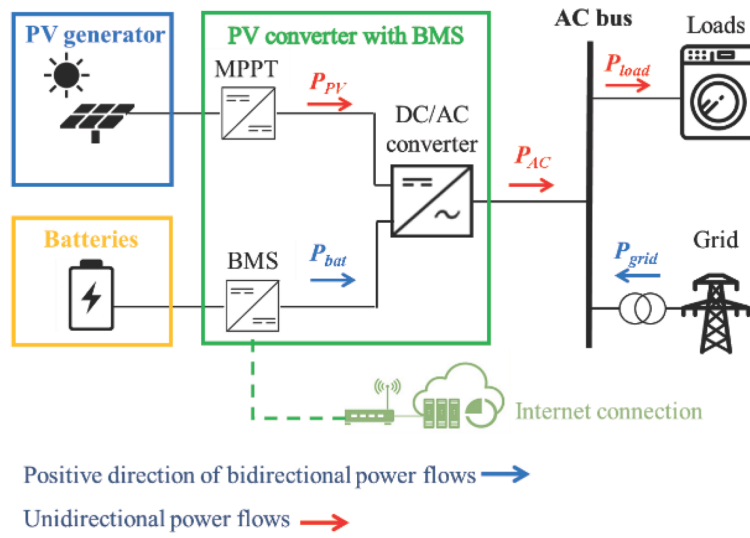


Figure II.7: Système PV-stockage étudié [23].

Le convertisseur DC/AC relie le système photovoltaïque et le SGB au réseau électrique (charges locales et au réseau). De plus, l'appareil est connecté à Internet et télécharge les prévisions météorologiques brutes d'une journée à l'avance, la comparaison de la charge provisoire et du profil de production, et l'adoption de la stratégie optimale pour diminuer les pics de tension [23]. Dans notre situation, nous avons fait appel à la base de données de l'éclairage solaire et de la température quotidienne sur le site de Tlemcen fournie par le site Soda pro pour le mois de mars 2004. Les panneaux photovoltaïques ont été orientés vers le sud et ont une inclinaison de 34 degrés par rapport à l'horizon. De plus, la charge électrique correspond à celle d'une unité administrative au sein d'une entreprise algérienne, dont la structure sera décrite dans le chapitre suivant.

## II.8 Modélisation des générateurs PV:

Le calcul de la production d'énergie photovoltaïque transformée en courant alternatif,  $P_{AC}$ , est effectué en utilisant le modèle ci-dessous. [17]:

$$P_{AC} = P_{PV,r} \frac{G}{G_{STC}} \eta_{mix} \eta_{therm} \eta_{DC/AC} \quad (\text{II.3})$$

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

En effet, le rendement  $\eta_{mix}$  s'écrit comme:

$$\eta_{mix} = \eta_{sal} \eta_{réfl} \eta_{mis} \eta_{MPPT} \eta_{cabl} \eta_{ombr} \quad (\text{II.4})$$

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

Par ailleurs, pour évaluer les pertes de température  $\eta_{therm}$ , la température des cellules photovoltaïques,  $T_c$ , est déterminée à chaque pas de temps en se basant sur la température de l'air

mesurée  $T_a$ , selon l'équation suivante [17]:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20C}{G_{NOCT}} G \quad (\text{II.5})$$

$NOCT$  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  $800W/m^2$ ; alors ue les pertes par surchauffe  $\eta_{therm}$  (par rapport à  $T_{STC} = 25C$ ) sont calculées par la formule :

$$\eta_{therm} = 1 - \gamma_{th}(T_c - T_{STC}) \quad (\text{II.6})$$

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

## II.9 Modélisation du stockage électrochimique:

Il existe différents modèles de stockage des batteries qui peuvent évaluer les flux d'énergie et simuler leur fonctionnement [23]. Bien sûr, chaque modèle a ses propres avantages et inconvénients. Dans notre situation spécifique, nous employons un modèle énergétique basique qui permet de simuler l'état de charge  $EDC$  avec une approximation adéquate, sans avoir recours à des mesures expérimentales et avec un effort de calcul minime (seules deux formules sont employées).

En effet, le modèle énergétique permet d'évaluer l'état de charge des batteries, c'est-à-dire la quantité d'énergie stockée ou pouvant être stockée dans une batterie avec une capacité énergétique nominale  $C_{bat}$ , en comparant avec les limites imposées pour assurer la durabilité des batteries. La détermination de  $EDC(t)$  à l'instant  $t$  dépend de l'état de charge  $EDC(t-1)$  au pas de temps précédent, de la puissance échangée  $P_{bat}$  pendant le pas de temps  $\Delta t$  (dans cette étude,  $\Delta t = 5 \text{ min}$ ) et du rendement de charge  $\eta_{bat}$ . Lorsque les batteries sont chargées, elles agissent comme un générateur ( $P_{bat} > 0$ ) avec un rendement de charge de  $\eta_{bat} = 0,88$  ; pendant la décharge ( $P_{bat} < 0$ ), le rendement de charge diminue. Le rendement est considéré comme unitaire.

$$EDC(t) = EDC(t - 1) + \frac{\eta_{bat} P_{bat} \Delta t}{C_{bat}}, \quad P_{bat} > 0 \quad (\text{II.7})$$

et

$$EDC(t) = EDC(t - 1) + \frac{P_{bat} \Delta t}{C_{bat}}, \quad P_{bat} < 0 \quad (\text{II.8})$$

## II.10 Bilan énergétique provisionnel et gestion du stockage:

Le présent travail consiste à proposer une stratégie de contrôle de la charge et de la décharge d'un banc de batteries intégrés à un système énergétique composé d'une charge domestique variable dans la journée mais qui a le même profil au fil des jours, connecté au réseau électrique. Un système de panneaux photovoltaïque est branché au système afin d'exploiter l'énergie photovoltaïque et ainsi diminuer la contribution du réseau à l'alimentation de la charge. Le travail est de nature numérique, se basant sur un code Matlab qui simule, sur un mois entier (Mars) la variation de l'état de charge des batteries, la puissance fournie ou absorbée par le réseau et la puissance photovoltaïque. Trois types de stratégies sont donc proposées selon des critères physiques et techniques, que nous allons définir ci-après.

Ainsi, la journée est subdivisée en trois parties. La période initiale débute à minuit (24 heures) et se termine à 6h00 (6 heures du matin). Entre 6h00 et 18h00 (6 p.m), la deuxième partie du temps est consacrée à la production d'énergie photovoltaïque, avec une partie de la production auto-consommée. La troisième partie de la journée débute à 18h00 et se termine à minuit. On a sélectionné l'heure de 18h00 pour mettre à jour la stratégie de gestion des batteries. Effectivement, à 18h00, le processus de production photovoltaïque est presque achevé, le SGB peut évaluer de manière précise la quantité d'énergie stockée, qui sera disponible dans les heures à venir. En réalité, lors des soirées et des nuits, les batteries ne seront pas alimentées, l'alimentation par le réseau n'est pas considérée. On effectue un bilan énergétique provisoire pour un jour à venir en comparant les consommations. La détermination de la consommation d'énergie repose sur le profil de la charge électrique de l'unité.

## II.11 Définition du temps total de décharge:

Dans la gestion intelligente des batteries, la première étape consiste à déterminer le temps de décharge total (TDT), la représentation visuelle (II.8) affiche l'organisation de la procédure. Dans un premier temps, à 18h00, en prenant en compte les prévisions de production d'énergie photovoltaïque, on effectue un bilan provisoire entre la production prévue (la journée suivante)  $E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}}$  et les charges  $E_{Charge, 1 \text{ jour à l'avance} 6 \text{ a.m.-} 6 \text{ p.m.}}$ , qui se produisent entre 6h00 et 6h00 du jour suivant. Si l'énergie photovoltaïque produite dépasse les 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.

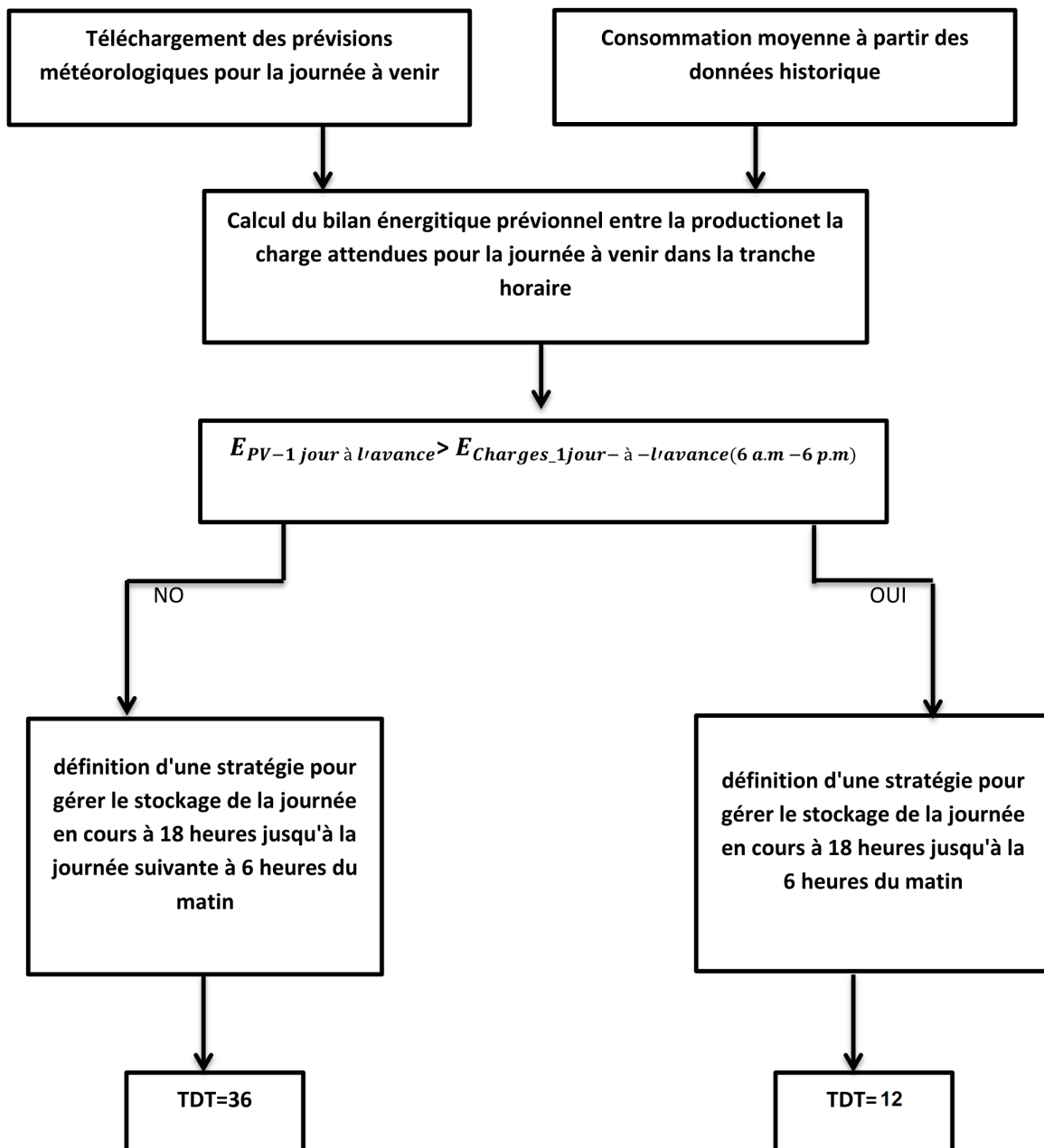


Figure II.8: Définition du temps de décharge totale [23].

Lorsque cela se produit, la TDT sera de 12 heures. Effectivement, le jour suivant, pendant les heures de jour (heures de lumière), l'énergie sera utilisée de manière autonome, et le surplus de production photovoltaïque sera utilisé pour recharger les batteries ou injecté dans le réseau. Par ailleurs, pour une production limitée et des charges élevées.  $E_{PV,1\text{ jour à l'avance}} < E_{Charge,1\text{ jour à l'avance},6\text{ a.m.-}6\text{ p.m.}}$ , il est essentiel de gérer les batteries non seulement pour une journée en avance, mais plutôt pour deux journées sur deux. Si tel est le cas, la production photovoltaïque ne peut pas répondre aux besoins électriques, et le stockage doit être capable de réduire la consommation électrique pendant deux nuits. Ainsi, la durée totale de décharge (TDT) sera de 36 heures.

Étant donné que les batteries sont extrêmement chères, il convient de souligner que le stockage avec une capacité excessive n'est pas rentable pour un réseau électrique. Dans ce travail, le SGB a la possibilité de répartir l'énergie stockée dans un temps de transfert maximal de 36 heures. Cela implique que la capacité du stockage doit être suffisante pour alimenter la charge lorsqu'il y a une seule journée nuageuse (2 nuits et 1 jour) [23].

## II.12 Sélection de la stratégie de gérer le stockage:

Une fois que le temps total de décharge (TDT) est défini, la procédure se poursuit avec la deuxième étape qui consiste à établir la stratégie de gestion du stockage. Le GSB calcule donc l'état de charge (EDC) des batteries à 18h00. La capacité de stockage nominale et le EDC permettent de déterminer la quantité d'énergie pouvant être fournie aux charges.  $E_{\text{Bat,décharge}}$  (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  $E_{\text{Charge, TDT}}$  correspond aux charges estimées pendant le temps de décharge totale. Ces quantités d'énergie brutes sont comparées afin de voir s'il y a un déficit énergétique

$$E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}} + E_{\text{Bat,décharge}} \geq E_{\text{Charge, TDT}} \quad (\text{II.9})$$

ou un surplus

$$E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}} + E_{\text{Bat,décharge}} \geq E_{\text{Charge, TDT}} \quad (\text{II.10})$$

En cas de compatibilité entre la production photovoltaïque et le stockage dans le TDT choisi, il n'est pas nécessaire de gérer les batteries de manière avancée (stratégie SGB 1). En revanche, lorsque les charges sont excessives, il est essentiel d'adopter une stratégie de raccourcissement des pics de consommation (stratégie SGB 2) ou d'adopter des profils de décharge appropriés (stratégie SGB 3). Afin de choisir la meilleure méthode entre ces deux stratégies, il est nécessaire de définir un paramètre d'autosuffisance temporaire  $R_{\text{suff}}$ , défini comme:

$$R_{\text{suff}} = \frac{E_{PV, 1 \text{ jour à l'avance}} + E_{\text{Bat,décharge}}}{E_{\text{Charge, TDT}}} \quad (\text{II.11})$$

Le lien entre la production de photovoltaïque temporaire, l'énergie disponible de la batterie et la charge locale temporaire lors du TDT est négligé. Le GSB choisit la stratégie suivante lorsque le rapport  $R_{\text{suff}}$  est inférieur à un seuil  $R_{\text{lim}}$  qui est imposé par l'utilisateur.

La charge sera alimentée principalement par le réseau commun, avec une quantité limitée

d'énergie fournie par les panneaux solaires et le système de stockage. Cela peut entraîner des niveaux élevés d'absorption. Ce qui signifie que la faible quantité d'énergie stockée dans les batteries ne sera pas utilisée dans cette situation. C'est le cas lorsque la charge dépasse une limite maximale  $P_{\text{charge,max}}$ , fixée par l'utilisateur. En revanche, on applique la stratégie 3 lorsque le rapport  $R_{\text{suff}}$  dépasse le seuil fixé par l'utilisateur. Dans cette situation, le PV et le stockage fourniront une part significative de la charge, tandis que la part du réseau sera restreinte. Finalement, l'organigramme présenté sur la figure II.9 permet de définir la stratégie de gestion de la charge et de la décharge des batteries .

### II.13 Mise en place de stratégies de gestion du stockage :

Les stratégies de gestion du stockage consistent en un écrêtage des pointes et un profil de décharge dépendant du temps. Selon la procédure décrite dans la précédente sous-section, lorsque l'énergie de stockage est bien inférieure aux charges, seule la technique d'écrêtement des pointes est adoptée (stratégie BMS n°2). Ainsi, les batteries sont déchargées uniquement lorsque cela est strictement nécessaire, c'est-à-dire lorsqu'un pic de charge survient. Le stockage sera notamment déchargé uniquement lorsque le quota dépasse une limite définie par l'utilisateur  $P_{\text{load,max}}$ [23].

En revanche, si l'énergie stockée dans les batteries est légèrement inférieure à la charge, la capacité des batteries est utilisée à la fois pour l'écrêtement des pointes et une décharge dépendant du temps (stratégie BMS 3). En effet, le BMS fixe différents niveaux de  $SOC_{\text{min},x}$  pour un nombre défini par l'utilisateur de créneaux horaires  $x$ , dans lesquels le TDT est divisé. Selon la procédure proposée, en cas de  $TDT = 12$  h, le nombre de créneaux est  $x = 2$ , sinon avec  $TDT = 36$  h, les créneaux horaires sont 5 ( $x = 5$ )[23]. Les limites  $SOC_{\text{min},x}$  sont définies afin de répartir l'énergie stockée proportionnellement à la consommation d'énergie prévisionnelle. Ainsi, les limites  $SOC_{\text{min},x}$  sont calculées à partir du SOC du stockage, mesuré en temps réel par le BMS, et le bilan prévisionnel consommations d'énergie

$$SOC_{\text{min,slot } x} = SOC \cdot \left( 1 - \frac{E_{\text{load,slot } x}}{E_{\text{load.TDT}}} \right) \quad (\text{II.12})$$

où  $E_{\text{load, slot } x}$  est l'énergie prévisionnelle qui sera requise par les charges dans le créneau horaire  $x$ . Par exemple, supposons que le TDT soit de 12 h et que la durée globale requise la charge sera de 10 kWh. En particulier, le soir (de 18h00 à minuit), la charge nécessaire sera de 4 kWh, et la nuit suivante (de minuit à 6h00), la charge sera de 6 kWh. L'énergie stockée sera déchargée au fur et à mesure suit : 40% le soir et 60% la nuit. Dans cet exemple, le le



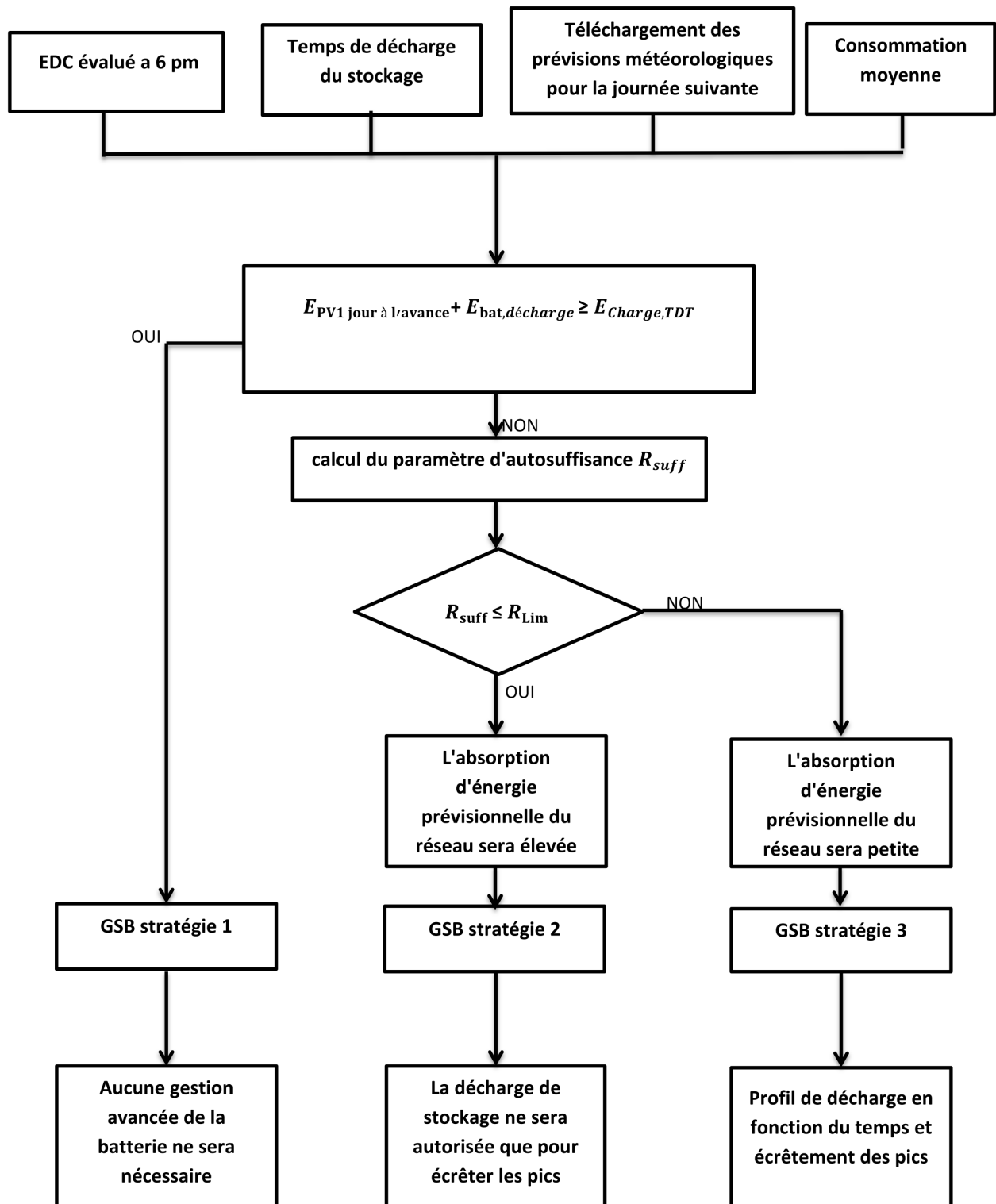


Figure II.9: Organigramme pour la définition de la stratégie de gestion de charge et de décharge des batteries [23]

stockage est considéré initialement plein et avec un minimum  $SOC_{\min, \text{sécurité}} = 0,2$ . La seule limitation en charge/décharge est effectuée pour éviter une dégradation rapide des batteries, en limitant le SOC dans un souci de sécurité plage  $SOC_{\min, \text{sécurité}} < SOC < SOC_{\max, \text{sécurité}}$ .

## II.14 Conclusion

Les technologies de stockage à base de lithium nécessitent des mesures de sécurité rigoureuses pour garantir leur utilisation sécurisée, surtout dans des environnements domestiques où la protection du public et des secours est primordiale. Le système de gestion de batterie (BMS) joue un rôle crucial en assurant la sécurité contre la surcharge, la surdécharge et en optimisant les performances des batteries. Avec différentes topologies comme le BMS centralisé, modulaire, distribué et maître-esclave, chaque système peut être adapté en fonction de la taille et des exigences spécifiques des batteries. En intégrant des fonctions avancées telles que la gestion thermique, l'équilibrage des cellules et la supervision en temps réel, le BMS assure non seulement la longévité des batteries mais également leur efficacité opérationnelle. Ainsi, pour maximiser les avantages et minimiser les risques associés aux technologies de stockage lithium, un BMS bien conçu et adapté est indispensable.

# Chapitre 03: Généralités sur les réseaux de neurones

### III.1 Introduction

En 1948, McCulloch et Pitts, deux chercheurs américains, ont développé le premier modèle mathématique d'un neurone biologique, qu'ils ont nommé le neurone formel. L'idée fondamentale d'un réseau de neurones consiste à donner une unité simple, les neurones, capables de réaliser certains calculs de base. En les connectant, ces unités peuvent résoudre des problèmes plus complexes.

Les réseaux de neurones varient en termes de structures, de tailles et de mécanismes d'apprentissage, en fonction du type et de la complexité de l'application visée. La nature et la difficulté de l'application sont des facteurs clés dans la conception de ces réseaux.

Ce chapitre débutera par une présentation générale des réseaux de neurones. Nous examinerons ensuite plus en détail les réseaux de neurones artificiels, et plus particulièrement la technologie MPPT qui s'appuie sur cette approche.

### III.2 Base biologique :

Un neurone représente une cellule très complexe qui se spécialise dans la réception de signaux électriques. Selon **la figure III.1**, son rôle consiste à recevoir, conserver et transmettre des informations. Le corps cellulaire, les dendrites et l'axone constituent les trois parties principales du neurone[24].

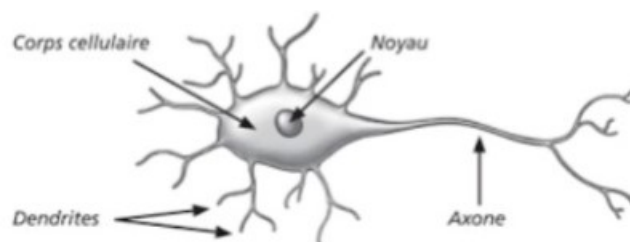


Figure III.1: Neurone biologique.  
[24]

### III.3 Modélisation mathématique du neurone biologique:

#### III.3.1 Le neurone artificiel :

**La figure III.2** montre le modèle mathématique du neurone artificiel. Un neurone est principalement un intégrateur qui réalise une évaluation pondérée de ses données. Ensuite, la fonction de transfert  $f$  modifie le résultat  $n$  de cette somme, ce qui entraîne la sortie du neurone

D. Le vecteur  $R$  du neurone est l'entrée  $R$ .  $P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_R]$ , tandis que  $W = [W_{1,1} \ \dots \ W_{1,R} \ \dots \ W_{S,1} \ \dots \ W_{S,R}]$  Un vecteur de poids du neurone est représenté. L'équation suivante donne la sortie  $n$  de l'intégrateur [19][22].

$$n = \sum_{i=1}^R w_{i,j} p_j - b \tag{III.13}$$

$$n = W_{1,1}.p_1 + W_{1,2}.p_2 + \dots + W_{1,R}.p_R - b$$

$$D = f(n) = f\left(\sum_{i=1}^R w_{i,j} p_j - b\right) \tag{III.14}$$

Que l'on peut également rédiger sous forme de matrice :

$$n = W^T . P - b$$

$$D = f(n) = f(W^T . P - b)$$

$$\begin{pmatrix} W_{1,1} & W_{1,R} \\ W_{s,1} & W_{s,R} \end{pmatrix}$$

$$p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_R]$$

$P$  : dimension matricielle est  $R \times 1$ ,  $W$  : dimension  $S \times R$

Le biais  $b$  du neurone est une somme pondérée des poids et des entrées, ce qui représente cette sortie. Le niveau d'activation du neurone est défini par le résultat  $n$  de la somme pondérée. Le biais  $B$  est également connu sous le nom de seuil d'activation neuronal. Quand le seuil d'activation est atteint ou dépassé, l'argument de  $f$  est positif (ou nul). Sinon, il est négatif [19][22]

- $S$  : le nombre de neurones d'une même couche
- $i$  : le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche.
- $j$  : le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée

### III.4 Principes d'un neurone artificiel :

- aucun concept de temps.
- coefficient synaptique : coefficient réel.

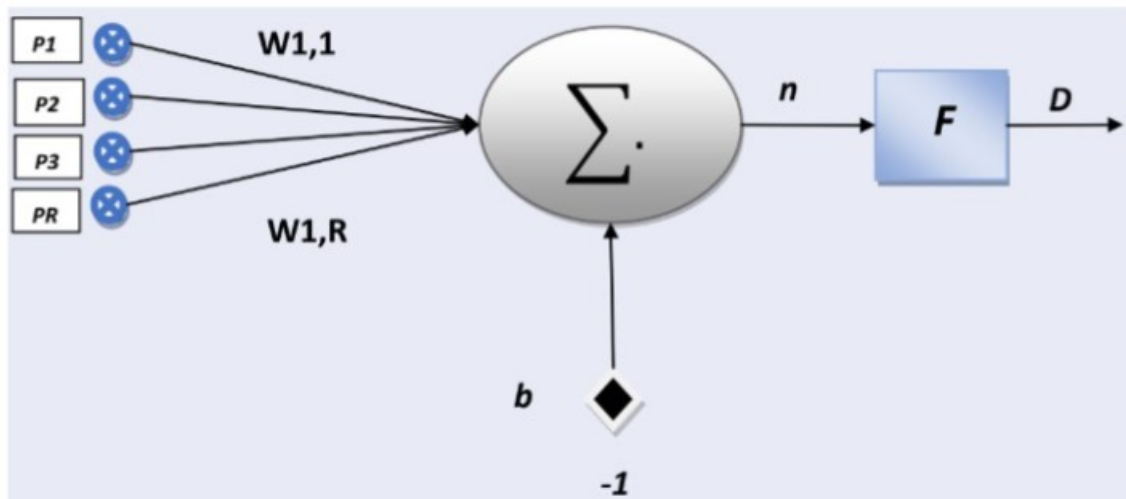


Figure III.2: Modèle d'un neurone artificiel [19]

- somme des signaux arrivant au neurone.
- sortie obtenue après l'application d'une fonction de transfert fonctionnelle.

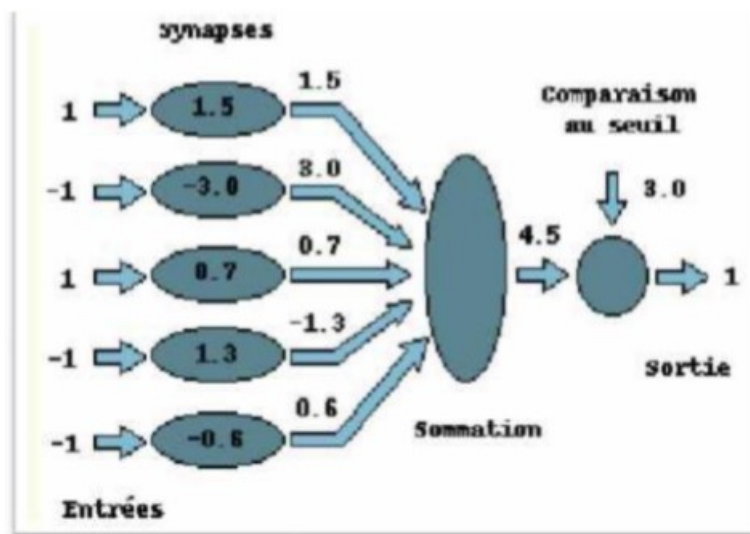


Figure III.3: principes d'un neurone artificiel. [21]

On peut clairement observer une analogie III.1 avec les neurones biologiques :

### III.5 Fonctions d'activations :

L'état du neurone est déterminé par la fonction d'activation en fonction de son entrée totale. Elle met en évidence le lien entre tous les potentiels d'activation et de décision du neurone [24].

Neurones biologique	Neurones artificiels
Synapses	connections pondérées
Axons	Sorties
Dendrites	Entrées
Sommateur	Fonction d'activation

Table III.1: L'analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Forme
<b>seuil</b>	$a = \begin{cases} 0 & \text{si } n < 0 \\ 1 & \text{si } n \geq 0 \end{cases}$	
seuil symétrique	$a = \begin{cases} -1 & \text{si } n < 0 \\ 1 & \text{si } n \geq 0 \end{cases}$	
<b>linéaire</b>	$a = n$	
linéaire saturée	$a = \begin{cases} 0 & \text{si } n < 0 \\ n & \text{si } 0 \leq n \leq 1 \\ 1 & \text{si } n > 1 \end{cases}$	
linéaire saturée symétrique	$a = \begin{cases} -1 & \text{si } n < -1 \\ n & \text{si } -1 \leq n \leq 1 \\ 1 & \text{si } n > 1 \end{cases}$	
linéaire positive	$a = \begin{cases} 0 & \text{si } n < 0 \\ n & \text{si } n \geq 0 \end{cases}$	
<b>sigmoïde</b>	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	
tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
compétitive	$a = \begin{cases} 1 & \text{si } n \text{ maximum} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$	

Figure III.4: Fonctions d'activations les plus utilisées. [24]

### III.6 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones:

#### III.6.1 Avantages des réseaux de neurones :

- Aptitude à représenter toute fonction, qu'elle soit linéaire ou non, simple ou complexe.
- Une faculté d'apprentissage basée sur des exemples représentatifs, en utilisant la rétro-diffusion des erreurs. L'acquisition de connaissances (ou la création du modèle) est automatique.
- Différence entre le bruit ou la fiabilité des données.
- Facilité d'utilisation, moins de travail personnel à effectuer que dans l'analyse statistique

traditionnelle. Ne nécessite aucune compétence en mathématiques, informatique statistique.

- Un comportement moins défavorable lorsqu'il y a peu de données.
- L'idée d'apprentissage est plus facile à appréhender pour l'utilisateur débutant que les Complexités des statistiques multi variables.

### III.6.2 Inconvénients des réseaux de neurones :

- Le manque d'une méthode systématique pour déterminer la meilleure configuration du réseau et le nombre de neurones à intégrer dans la (ou les) couche(s) dissimulée(s).
- La sélection des initiales des poids du réseau et la modification du pas d'apprentissage, qui ont un impact significatif sur la vitesse de convergence.
- La question du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation).
- Les valeurs des poids synaptiques sont responsables de la codification de la connaissance acquise par un réseau de neurones, ce qui les rend des boîtes noires où les connaissances sont stockées. Ils ne peuvent être compris par l'utilisateur[24].

### III.7 Utilisation de la méthode des réseaux de neurones artificiels dans la gestion de charge et de décharge des batteries:

Nous avons utilisé la méthode des réseaux de neurones artificiels pour permettre au système de gestion de gérer la charge et la décharge des batteries selon des tests faits par ce dernier chaque 5 minutes. Selon le tableau III.2, le système de gestion fait 5 tests sur l'état de charge des batteries, mais aussi sur le niveau de la puissance de la charge par rapport à un seuil fixé par l'utilisateur. Suivant les valeurs obtenues, le système de gestion donne l'ordre aux batteries de se charger (Mode=1), de se décharger (mode=-1) ou encore à rester à leur état actuel (Mode=0). Le réseau de neurones artificiels est entraîné pour qu'il donne les résultats exactes des modes. Cela est achevé par la duplication du tableau d'entrée plusieurs fois. On a choiser Levenberg-Marquardt comme un algorithme et Nous avons choisi 80% d'entraînement et 10% de test et 10% pour la validation Nous l'avons utilisé une couche avec 10 neurones.



Table III.2: Tableau des actions en fonction des conditions

Action	$P_{ch} \geq P_{load\_max}$	$SOC = SOC_{min}$	$SOC > SOC_{min}$	$SOC = SOC_{max}$	$SOC < SOC_{max}$	Mode
Rien	1	1	0	0	1	0
Décharge	1	0	1	0	1	-1
Décharge	1	0	1	1	0	-1
Charge	0	1	0	0	1	1
Charge	0	0	1	0	1	1
Rien	0	0	1	1	0	0

### III.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail le système de gestion des batteries (BMS), qui joue un rôle crucial dans la technologie des batteries Li-Ion. Nous avons présenté les principales fonctionnalités du BMS ainsi que différentes catégories et concepts généraux associés. Nous avons également analysé diverses approches pour gérer la charge et la décharge des batteries dans un système photovoltaïque connecté au réseau.

Premièrement, nous avons étudié les modèles mathématiques utilisés pour simuler les processus dans les systèmes de production d'énergie solaire et les systèmes de stockage d'énergie électrochimique. Ensuite, nous avons discuté de la méthode pour évaluer le temps total de décharge, un indicateur crucial pour déterminer quand une stratégie de contrôle du stockage doit être activée. Cette stratégie est basée sur le rapport entre l'énergie disponible (provenant du photovoltaïque et des batteries) et l'énergie nécessaire pour répondre à la charge pendant la période de décharge complète.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats de nos simulations.

Chapitre 04:  
RÉSULTATS ET DISCUSSION

## IV.1 Introduction:

Une fois que nous avons examiné les fondements théoriques de la méthode de gestion de charge et décharge des batteries pour un système connecté au réseau électrique et qui utilise une ressource énergétique renouvelable, à savoir l'énergie photovoltaïque, nous présentons dans ce document les spécificités de cette technique.

Dans ce chapitre, nous examinerons les résultats de la simulation de la gestion des batteries pour alimenter une charge électrique d'une unité administrative d'une entreprise algérienne (habitat tertiaire) située dans la région de Tlemcen, dont les coordonnées géographiques sont présentées dans le tableau IV.1

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

Table IV.1: Données géographiques du site de Tlemcen

## IV.2 Paramètres de simulation:

Notre travail commence par fournir les valeurs numériques des différents paramètres de simulation. La période de gestion de la charge/décharge des batteries s'étend du 1 mars à 18h (6 p.m) au 31 mars à 6h (6 a.m).

Les niveaux de luminosité solaire (en  $W/m^2$ ) et les températures ambiantes [4] (en C) du site ont été observés pendant ces jours-ci à intervalles de 5min de l'année 2004. Par ailleurs, le tableau (IV.2) présente les caractéristiques techniques du générateur photovoltaïque ainsi que les batteries.

De plus, on étudie la gestion de la charge/décharge des batteries pour une puissance nominale du générateur photovoltaïque  $P_{PVn}$  de 18 kW, une capacité nominale des batteries  $C_{bat}$  de 30 kWh, et une puissance maximale de la charge fournie par le réseau en cas d'une stratégie. Le paramètre d'autosuffisance en alimentation,  $R_{suff}$ , a une valeur limite pour éviter les pics de consommation,  $P_{chargemax} = 7$  kW, et  $R_{lim} = 0,3$ .

Nous avons utilisé la méthode des réseaux de neurones artificiels pour gérer la charge et la décharge des batteries, en fonction des mesures effectuées toutes les 5 minutes. Le système de gestion effectue des tests sur l'état de charge des batteries ainsi que sur la puissance de charge, comparée à un seuil défini par l'utilisateur (Pcharge max = 7 kW). Selon les résultats obtenus (voir tableau 1), le système de gestion décide d'activer le mode de charge (Mode=1), le

mode de décharge ( $\text{Mode}=-1$ ) ou de maintenir l'état actuel ( $\text{Mode}=0$ ) des batteries. Le réseau de neurones artificiels est entraîné pour prédire avec précision les modes nécessaires en dupliquant les données d'entrée à plusieurs reprises.

Paramètre	Désignation	Valeur
$\gamma_{th}$	Facteur de température de la puissance photovoltaïque (°C)	0.005
$\eta_{cabl}$	Pertes de joule	0.99
$\eta_{disch}$	Rendement de décharge des batteries	1.0
$\eta_{ch}$	Rendement de charge des batteries	0.88
$\eta_{DC/AC}$	Rendement du convertisseur	0.97
$\eta_{sal}$	Pertes dues à la saleté	0.98
$\eta_{mis}$	Pertes dues au mismatch	0.97
$\eta_{MPPT}$	Rendement du traqueur de la puissance maximale du PV	0.99
$\eta_{réf}$	Pertes dues à la réflexion	0.97
$\eta_{ombr}$	Pertes dues à l'ombrage	1.0
NOCT	Température de fonctionnement nominale de cellule (°C)	45
GNOCT	Éclairement solaire pour des conditions de NOCT ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	800
TSTC	Température à des conditions standards de test (°C)	25

Table IV.2: Paramètres techniques du générateur photovoltaïque et des batteries.

[23]

### IV.3 Temps de décharge totale:

Sur le site de Tlemcen, le tableau (IV.3) présente les valeurs quotidiennes du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004. Effectivement, la valeur  $TDT = 36$  pour le 1er mars signifie que l'on doit sélectionner une stratégie de gestion qui durera 36 heures, à partir de 18h (6 p.m) du même jour jusqu'à 6h (6 a.m) du 4 mars respectivement. De plus,  $TDT = 12$  le 3 mars nécessite une décision concernant une stratégie de gestion qui se déroulera sur une période de 12 heures, à partir de 18h (6 p.m) du même jour jusqu'à 6h (6 a.m) du 3 mars.

jour	TDT (h)
1	36
2	36
3	36
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	12
31	12

Table IV.3: Valeurs journalières du temps de décharge totale pour le mois de mars 2004 sur le site de Tlemcen

Le tableau IV.4 donne la répartition des stratégies sélectionnées pour les périodes de TDT trouvées ci-dessous. Cette répartition sur le mois de mars se base sur les valeurs de TDT, mais aussi sur la valeur de  $R_{\text{suff}}$  pour chaque période de TDT. Ainsi, comme exemple, la stratégie 2 (écrêtement des pics de consommation) est appliquée entre la période de 36 heures qui s'étale entre 18h du premier mars ( $216 \times 5$  minutes) et 6 h (matin) du 3mars ( $648 \times 5$  minutes). La stratégie de chargement de batteries, quant à elle, est appliquée le jour lorsque celui-ci ne fait pas partie d'une période où une des trois stratégies est appliquée. Cette période est consacrée exclusivement à la charge des batteries, puisque la puissance photovoltaïque est plus ou moins présente. Les autres stratégies 1 et 3 sont aussi appliquées par certaines périodes du mois.

Description	Intervalle
Stratégie 2	216 - 648
Chargement de Batteries	649 - 791
Stratégie 1	792 - 936
Chargement de Batteries	937 - 1079
Stratégie 1	1080 - 1224
Chargement de Batteries	1225 - 1367
Stratégie 2	1368 - 1800
Chargement de Batteries	1801 - 1943
Stratégie 1	1944 - 2088
Chargement de Batteries	2089 - 2231
Stratégie 2	2232 - 2664
Chargement de Batteries	2665 - 2807
Stratégie 1	2808 - 2952
Chargement de Batteries	2953 - 3095
Stratégie 1	3096 - 3240
Chargement de Batteries	3241 - 3383
Stratégie 2	3384 - 3816
Chargement de Batteries	3817 - 3959
Stratégie 2	3960 - 4392
Chargement de Batteries	4393 - 4535
Stratégie 2	4536 - 4968
Chargement de Batteries	4969 - 5111
Stratégie 2	5112 - 5544
Chargement de Batteries	5545 - 5687
Stratégie 1	5688 - 5832
Chargement de Batteries	5833 - 5975
Stratégie 1	5976 - 6120
Chargement de Batteries	6121 - 6263
Stratégie 3	6264 - 6696
Chargement de Batteries	6697 - 6839
Stratégie 2	6840 - 7272
Chargement de Batteries	7273 - 7415
Stratégie 1	7416 - 7560
Chargement de Batteries	7561 - 7703
Stratégie 3	7704 - 8136
Chargement de Batteries	8137 - 8279
Stratégie 1	8280 - 8424
Chargement de Batteries	8425 - 8567
Stratégie 1	8568 - 8712
Chargement de Batteries	8713 - 8855

Table IV.4: Tableau des stratégies et batteries avec les intervalles correspondants. Le temps est pris en unité de 5 minutes à partir de 1 mars à 00 h jusqu'à 31 mars

Figure IV.1 illustre les variations des puissances de la batterie, du réseau de charge et des panneaux photovoltaïques, ainsi que la variation de l'état de charge pendant le mois de mars 2004 à Tlemcen, en unités de 5 minutes. Les valeurs positives de la puissance du réseau indiquent que celui-ci fournit de l'énergie au système, tandis que les valeurs négatives indiquent que le système reçoit de l'énergie du réseau. D'autre part, une valeur négative de la puissance des batteries indique qu'elles se déchargent, tandis qu'une valeur positive indique qu'elles se chargent. On constate également que l'état de charge des batteries est compris entre 1 et 0.3, des valeurs fixées par l'utilisateur.

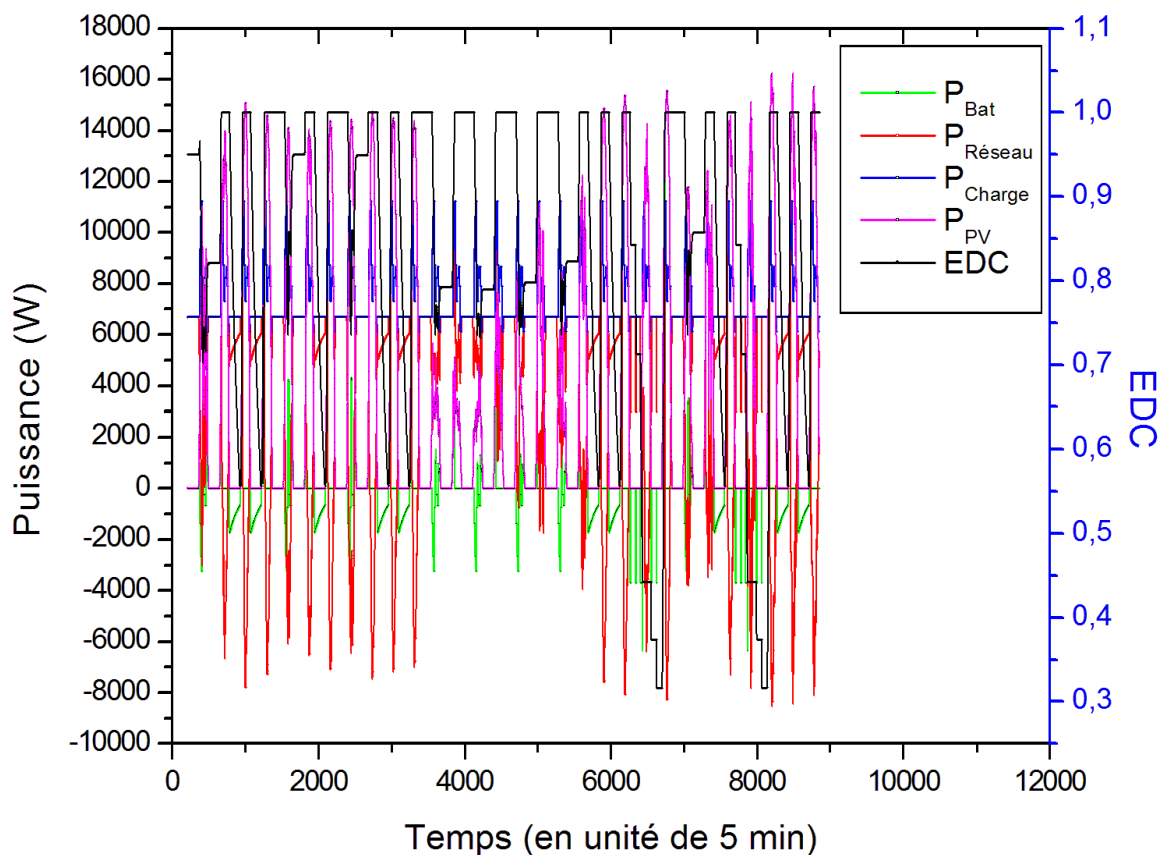


Figure IV.1: Variations des puissances ainsi que la variation de l'état de charge pendant un mois les stratégies de charge/décharge pendant le mois de mars 2004 à Tlemcen



La figure IV.2 illustre les variations des puissances de batteries, de réseau, de charge et de PV, ainsi que la variation de l'état de charge des batteries dans le cadre de la stratégie 1, qui, en réalité, ne propose aucune gestion intelligente des batteries, puisqu'il s'agit d'une période où les batteries sont chargées, le jour précédent, très abondant en énergie photovoltaïque, et le coefficient  $R_{\text{suff}}$  est supérieur à 1. L'objectif de cette stratégie est de minimiser le recours au réseau par la décharge des batteries en absence d'énergie photovoltaïque, puisqu'il s'agit d'une période de la nuit qui s'étale sur 12 h entre 3 mars (à 18h) et 4 mars (à 6h). On y voit bien l'absence de l'énergie photovoltaïque. La charge, quant à elle est constante, et les batteries se déchargent à partir de  $\text{EDC}=1$  jusqu'à une valeur de  $\text{EDC}=0.4$ ; ce qui minimise le recours au réseau puisque sa valeur de puissance fournie est inférieure à la charge. Au fur et à mesure que les batteries se déchargent (une puissance de batterie négative), la part du réseau augmente.

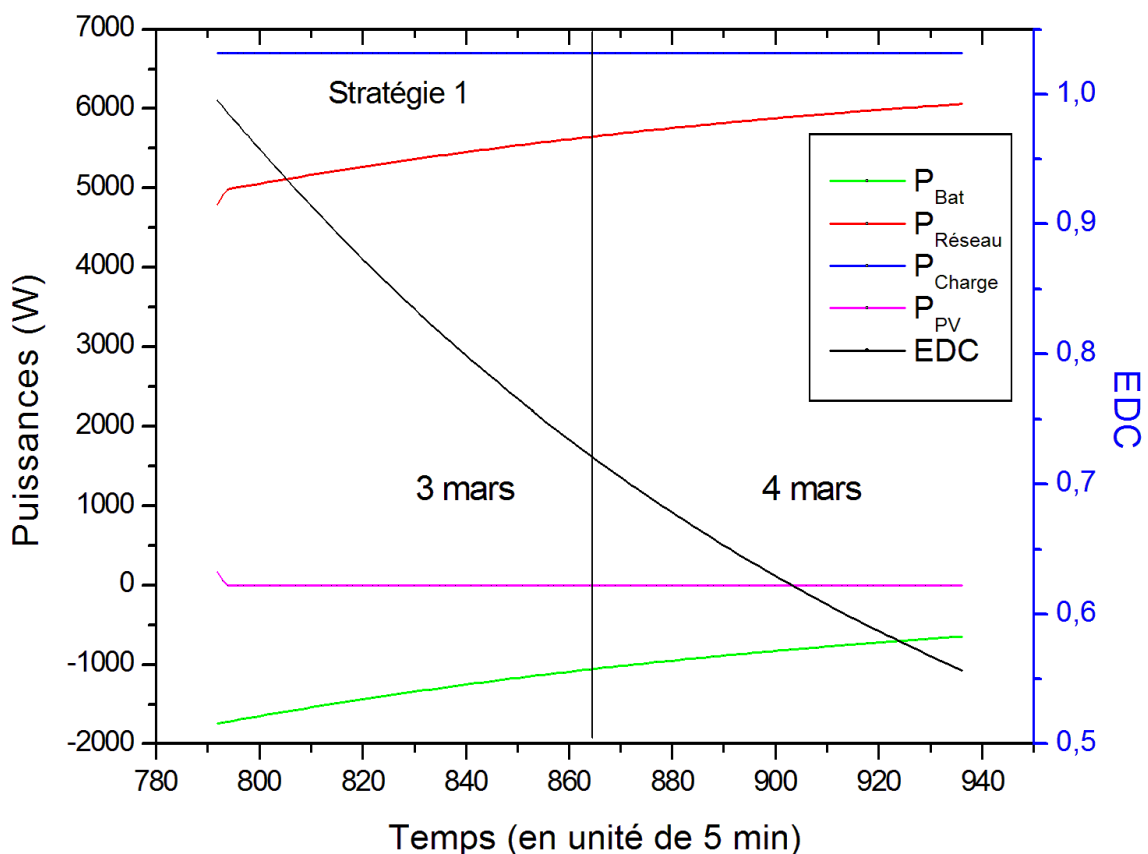


Figure IV.2: Puissances (en Watts) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unités de 5 minutes) pendant la période du 3 mars à 18 heures au 4 mars à 6 heures.

## IV.4 Stratégie 2 pour la gestion de la charge/décharge des batteries

La figure IV.3 représente la stratégie 2 appliquée sur une période de 36 heures entre 18 du 5 mars et 6h du 7 mars. Ce choix est basé sur le calcul de  $R_{\text{suff}}$  et qui est dans ce cas inférieur à la valeur limite que nous avons fixée. Il est important de se rappeler que la stratégie 2 implique l'utilisation de la charge des batteries afin de supprimer uniquement les pics de consommation supérieurs à  $P_{\text{charge, max}} = 8 \text{ kW}$ . A cet effet, la figure (IV.3) montre la fluctuation des puissances (en W) du 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). De plus, le niveau initial de charge des batteries (à 18 h du 5 mars) est estimé à 1.0 (les batteries sont complètement pleines). Il est observé que la nuit du 5 au 6 mars, les batteries restent chargées car la puissance de la charge est inférieure à la puissance maximale de la charge fournie par le réseau électrifié.  $P_{\text{charge, max}} = 8 \text{ kW}$ . L'ensemble de la charge est alors alimenté par le réseau. L'état de charge EDC demeure donc inchangé. En revanche, le 6 mars, les batteries commencent à se décharger à cause de la présence de pics de charge dont la puissance est supérieure à la puissance fixée par l'utilisateur. Cette situation se présente pendant une journée abondante en énergie photovoltaïque, ce qui a permis par moment de vendre de l'énergie au réseau, d'où la valeur négative de la puissance du réseau, mais aussi de recharger les batteries, ce qui est indiqué par la montée de l'état de charge vers une valeur qui s'approche de 0.96. grâce à la puissance solaire présente au matin. Les batteries ont été enregistrées avec une puissance de charge positive et la valeur de EDC est passée de 0,9 à 0,92. On constate aussi que par moment, trois sources alimentent la charge électrique : le générateur photovoltaïque, le réseau et les batteries. Après la fin des pics de consommation, vers 12 heures (6 mars), les batteries commencent à se recharger, puis se déchargent lorsque leur dernier pic se manifeste vers 13h. Par ailleurs, la puissance solaire photovoltaïque diminue en après-midi. On ne pourrait donc pas commercialiser de l'énergie au réseau. La puissance solaire photovoltaïque est utilisée pour recharger les batteries, tout en alimentant le réseau électrique. Pendant la nuit du 6 au 7 mars, l'état de charge EDC augmente de près de 0.96 et restera constant. Effectivement, pendant cette période, nous utiliserons le réseau pour alimenter la charge entièrement en raison de l'absence évidente de l'énergie solaire, ainsi que parce que la puissance maximale de la charge fournie par le réseau,  $P_{\text{charge, max}} = 8 \text{ kW}$ , est supérieure à la charge électrique ( $7.15 \text{ kW}$ ) (pas de pics de consommation). Ainsi, la stratégie 2 de gestion de la charge/décharge des batteries se termine.

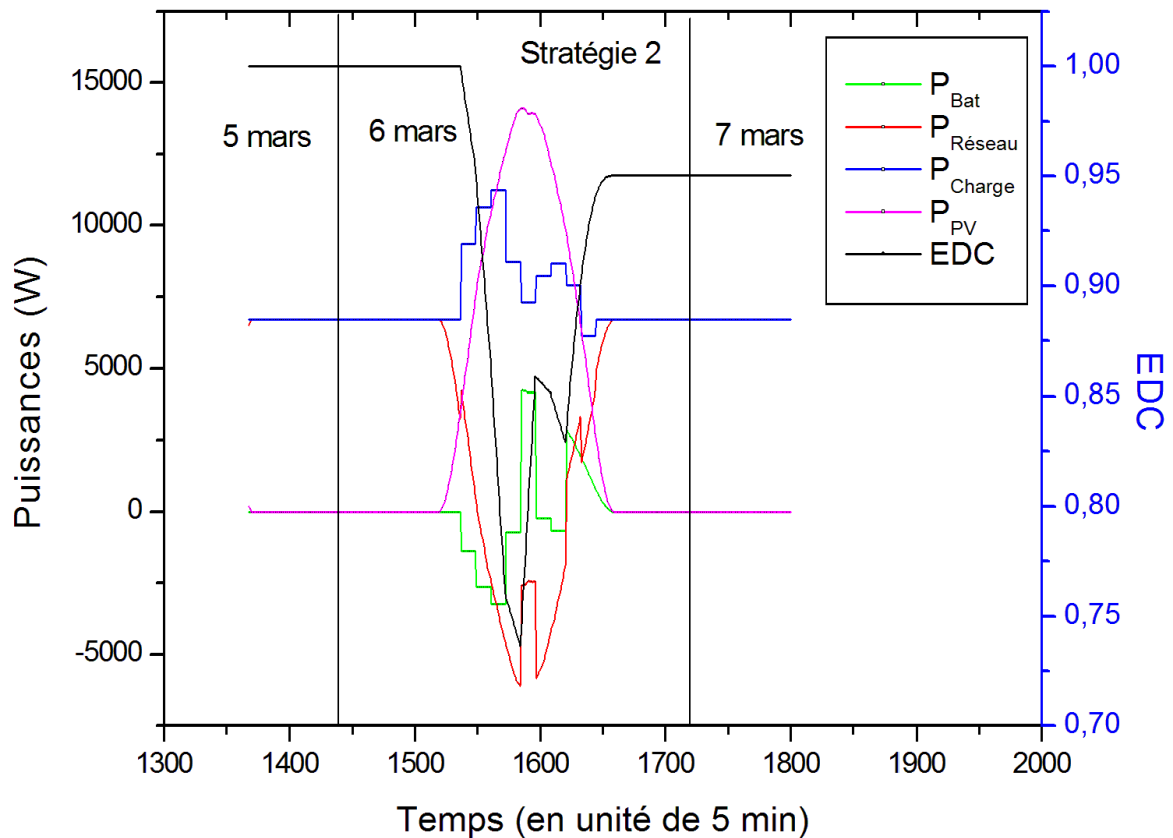


Figure IV.3: Puissances (en Watts) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unités de 5 minutes) pendant la période de 36 heures, du 5 mars au 7 mars.

#### IV.5 Stratégie 3 pour la gestion de la charge/décharge des batteries:

Figure IV.4 représente la stratégie 3 appliquée sur une période de 36 heures entre 22 mars (à 18h) et 24 mars (à 6h). Rappelons que la stratégie 3 consiste à écrêter les pics de consommation, mais aussi à proposer une décharge de batteries dépendant du temps. Cela se voit clairement sur la variation en escalier (paliers) de l'état de charge des batteries. Cette période de décharge est divisée en 5 sous-périodes (6h, 6h 12h, 6h et enfin 6 h). Pour chaque sous-période on calcule le besoin en puissance de la charge et des limites de décharges (en terme d'état de charge) sont fixées selon ces besoins. La limite de la puissance de la charge au-dessus duquel les batteries se déchargent est revue à la baisse pour permettre d'appliquer cette stratégie. La puissance photovoltaïque est abondante pendant la journée, ce qui a permis de venir aux besoins de la charge et minimiser le recours au réseau, et même en vendre, grâce aussi à la décharge des batteries. Cette procédure a montré son efficacité, une fois comparée à la procédure qui

consiste à décharger les batteries sans paliers.

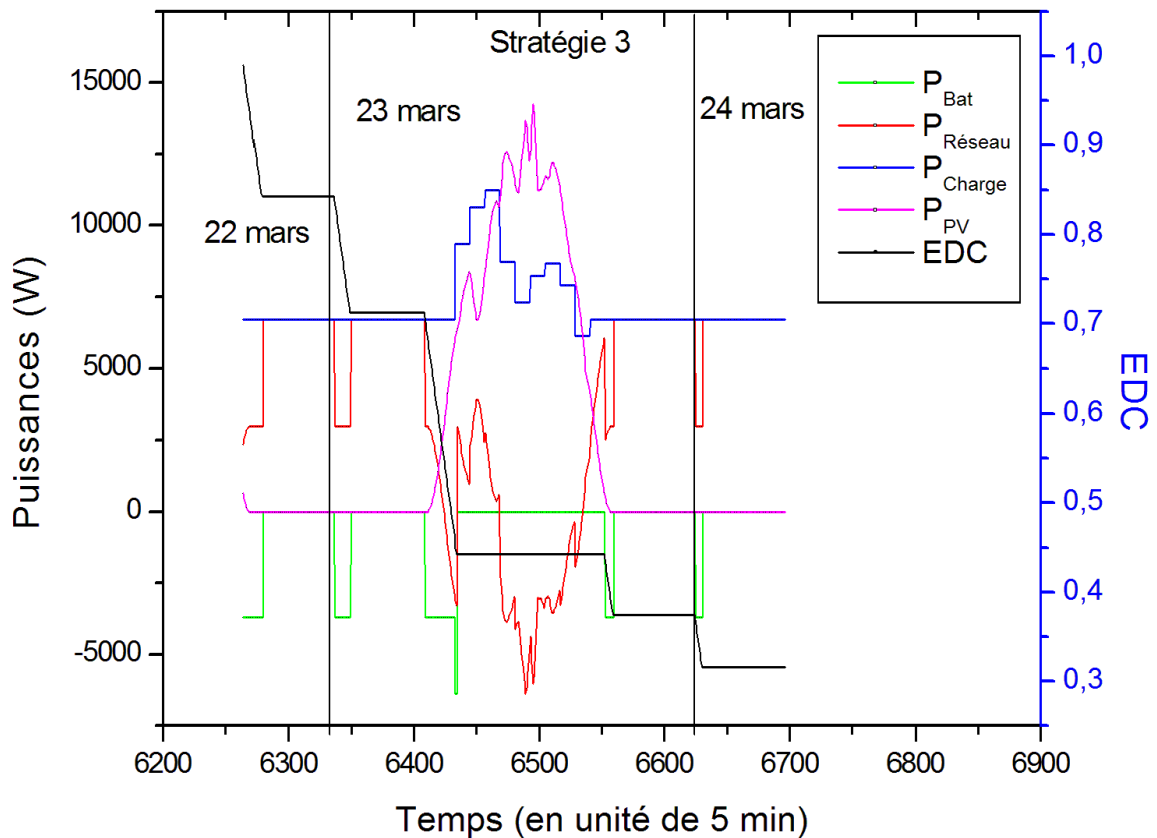


Figure IV.4: Puissances (en W) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge électrique, ainsi que l'état de charge des batteries en fonction du temps (en unités de 5 minutes) entre 6 h le 22 mars et 6 h le 24 mars. Dans cette situation, l'état de charge (EDC) fluctue avec une pente légèrement abrupte.

#### IV.6 Stratégie de chargement batteries dans la journée:

Cette stratégie concerne les jours qui ne font pas partie des périodes pour lesquelles les trois précédentes stratégies sont appliquées. Cette stratégie consiste à charger les batteries pendant la journée, et profiter ainsi, de la présence de l'énergie photovoltaïque. Figure IV.5 représente la variation des puissances, ainsi que l'état de charge des batteries. On y voit clairement que l'état de charge est constamment montante et reste constante quand elle atteint la valeur maximum (1). Pendant cette journée de 24 mars, l'énergie photovoltaïque est abondante, ce qui a permis de subvenir aux besoins de la charge, de vendre de l'énergie au réseau et de charger les batteries.

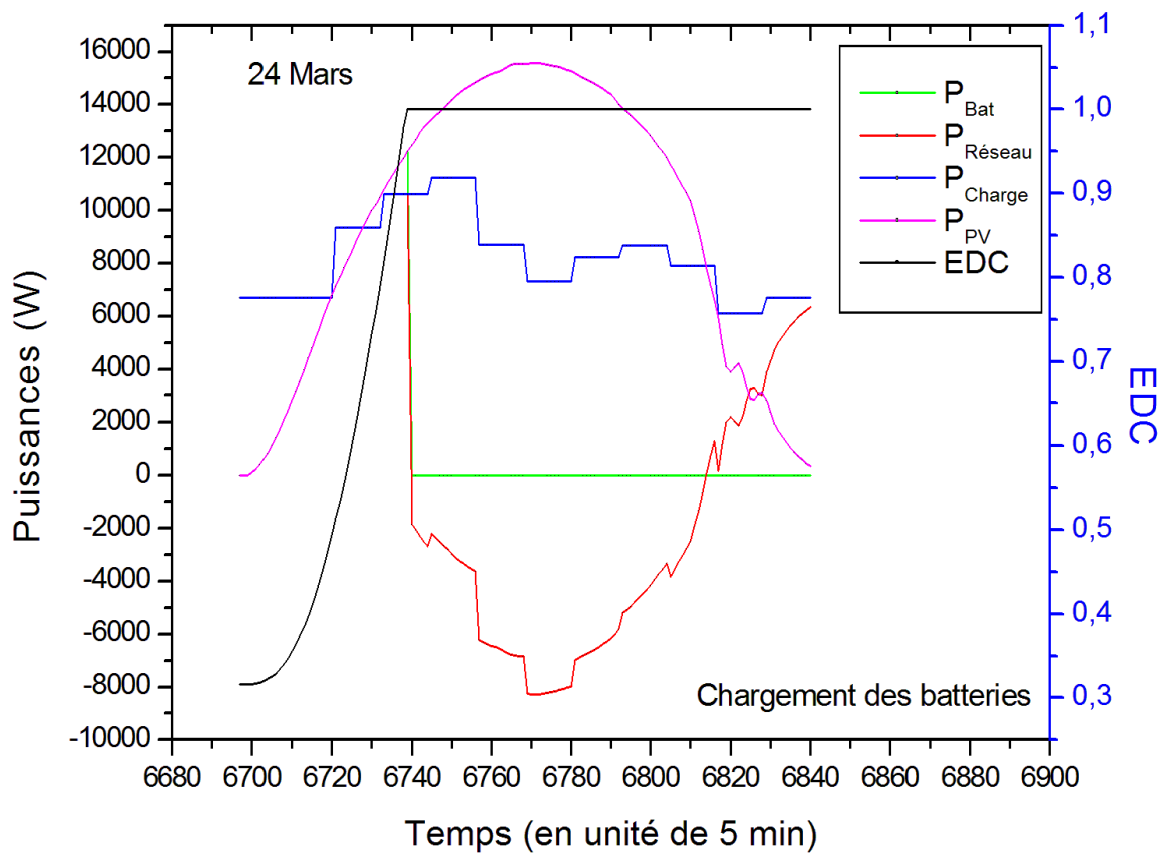


Figure IV.5: Évolution de la puissance électrique (en W) du générateur photovoltaïque, du réseau, des batteries et de la charge, ainsi que l'état de charge des batteries sur une période de 6h à 18h le 24 mars, avec chargement de la batterie.

## Conclusion

Pour le mois de mars 2004, nous avons présenté les résultats de la simulation d'une méthode de gestion intelligente de la charge et de la décharge des batteries dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Effectivement, nous avons choisi de mettre en place deux méthodes de gestion en fonction des valeurs respectives de deux paramètres, temps de décharge totale TDT et le paramètre d'auto-suffisance en alimentation.  $R_{suff}$ . Il dépend, d'une part, de l'énergie nécessaire pour alimenter la charge et, d'autre part, de l'énergie disponible (énergie solaire, réseau et batteries). Effectivement, la deuxième stratégie vise à éliminer les pics de consommation, tandis que la troisième stratégie, en plus de supprimer les pics de consommation, offre des profils de décharge qui varient en fonction du temps. On présente les résultats de la simulation sous la forme de fluctuations temporelles des puissances des différentes sources d'énergie disponibles, ainsi que de l'état de charge des batteries EDC. De cette manière, la gestion intelligente de la charge et de la décharge des batteries a réduit au minimum l'utilisation du réseau et même a permis de vendre une partie de l'énergie photovoltaïque générée à celui-ci.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, nous avons examiné l'utilisation d'une méthode de gestion de charge et de décharge de batteries pour un système photovoltaïque connecté au réseau (Battery Management System, en anglais). Le but de la méthode est d'alimenter une unité administrative. L'objectif de cette méthode est de charger les batteries à l'aide d'un générateur photovoltaïque lorsque l'énergie solaire est disponible, puis de les décharger afin de réduire les pics de consommation; ce qui facilite l'utilisation efficace de l'énergie solaire et réduit ainsi la part du réseau dans l'alimentation de la charge électrique. Tout cela est réalisé en respectant les limites de charge maximale et de décharge profonde des batteries, ainsi que les règles de décharge.

La méthode principale consiste à obtenir progressivement les informations météorologiques du site afin de calculer l'énergie électrique que le générateur photovoltaïque pourrait générer. Dans notre situation, nous présumons une charge électrique constante et nous utilisons des données météorologiques provenant d'un site spécialisé libre. L'étude dure pendant tout le mois de mars 2004 sur un site de Tlemcen. Le calcul des paramètres physiques liés à l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et à l'énergie requise par la charge électrique est prévu dans la technique de gestion. Le temps total de décharge est donc calculé pour prévoir la durée de la période de charge et de décharge des batteries. La stratégie de gestion à adopter est influencée par la valeur numérique du coefficient d'autosuffisance en alimentation, une fois que le consommateur a établi une valeur limite.

Il est démontré qu'il est envisageable, en utilisant des stratégies basées sur des paramètres pertinents de calcul d'énergie, d'améliorer considérablement l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque dans un système connecté au réseau, tout en préservant les batteries contre la dérive prématurée. La méthode mise en œuvre inclut même la vente du surplus d'électricité au réseau.

Ce mémoire offre la possibilité d'approfondir les recherches sur cette technique afin de l'améliorer, que ce soit sur le plan numérique, en recherchant des paramètres plus pertinents pour prendre des décisions sur le type de stratégie à adopter, ou encore en l'appliquant à une charge significative variable immédiatement, avec une réception en temps réel des informations météorologiques sur une période plus longue.



## Bibliographie

- [1] Grk batteries. "<https://shop.grkbatteries.gr/SONNEN-GF-12-076-V>".
- [2] FSEC Energy Research Center University of central Florida , technical report. Batteries and charge control in stand-alone photovoltaic systems. fundamental and application. 1997.
- [3] Khedidja BAHJIJ, Zohra FOUJIL, Mostefa Sayhi, et al. Contribution à la réalisation d'un système de suivi et de gestion des batteries d'accumulateurs. Mémoire de Master en Physique, Université AHMED DRAIA-ADRAR, 2021.
- [4] Mohamed BENTRAR and Hibet Errahmen CHAOUICHE. Dimensionnement optimal d'un système énergétique hybride" solaire-éolien-batteries" utilisant la technique" lps". Mémoire de Master en électrotechnique, ESSAT, 2021.
- [5] AHMED AMINE BOUDIBA. Système de gestion de batteries-estimation de l'état de charge. Mémoire de Master en génie électrique et électronique , Université de Tebessa, 2021.
- [6] Hela Boussetta. Modélisation multi-physiques et simulation globale de systèmes autonomes sur puce. Mémoire non publié, Université de Tebessa, Grenoble INPG, 2010.
- [7] Aïssa BOUTTE. Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques. Thèse de doctorat en génie électrique, Université Des Sciences Et De La Technologie Mohamed-Boudiaf de Oran, 2015.
- [8] Nattaporn CHABA, Sutasinee NERAMITTAGAPONG, Arthit NERAMITTAGAPONG, Nawapak EUA-ANANT, and Somnuk THEERAKULPISUT. Effect of depth of discharge on the performance of zn-mn and zn-ni battery. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 100(8):144–151, 2021.
- [9] Lila Croci. Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2013.
- [10] Akram Eddahech. Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride. Mémoire non publié, Université de Bordeaux 1, 2013.

## Bibliographie

---

- [11] Ingvild B Espedal, Asanthi Jinasena, Odne S Burheim, and Jacob J Lamb. Current trends for state-of-charge (soc) estimation in lithium-ion battery electric vehicles. *Energies*, 14(11):3284, 2021.
- [12] Christopher Hendricks, Bhanu Sood, and Michael Pecht. Lithium-ion battery strain gauge monitoring and depth of discharge estimation. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 20(1):011008, 2023.
- [13] Anne Labouret and Michel Villoz. *Energie solaire photovoltaïque*, volume 3. Dunod Paris, 2006.
- [14] Kailong Liu, Zhongbao Wei, Chenghui Zhang, Yunlong Shang, Remus Teodorescu, and Qing-Long Han. Towards long lifetime battery: Ai-based manufacturing and management. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(7):1139–1165, 2022.
- [15] P Manimekalai, R Harikumar, and S Raghavan. An overview of batteries for photovoltaic (pv) systems. *International Journal of Computer Applications*, 82(12), 2013.
- [16] Fabien Mestrallet. Architectures intégrées pour la gestion et la fiabilisation du stockage électrochimique à grande échelle, thèse de doctorat, université de grenoble. 2013.
- [17] Matthew Muller, Bill Marion, and Jose Rodriguez. Evaluating the iec 61215 ed. 3 nmot procedure against the existing noct procedure with pv modules in a side-by-side configuration. In *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE, 2012.
- [18] Martin Murnane and Adel Ghazel. A closer look at state of charge (soc) and state of health (soh) estimation techniques for batteries. *Analog devices*, 2:426–436, 2017.
- [19] Marc Parizeau. Réseaux de neurones. Mémoire de master, Université laval, 2004.
- [20] Michel Pessier. Algorithme d’estimation d’état de charge pour système de gestion de batterie avancée. Mémoire de Master, Université de Sherbrooke, Canada, 2019.
- [21] Gérald PETITJEAN. Dossier: l’intelligence artificielle et l’aide à la décision dans les entreprises. Bulletin de l’AFIA ,2006.
- [22] Fabrice Sorin, Lionel Broussard, and Pierre Roblin. Régulation d’un processus industriel par réseaux de neurones. *Techniques de l’ingénieur. Informatique industrielle*, 2(S7582):S7582–1, 2001.

## Bibliographie

---

- [23] Filippo Spertino, Alessandro Ciocia, Paolo Di Leo, Gabriele Malgaroli, Angela Russo, et al. *A smart battery management system for photovoltaic plants in households based on raw production forecast*. intechopen, 2018.
- [24] R Tahar. Application de l'intelligence artificielle au problème de la stabilité transitoire des réseaux électriques. *Application of Artificial Intelligence to the Problem of Transitional Stability of Electrical Networks*, University of Constantine, Algeria, 2005.
- [25] Matthieu Urbain. Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs li-ion. estimation en ligne de la soc et de la soh. Mémoire de Master, Institut National Polytechnique de Lorraine ,2009.
- [26] Dinh Vinh. Diagnostic de batteries lithium ion dans des applications embarquées. thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2010.
- [27] Yinjiao Xing, Eden WM Ma, Kwok L Tsui, and Michael Pecht. Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 4(11):1840–1857, 2011.
- [28] Peng Zhang, Jun Liang, and Feng Zhang. An overview of different approaches for battery lifetime prediction. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 199, page 012134. IOP Publishing, 2017.