

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 d'Ingénieur

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

Présenté par : **GOUTI Faiza**  
**METIDJI Zaki**

Thème

Dimensionnement d'un système énergétique  
hybride photovoltaïque /éolien avec batteries  
en utilisant la technique LPSP combinée à  
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.

# PFE

Faiza Gouti

January 2024

## ملخص

يُتيح نفاذ الوقود الأحفوري المحدود والتلوث الناتج عنه فرصاً لمصادر الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح، التي تُوفر بيئة نظيفة ومستدامة بتكلفة منخفضة. لكن تعاني هذه المصادر من تقطعات في التوريد، مما يستدعي الحاجة لنظم تخزين لتخزين الزيادات في الإنتاج لإعادة توريد الطاقة عند الطلب الزائد. يهدف مشروع التخرج إلى تحسين ونمذجة نظام طاقة هجين يجمع بين بطاريات للتخزين وألواح شمسية وتربينات رياح لتوفير الكهرباء في المناطق غير المزودة بشبكات كهربائية، بواقعية اقتصادية وتقنية مدروسة تتضمن احتساب الأجهزة المثلى وتحليلاً شاملاً للجدوى الاقتصادية والتقنية

## Résumé

Les sources d'énergie renouvelable (EnR) alternatives et prometteuses telles que les ressources énergétiques solaires et éoliennes sont devenues exploitables à grande échelle en raison des réserves limitées d'énergies fossiles et de la pollution causée par les gaz à effet de serre. Ces ressources sont offertes sans frais et sont respectueuses de l'environnement. Toutefois, les EnR sont de nature intermittente. Ainsi, il est essentiel de réguler les fluctuations de puissance en stockant l'énergie pendant les périodes de surproduction afin de la renvoyer à la charge ou au réseau lorsque la demande d'énergie augmente. Le projet de notre étude (PFE) a pour objectif de contribuer à la modélisation et au dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien avec système de stockage par batteries pour alimenter un site isolé. Une approche pour optimiser la taille d'un générateur photovoltaïque, d'un générateur éolien ou d'un banc de batteries consiste à utiliser la technique LPSP combinée à la technique des réseaux de neurones artificiels. Ensuite, une étude économique a été réalisée en prenant en compte le prix le plus bas du système. Grâce à cette étude, il est possible de déterminer le nombre idéal de batteries, de modules photovoltaïques et d'éoliennes nécessaire pour répondre aux besoins de la charge.

**Mots clés:** Energie renouvelable, système hybride, énergie photovoltaïque, énergie éolienne, état de charge, LPSP, ANN

## Abstract

Alternative and potentially viable renewable energy sources (RE), like solar and wind energy resources, are made possible by the depletion of fossil fuel reserves and the pollution created by the gases produced. These resources are offered without charge and with consideration for the environment. But still the nature of REs is sporadic. Consequently, in order to restore energy to the grid when demand for it rises, energy must be stored during times of excess production in order to stabilize power fluctuations. In this context, the goal of this end-of-study project work (PFE) is to support the modeling and optimization of a hybrid system to supply energy to an isolated location. An approach to size the hybrid system consists in using the LPSP technique combined to artificial neural networks. Then, an economic study is carried out to get the configuration of batteries, photovoltaic panels and wind turbine corresponding to the lower cost.

**Keywords:** Renewable energy, hybrid system, photovoltaic energy, wind energy, state of charge, LPSP, ANN

# 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 que j'ai connus à l'école de l'ESSAT : Souda Abd Elkrim, Guerouaz Abd Elkrim, Guenim Amine, Chanafi Taha, Diab Djaber, Neggar Anes et tous les étudiants que je connais en génie électrique, automatique ou 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.

# Table de Matières

<b>Resume</b>	<b>I</b>
<b>Dédicace</b>	<b>III</b>
<b>Dédicace</b>	<b>IV</b>
<b>Remerciment</b>	<b>VI</b>
<b>Liste de Figures</b>	<b>X</b>
<b>Liste de Tableaux</b>	<b>XII</b>
<b>Abréviations</b>	<b>XIII</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>Généralités sur les systèmes hybrides</b>	<b>5</b>
I.1 Introduction: . . . . .	5
I.2 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H): . . . . .	5
I.3 Classification des systèmes hybrides: . . . . .	5
I.3.1 Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle: . . . . .	6
I.3.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle : . . . . .	9
I.3.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage: . . . . .	9
I.3.2.2 Système hybride éolien/stockage: . . . . .	9
I.3.2.3 Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage: . . . . .	9
I.3.2.4 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage: . . . . .	10
I.4 Configuration des systèmes des énergies hybrides: . . . . .	10
I.4.1 Architecture à bus CC: . . . . .	10
I.4.2 Architecture mixte à bus CC/ CA : . . . . .	10
I.4.3 Architecture à bus CA: . . . . .	12
I.5 Avantages et inconvénients des systèmes hybrides : . . . . .	12
I.6 Principaux composants des systèmes hybrides : . . . . .	13
I.6.1 Cellule photovoltaïque : . . . . .	13
I.6.1.1 Principe de fonctionnement : . . . . .	14
I.6.1.2 Différents types de cellules photovoltaïques : . . . . .	15
I.6.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque: . . . . .	16

I.6.2.1	Modèle à une diode: . . . . .	16
I.6.2.2	Modèle à deux diodes: . . . . .	17
I.7	Définition de l'énergie éolienne: . . . . .	19
I.7.1	Modes d'installation et différents types d'éoliennes: . . . . .	19
I.7.1.1	Eoliennes à axe vertical: . . . . .	20
I.7.1.2	Eoliennes à axe horizontal: . . . . .	20
I.7.2	Notions théoriques sur l'aérogénérateur: . . . . .	21
I.7.2.1	Coefficient de puissance $C_p$ : . . . . .	21
I.7.2.2	Couple produit par l'éolienne: . . . . .	21
I.7.2.3	Vitesse spécifique de l'éolienne: . . . . .	22
I.7.2.4	Limite de Betz: . . . . .	22
I.8	Description du stockage d'énergie: . . . . .	22
I.8.1	Principe de fonctionnement de batteries : . . . . .	23
I.8.2	Différentes technologies de batteries: . . . . .	23
I.9	Conclusion: . . . . .	23
<b>Généralités sur les réseaux de neurones</b>		<b>25</b>
II.1	Introduction: . . . . .	25
II.2	Base biologique : . . . . .	25
II.3	Modélisation mathématique du neurone biologique: . . . . .	25
II.3.1	Neurone artificiel : . . . . .	25
II.4	Principes d'un neurone artificiel : . . . . .	26
II.5	Fonctions d'activation : . . . . .	27
II.6	Avantages des réseaux de neurones: . . . . .	27
II.7	Inconvénients des réseaux de neurones : . . . . .	28
II.8	Erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error, MSE): . . . . .	29
II.9	Coefficient de corrélation . . . . .	30
II.10	Conclusion: . . . . .	30
<b>Modèle d'optimisation du système hybride</b>		<b>32</b>
III.1	Introduction: . . . . .	32
III.2	Modélisation du générateur photovoltaïque: . . . . .	32
III.3	- Courbe de puissance d'un générateur éolien: . . . . .	33
III.4	Modélisation du système de stockage par les batteries: . . . . .	35

III.4.1	Premier scénario: . . . . .	35
III.4.2	Deuxième scénario : . . . . .	35
III.4.3	Limites de l'état de chargement des batteries: . . . . .	36
III.4.4	Détermination de la capacité nominale du système de stockage : . . . . .	36
III.5	Méthode de dimensionnement du système hybride: . . . . .	37
III.6	Description de la méthode LPSP: . . . . .	37
III.7	Algorithme de dimensionnement par LPSP: . . . . .	38
III.8	Modèle économique: . . . . .	39
III.9	Tableau d'entraînement des réseaux de neurones: . . . . .	42
III.10	Conclusion: . . . . .	43
<b>Résultats et discussion</b>		<b>44</b>
IV.1	Introduction: . . . . .	45
IV.2	Résultats de l'application de l'algorithme des réseaux de neurones: . . . . .	45
IV.3	Données météorologiques des deux sites et profil de la charge à alimenter: . . . . .	47
IV.4	Paramètres physiques, techniques et économiques du système hybride: . . . . .	49
IV.5	Comparaison entre les sites Tlemcen et Adrar . . . . .	56
IV.6	Conclusion: . . . . .	57
<b>Conclusion Générale</b>		<b>59</b>
<b>Références</b>		<b>61</b>

# Liste de Figures

I.1	Classification des systèmes hybrides [1]	5
I.2	Structure générale d'un système hybride	6
I.3	Système hybride avec connexion série [2]	7
I.4	Système hybride à commutation	7
I.5	Système hybride à connexion parallèle [3]	8
I.6	Configuration des SEH à bus CC [4]	11
I.7	Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [4]	11
I.8	Configuration de bus CA [4]	12
I.9	Schéma synoptique du système hybride étudié [5]	13
I.10	Structure de base d'une cellule solaire [6]	14
I.11	: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire[7]	15
I.12	cellule polycristalline et monocristalline	16
I.13	Module silicium amorphe	16
I.14	Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode	17
I.15	Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.	18
I.16	Principaux composants d'une éolienne [8]	20
II.1	Neurone biologique	25
II.2	Modèle d'un neurone artificiel	27
II.3	Principes d'un neurone artificiel[9]	28
II.4	Fonctions d'activation les plus utilisées[9]	29
III.1	Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.	34
III.2	Organigramme global de l'algorithme de dimensionnement [10]	41
IV.1	Résultats de l'application de l'algorithme des réseaux de neurones à notre système	45
IV.2	Courbe de test pour le tableau de puissances	46
IV.3	Courbe de test pour le tableau des capacités	46
IV.4	Architecture ANN utilisée dans notre étude	47
IV.5	Profils de l'éclairement solaire sur les deux sites sélectionnés: Tlemcen (Plateau Lalla Setti) (à gauche) et Adrar (à droite) pour une année (1 février 2004-31 janvier 2005)	48
IV.6	Profil de la température ambiante sur les deux sites sélectionnés: Tlemcen (Plateau Lalla Setti) (à gauche) et d'Adrar (à droite) pour une année (1 février 2004-31 janvier 2005)	48

IV.7 Profil de la vitesse du vent sur les deux sites sélectionnés: Tlemcen (Plateau Lalla Setti) (à gauche) et d'Adrar (à droite) pour une année (1 février 2004-31 janvier 2005) . . . . .	49
IV.8 Profil de la charge . . . . .	50
IV.10Variation de la puissance photovoltaïque nominale pour une puissance eolienne donnée pour une fiabilité totale du système ( $LP\ SP = 0.0$ ) pour les deux sites sélectionnés (5 jours d'autonomie) . . . . .	51
IV.15Coût en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour différentes valeurs de puissance éolienne pour le site de Adrar (1 jour d'autonomie) . . . . .	53
IV.16Coût en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour le site de Tlemcen (1 jour d'autonomie) . . . . .	53
IV.17Energie des batteries en fonction de la puissance nominale photovoltaïque dans le site de Adrar(3j d'autonomie) . . . . .	54
IV.18Energie des batteries en fonction de la puissance nominale photovoltaïque dans le site de Tlemcen(3j d'autonomie) . . . . .	54
IV.19LCE en fonction le nombre jour d'autonomie dans le site de Adrar . . . . .	55
IV.20LCE en fonction le nombre jour d'autonomie dans le site de Tlemcen . . . . .	55
IV.21LCE en fonction du nombre de jours d'autonomies sur le site de Adrar . . . . .	55
IV.22LCE en fonction du nombre de jours d'autonomies sur le site de Tlemcen . . . . .	55

# Liste de Tableaux

II.1 L'analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels . . . . .	27
III.1 Équations régissant les différentes approximations pour la puissance éolienne. . .	34
III.2 Tableau d'entraînement pour les puissances . . . . .	42
III.3 Tableau d'entraînement pour capacité du batterie . . . . .	43
IV.1 Données géographiques pour les sites sélectionnés . . . . .	47
IV.2 Paramètres physiques pour la modélisation du générateur photovoltaïque . . . .	49
IV.3 Paramètres physiques pour la modélisation du générateur éolienne . . . . .	49
IV.4 Paramètres physiques pour la modélisation de l'état de charge du batteries et la puissance apparente de l'onduleur . . . . .	50
IV.5 Paramètres techniques des composants du système. . . . .	50
IV.6 LPSP avec coût minimum . . . . .	56
IV.7 coût avec LPSP minimum . . . . .	57

# Abbréviations

**S.E.H:** système d'énergie hybride

**PV:** photovoltaïque

**Bus CC:** bus a courant continu

**Bus CA:** bus a courant alternatif

**SLP:** perceptron entrée poids sortie

**PMC:** perceptron multicouche

**RNA:** Réseaux de neurones artificiels

**MPPT:** Maximum Power Point Tracker

**ANN:** Artificiel neural network

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Actuellement, le monde cherche à s'éloigner des sources d'énergie polluantes et à s'appuyer sur des sources d'énergie renouvelables. Ces énergies non polluantes constituent une solution adaptée pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'énergie renouvelable est une forme d'énergie importante en raison de sa flexibilité, de sa facilité d'utilisation et de la diversité des domaines d'activité dans lesquels elle doit fonctionner. Nous pouvons compter sur des sources d'énergie renouvelables qui disposent non seulement de technologies de production d'énergie efficaces [11].

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et solaire, est considérée comme une alternative de production importante dans les systèmes d'énergie électrique mondiaux d'aujourd'hui. En fait, l'énergie éolienne et les systèmes photovoltaïques ont connu une croissance fulgurante ces dernières années et sont de plus en plus accessibles en termes de technologie et de coût. Une fois installés, ces systèmes ne dépendent plus du réseau, avec l'avantage d'être proche du point de consommation [12].

Pour le développement écologique et économique, le couplage de systèmes photovoltaïques-éolien (PV-Eolien) peut être très intéressant du point de vue du vent et de l'ensoleillement lorsque les conditions locales sont favorables [13]. Les systèmes photovoltaïques ne suffiront peut-être pas à eux seuls à répondre aux besoins énergétiques requis. En fait, l'énergie éolienne ou solaire peut faire défaut lorsque nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement du système toute l'année, nous envisageons d'utiliser un système hybride [14]

Afin d'améliorer l'efficacité et la rentabilité des systèmes énergétiques hybrides, il est impératif d'optimiser les modèles mathématiques des sources d'énergie renouvelables à l'aide de diverses techniques d'optimisation. Réaliser une analyse technico-économique de ces systèmes hybrides est essentiel pour garantir une utilisation optimale de la production électrique. Lorsque plusieurs modèles de systèmes hybrides sont disponibles, le processus de sélection se concentre sur le choix du modèle qui offre une puissance fiable et suffisante au tarif le plus économique.

De plus, la conception d'un système hybride repose fortement sur les performances de ses composants individuels. En fonction du lieu et de la période, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne peut se compléter de manière très efficace. Lorsque les ressources solaires sont à leur apogée, la vitesse du vent a tendance à être faible, et vice versa. C'est pourquoi l'exploitation de l'énergie des sources d'énergie renouvelables solaires et éoliennes suscite un intérêt croissant, car elles offrent une solution techniquement et économiquement avantageuse pour produire de l'électricité dans les zones reculées. Même si l'utilisation séparée

de l'énergie solaire et éolienne peut entraîner des coûts supplémentaires, leur intégration dans un système hybride avec un composant de stockage est cruciale pour améliorer la fiabilité et répondre aux demandes énergétiques des applications autonomes ou connectées au réseau [15].

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous aborderons les aspects généraux d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) combiné à un système de stockage. Le deuxième chapitre est consacré à une introduction à la technique des réseaux de neurones artificiels. Dans le troisième chapitre, nous explorons les modèles mathématiques utilisés pour simuler la production énergétique des différents éléments du système hybride. En plus, un modèle économique y est détaillé. Enfin, le quatrième chapitre est consacré aux résultats obtenus par simulation, suivis de commentaires, d'une conclusion générale et des perspectives pour les travaux à venir.

# Chapitre 01 : Généralités sur les systèmes hybrides

## I.1 Introduction:

Les énergies renouvelables, en plus d'être propres, sont inépuisables et deviennent de plus en plus compétitives par rapport aux énergies fossiles [16]. On constate une augmentation de l'utilisation de systèmes d'énergie renouvelable, notamment des systèmes complexes combinant l'énergie solaire et éolienne en un seul système hybride[16]. L'objectif est de contrebalancer l'augmentation des prix des carburants, de diminuer les coûts d'exploitation et de fournir un service de meilleure qualité que les systèmes classiques reposant sur une seule source d'énergie, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre [17]. Dans ce chapitre, nous exposons les diverses configurations des systèmes hybrides ainsi que les défis rencontrés lors de leur fonctionnement.

## I.2 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H):

Dans sa forme la plus générale, le système hybride de production d'énergie implique l'utilisation simultanée et synergique de diverses sources d'énergie facilement accessibles. Il repose sur la combinaison de deux technologies ou plus, travaillant de concert pour améliorer la disponibilité énergétique et ainsi augmenter la fourniture globale d'énergie[18]. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride [19].

## I.3 Classification des systèmes hybrides:

Les systèmes hybrides sont classés selon plusieurs critères. Les plus courants sont présentés sur la figure I.1. Généralement, trois critères structurels peuvent être utilisés pour classer

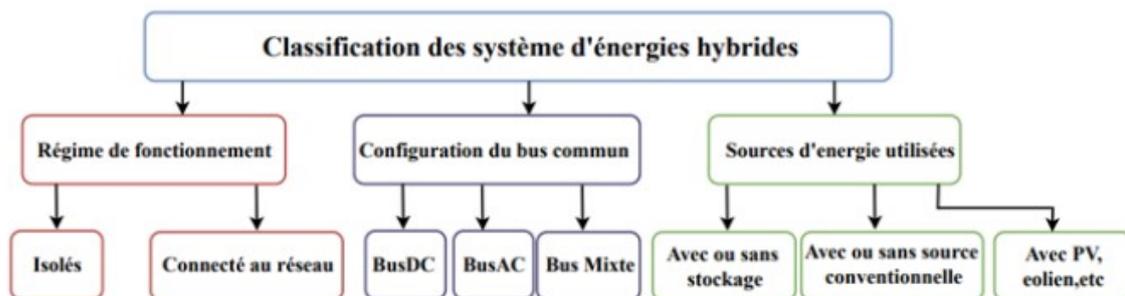


Figure I.1: Classification des systèmes hybrides [1]

les systèmes énergétiques. Tout d'abord, la présence ou l'absence d'une source d'énergie traditionnelle comme Ensuite, la présence éventuelle d'un dispositif de stockage qui garantit une

meilleure continuité de l’approvisionnement énergétique en cas d’indisponibilité de la ressource primaire pour la conversion en électricité. Ces dispositifs peuvent être divers tels que des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d’hydrogène ou des volants d’inertie. Enfin, la variété des sources d’énergie renouvelables utilisées, telles que les systèmes photovoltaïques, les éoliennes ou les convertisseurs d’énergie hydraulique, qui dépendent du potentiel énergétique disponible selon l’emplacement du système hybride. De plus, les exigences de la charge électrique à alimenter déterminent également le besoin de sources supplémentaires, de dispositifs de stockage ou de sources conventionnelles [19]. La figure I.2 montre la structure générale d’un système hybride. On y trouve les principaux composants que peut receler un système hybride: des bus AC et des bus DC, des sources d’énergies conventionnelles et autre renouvelables, des convertisseurs (onduleurs, redresseur et convertisseurs bidirectionnels), des charges DC et AC et des systèmes de stockage.

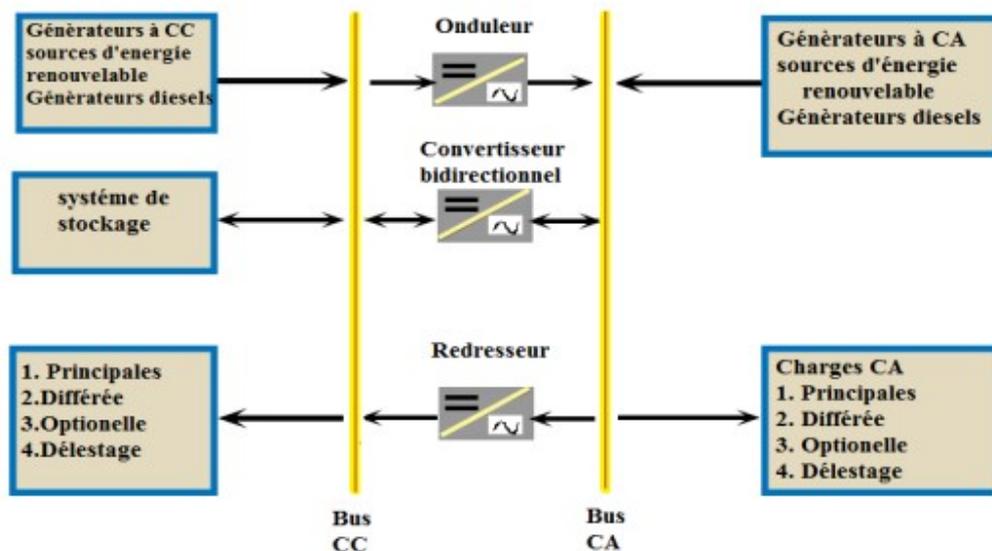


Figure I.2: Structure générale d’un système hybride [19]

### I.3.1 Systèmes hybrides avec source d’énergie conventionnelle:

**Systèmes photovoltaïques/source conventionnelle:** Ce genre de système hybride est principalement déployé dans des endroits présentant un climat chaud où l’énergie solaire est abondante. Dans cette configuration initiale, le générateur diesel peut fournir l’énergie à la charge via des convertisseurs électroniques ou recharger la batterie. Selon la stratégie de gestion du système hybride, l’énergie produite par les panneaux solaires peut soit alimenter directement la charge, soit transiter par la batterie (voir figure I.3)[20].

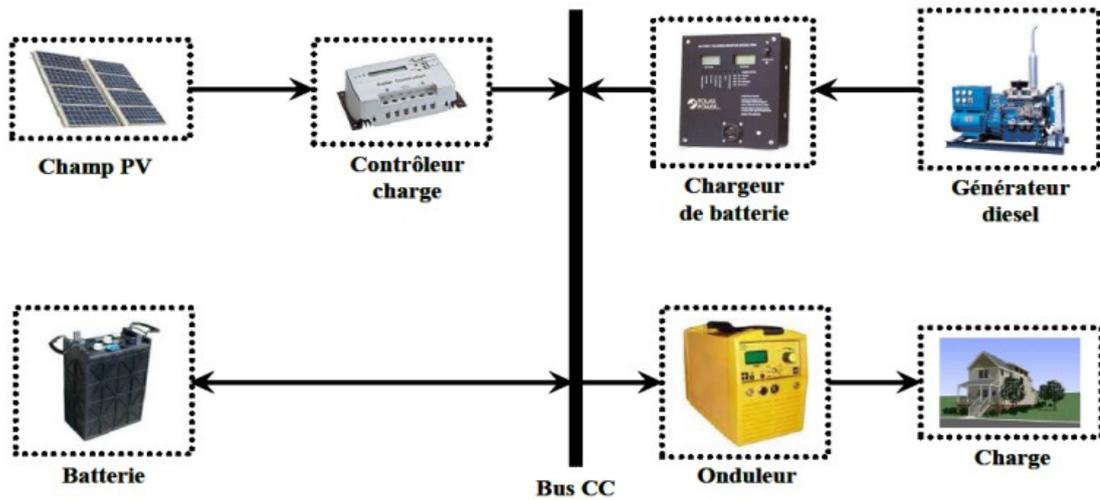


Figure I.3: Système hybride avec connexion série [2]

La deuxième configuration envisageable est celle de la commutation. Malgré quelques désavantages, elle est fréquemment utilisée. Il est possible d'alimenter le consommateur soit par une source traditionnelle, soit par une installation photovoltaïque et une batterie via un onduleur, alimenté par les deux. Il est impossible de le faire simultanément. Un redresseur peut être utilisé pour charger la batterie du générateur diesel. En raison de la complexité des systèmes hybrides, la gestion du système doit être automatisée [3]. La figure I.4 représente le schéma du système. La configuration la plus récente d'un système hybride photovoltaïque/source con-

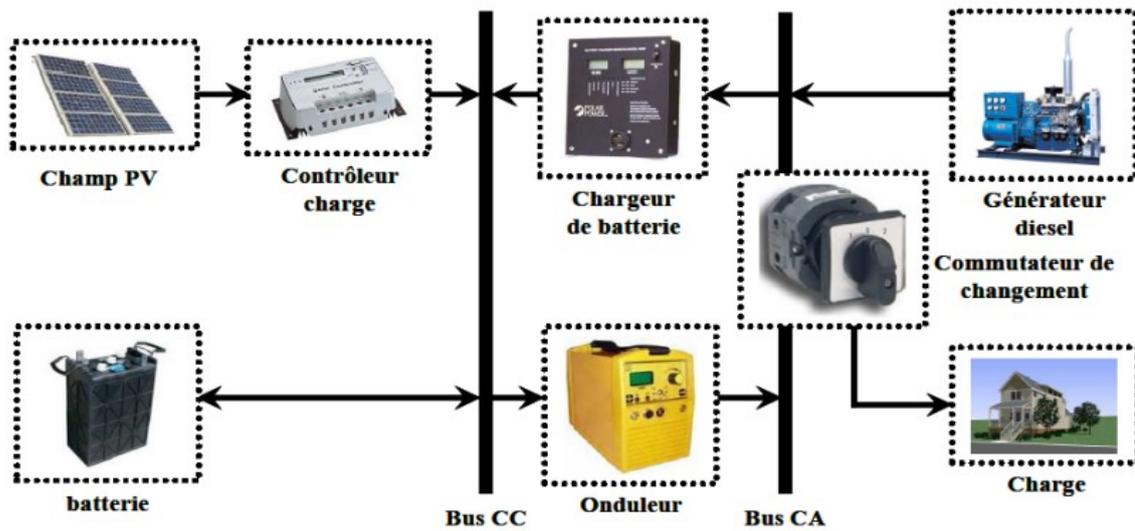


Figure I.4: Système hybride à commutation [2]

ventionnel est la connexion parallèle. Dans ce cas, le bus de courant alternatif est connecté au générateur diesel. La batterie et l'installation photovoltaïque sont connectées à un autre bus de courant continu. Les bus sont reliés par un convertisseur électronique bidirectionnel. Il

peut fonctionner comme onduleur lorsque la charge (ou une partie d'elle) est fournie par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie, ou comme redresseur lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe au chargement de la batterie. En conséquence, les deux bus peuvent alimenter simultanément la charge [3]. La figure I.5 représente le schéma d'un système hybride à connexion parallèle.

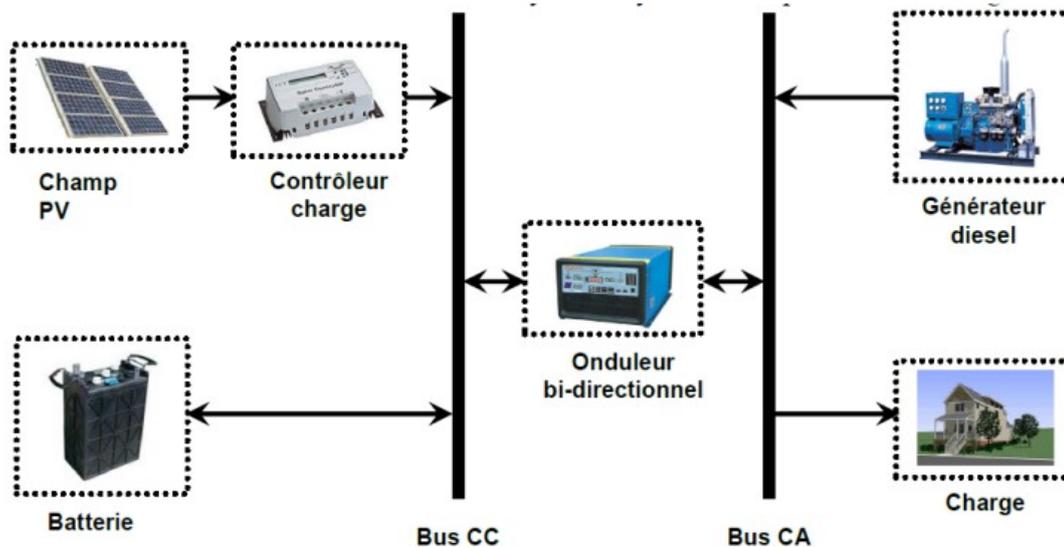


Figure I.5: Système hybride à connexion parallèle [3]

**Systèmes éolien/source conventionnelle :** C'est un système doté d'une source éolienne et d'un générateur diesel. Les éoliennes peuvent produire le même type de courant alternatif que ce qu'elles produisent par les générateurs diesel, c'est pourquoi les études sur les systèmes hybrides éolien/diesel diffèrent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques. Il n'y a donc pas une grande variété de configurations pour le système hybride. Des études ont été menées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité, comme c'est le cas des îles Canari [21], en passant par des îles de taille moyenne telles que la Corse [22] jusqu'aux grandes îles telles que l'Angleterre [23]. Pour diversifier les modes de production, ils ont utilisé un générateur d'énergie éolienne. Il y a également des écrits sur les aspects politiques du système hybrides (voir [24][25]).

**Système photovoltaïque/éolien/diesel :** La création d'un tel système vise à diversifier les sources d'énergie renouvelables. De ce fait, puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité de carburant, on vise à réduire davantage la quantité de carburant consommée [26].

### I.3.2 Systèmes hybrides sans source conventionnelle :

Dans des endroits où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible, ces systèmes hybrides fonctionnent principalement en mode autonome. Quatre configurations de système hybride avec ou seront présentées sans stockage [27].

#### I.3.2.1 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage:

Il est nécessaire de relier l'installation photovoltaïque à une autre source d'énergie afin de pouvoir produire de la charge pendant la nuit ou en temps nuageux. Les maisons et les villages sont alimentés par ces systèmes.

Certains articles parlent de modélisation et analyse, ainsi que d'autres composants de dimensionnement optimisé du système. La probabilité de perte d'alimentation est le critère d'optimisation le plus couramment utilisé. Un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents, comme un électrolyseur et une batterie ou un électrolyseur et un super condensateur, sont parfois les meilleurs choix pour le stockage. Le supercondensateur est utilisé pour un stockage rapide avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent [19].

#### I.3.2.2 Système hybride éolien/stockage:

Il existe deux objectifs potentiels pour connecter le dispositif de stockage à un générateur éolien. D'une part, lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif peut jouer le rôle de tampon, ce qui permet de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne[28][29]. D'autre part, il peut servir de stockage à plus long terme en régime autonome pour permettre aux clients de s'alimenter en électricité pendant les périodes de faible vitesse du vent [30][31]. Les recherches diffèrent par l'intervalle de temps utilisé. En ce qui concerne l'étude de processus à variation lente, les auteurs [32][28] sont intéressés par l'énergie produite par chacune des sources. D'autres recherches sont menées sur les processus de courte durée [33][34].

#### I.3.2.3 Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage:

Parce qu'il manque d'une source conventionnelle ou d'un dispositif de stockage, ce type de système hybride est rarement utilisé. C'est pourquoi les recherches menées sur ces systèmes

sont rares. Des travaux ont été réalisés sur un système existant (Pecen et al., 2004) utilisé à des fins éducatives en Northern Iowa, aux États-Unis; un projet de système hybride pour le réseau électrique d'une île croate (Urli et Kamenski, 1998); et une estimation des performances (Tina et al., 2006). [19].

#### **I.3.2.4 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage:**

Ce système est le plus fréquemment utilisé et le plus avantageux car il comprend un dispositif de stockage et deux sources d'énergie renouvelables complémentaires [3].

### **I.4 Configuration des systèmes des énergies hybrides:**

Les configurations des systèmes d'énergie hybride offrent diverses options de connexion. Typiquement, elles intègrent des composantes d'énergies renouvelables, ainsi que des systèmes conventionnels.

- Architecture à bus CC (courant continu) ;
- Architecture mixte à bus CC-CA (courant continu-courant alternatif) ;
- Architecture à bus CA (courant alternatif).

#### **I.4.1 Architecture à bus CC:**

Cette configuration spécifique est illustrée dans la figure I.6. Chaque système génère de l'énergie qui est ensuite acheminée vers un bus en courant continu (CC). Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie en courant alternatif (CA) transfèrent initialement leur puissance à un redresseur pour la convertir en CC. Les générateurs diesel sont ensuite connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges en courant alternatif. Il est donc impossible pour les générateurs diesel d'alimenter directement les charges en courant alternatif. L'onduleur doit fournir l'énergie aux charges en courant alternatif à partir du bus en courant continu, tout en respectant les consignes d'amplitude et de fréquence définies [35].

#### **I.4.2 Architecture mixte à bus CC/ CA :**

Cette architecture fusionne les bus en courant continu (CC) et en courant alternatif (CA), et leur agencement est illustré dans la figure I.7. Dans ce type de configuration, les systèmes d'énergies renouvelables ainsi que les générateurs diesels peuvent directement alimenter une partie de la charge en courant alternatif, ce qui entraîne une amélioration du rendement global

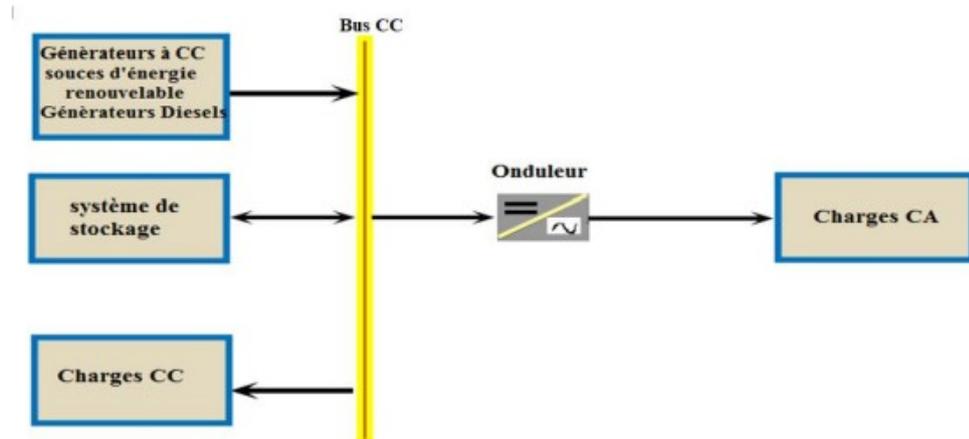


Figure I.6: Configuration des SEH à bus CC [4]

du système et une réduction de la puissance nominale nécessaire pour le générateur diesel et l'onduleur. Les générateurs diesels et l'onduleur peuvent fonctionner soit de manière autonome soit en parallèle en synchronisant leurs tensions de sortie. Les convertisseurs placés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel qui, en mode normal, assure la conversion CC/CA (fonctionnement de l'onduleur). Si le générateur diesel produit un excès d'énergie, il peut également charger les batteries (fonctionnement en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut prendre en charge les pics de charge lorsque le générateur diesel est surchargé. La réalisation de ce système est complexe en raison du fonctionnement en parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner de manière autonome et non autonome tout en synchronisant ses tensions de sortie avec celles du générateur diesel) [4].

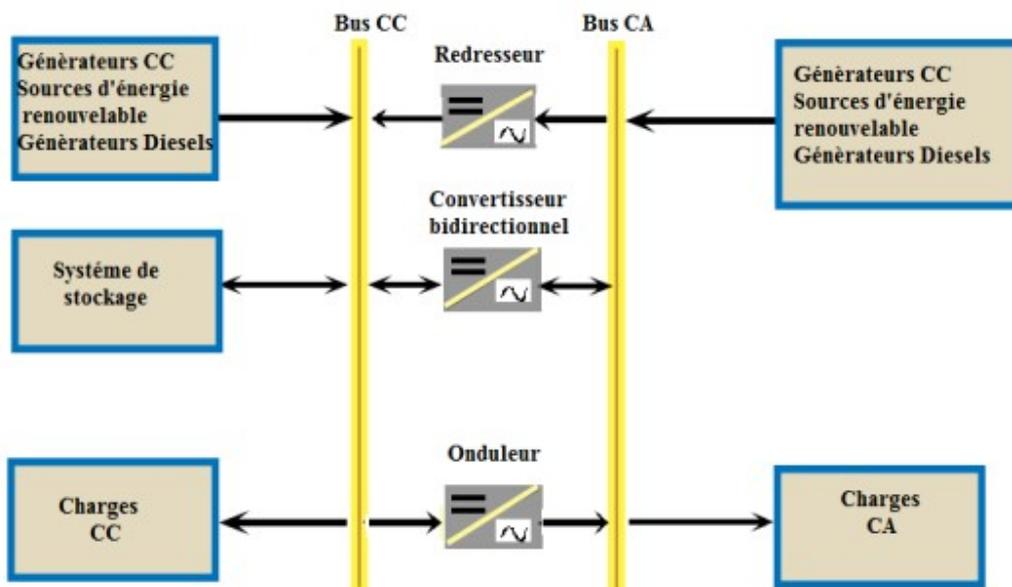


Figure I.7: Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [4]

### I.4.3 Architecture à bus CA:

Toutes les sources de production sont connectées au bus en courant alternatif (CA) par le biais de convertisseurs, ou le générateur diesel est utilisé pour stabiliser la fréquence du bus. L'interconnexion de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (voir figure I.8) permet de créer des systèmes flexibles composés de modules interchangeable. En termes de ressources énergétiques utilisées ou appliquées, il est possible de combiner différents systèmes, qu'ils soient renouvelables ou conventionnels. De plus, le système peut être facilement étendu en ajoutant d'autres composants ou générateurs électriques pour augmenter la production d'énergie. Toutefois, il convient de noter que la mise en réseau de tous les composants sur un bus en courant alternatif rend la gestion du système de commande plus complexe [36].

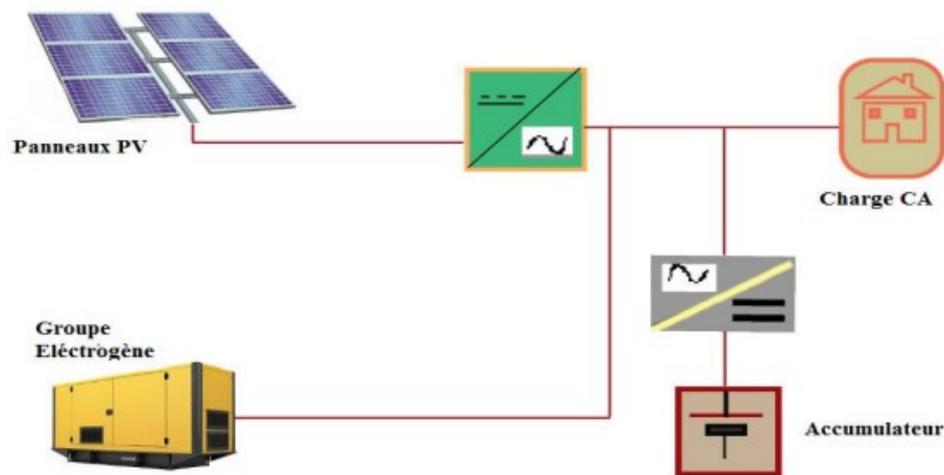


Figure I.8: Configuration de bus CA [4]

## I.5 Avantages et inconvénients des systèmes hybrides :

La mise en place d'un système hybride présente plusieurs avantages :

- Plus de fiabilité.
- Une diminution du volume de stockage.
- Réduire les coûts de fabrication.

Cependant, les inconvénients suivants sont présents:

- Plus de complexité dans le système.
- La difficulté d'optimiser les différents organes du système.

## I.6 Principaux composants des systèmes hybrides :

Le système hybride utilisé dans ce travail est un système autonome déconnecté du réseau, composé de trois éléments principaux: Des panneaux photovoltaïques, une éolienne (aérogénérateur) et un système de stockage de batteries (voir figure I.9). En plus, le système physique comprend des convertisseurs (onduleur, redresseur à pilotage MPPT, un pont à diodes) et un régulateur de charge [36][37][38][39]. Le système peut alimenter des charges AC et autres DC. Dans ce qui suit nous allons passer en revue les caractéristiques physiques et techniques des trois principaux composants du système hybride étudié, à savoir la cellule solaire, élément de base d'un panneau photovoltaïque, l'éolienne et les batteries.

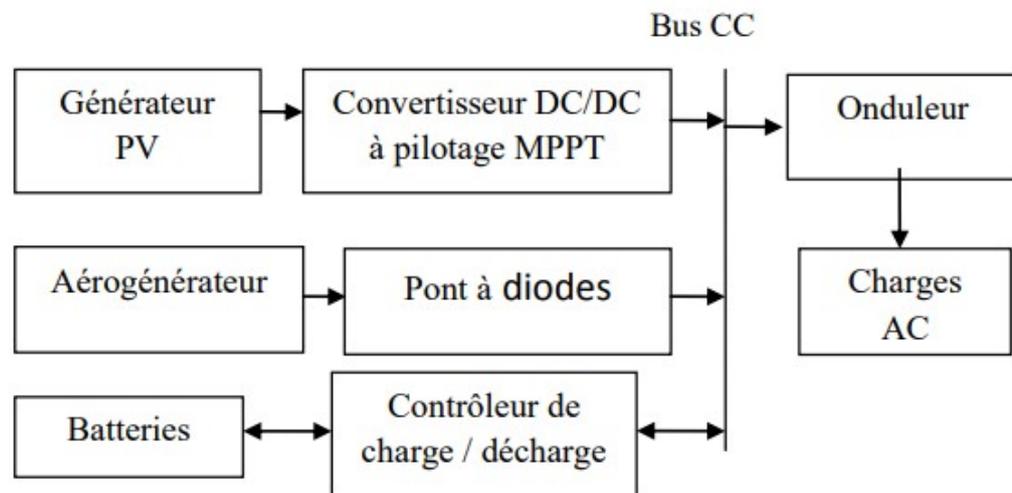


Figure I.9: Schéma synoptique du système hybride étudié [5]

### I.6.1 Cellule photovoltaïque :

Le plus petit composant d'une installation photovoltaïque est la cellule photovoltaïque, également appelée photopile. Elle est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en électricité. Les composants des cellules photovoltaïques sont les suivants :

1. Une fine couche de semi-conductrice (matériau avec une bande interdite qui sert de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans excitation extérieure et dont les propriétés électroniques peuvent être modifiées) comme le silicium, un matériau ayant une bonne conductivité électrique.
2. Une couche anti-reflet qui maximise la pénétration des rayons solaires.

3. d'un métal conducteur sur le dessous ou anode et d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode.
4. Un métal conducteur sur le dessous ou anode et d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode.
5. Les plus récents cellules incluent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes située en dessous du semi-conducteur, ce qui permet à la lumière de rebondir plus longtemps dans le semi-conducteur pour améliorer le rendement [6].

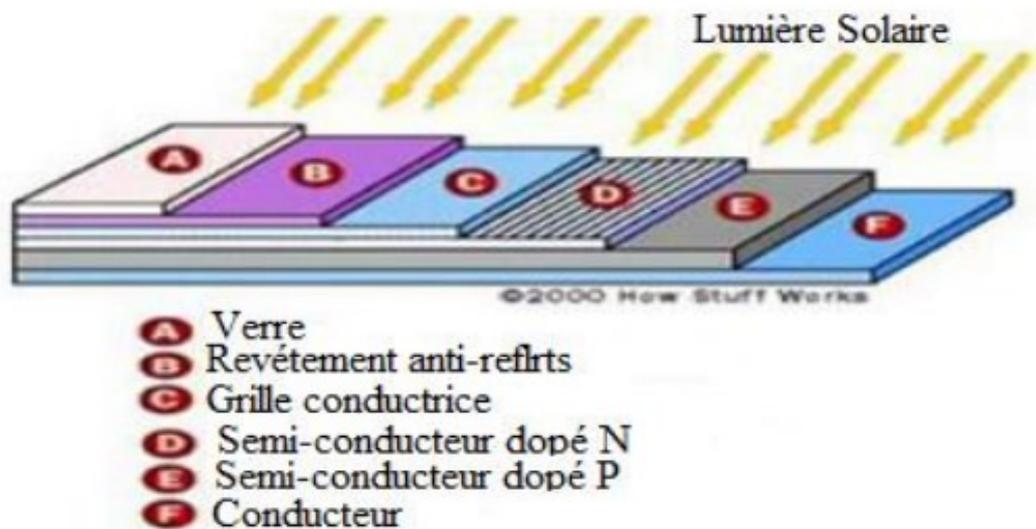


Figure I.10: Structure de base d'une cellule solaire [6]

### I.6.1.1 Principe de fonctionnement :

La conversion directe de la lumière solaire en électricité peut être effectuée de différentes manières, dont la plus connue est la conversion photovoltaïque qui utilise des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés Les semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et le tellure de cadmium (CdTe) sont des exemples. Les cellules solaires de type GaAs sont extrêmement coûteuses à produire. Il est actuellement principalement limité aux utilisations spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de silicium cristallin car il est non toxique, contrairement au cadmium ou au sélénium, Il possède des capacités de conversion exceptionnelles et représente environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés tels que les silicates et la silice, ce qui en fait une ressource presque inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur produit un courant électrique dans une charge externe lorsqu'elle est exposée à la lumière. Son fonctionnement peut être résumé comme suit :

Les photons d'énergie ( $E_{ph} = h\nu$ ) qui pénètrent dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction lorsqu'ils sont exposés au rayonnement solaire. Si cette énergie est adéquate, elle a la capacité de déplacer les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction du matériau semi-conducteur. , ce qui entraîne la création de paires "électron-trou". Un champ électrique qui limite le potentiel. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via une connexion extérieure, ce qui provoque une différence de potentiel et un courant électrique circule[7] (voir figure I.11).

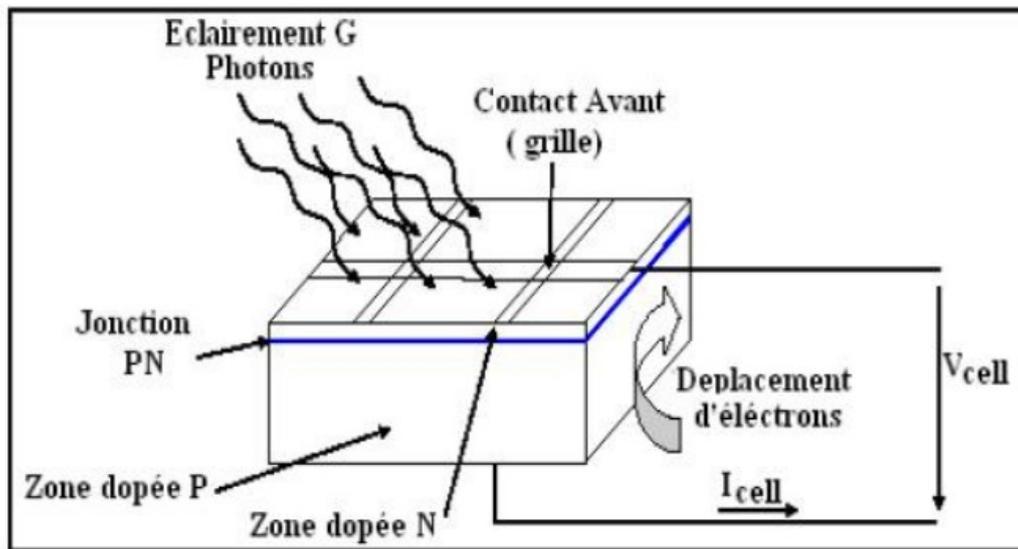


Figure I.11: : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire[7]

### I.6.1.2 Différents types de cellules photovoltaïques :

Il existe de nombreuses variétés de cellules solaires ou de cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule a un rendement et un coût uniques. Cependant, le rendement, quel que soit le type, reste assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules recevront. Trois types principaux de cellules existent actuellement:[40]

#### a. Cellules monocristallines :

Leur rendement est le meilleur (de 12 à 18% , voire 24% en laboratoire), mais leur coût est trop élevé en raison de leur fabrication complexe (voir figure I.12).

#### b. Cellules poly-cristallines :

Leurs conceptions sont plus simples et leur fabrication coûte moins cher. Cependant, leur rendement est inférieur (de 11% à 15 , voire 19,8% en laboratoire) (voir figure I.12).

### c. Cellules amorphes :

Bien qu'elles nécessitent une très faible épaisseur de silicium et aient un faible coût, leur rendement est faible (de 5% à 8 %voire 13 %en laboratoire). Ils sont fréquemment utilisés dans des produits de consommation plus petits, comme des calculatrices solaires et des montres. [40] (voir figure I.13)



Figure I.12: cellule polycristalline et monocristalline [40]

Figure I.13: Module silicium amorphe [40]

## I.6.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque:

Pour faciliter l'étude des cellules photovoltaïques et leur intégration dans le processus de production de l'énergie électrique, les spécialistes du domaine ont établi des circuits électriques équivalents à même de reproduire le comportement de ces cellules lorsqu'elles sont utilisées, dans un premier temps, pour recevoir de l'énergie solaire, et ensuite pour alimenter une charge électrique. Deux modèles de circuits électriques équivalents sont cités dans ce qui suit.

### I.6.2.1 Modèle à une diode:

La figure I.14 illustre le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode. Ainsi, une diode de jonction P-N avec une source de courant  $I_{ph}$  peut représenter une cellule idéale. Les pertes par effet joule, qui sont causées par une série de résistances causées par la résistivité du matériau semi-conducteur, sont représentées par une résistance série  $R_s$ . La résistance parallèle  $R_p$  représente les pertes internes ou le courant de fuite à travers la diode de Shockley et la résistance de la grille collectrice et le courant collecté par le bus. La valeur habituelle de cette résistance est très petite, d'environ un dixième d'ohms, reflétant directement la qualité de fabrication des cellules PV. En d'autres termes, c'est généralement un comportement de fuite. Cela ressemble à l'ajout d'un courant supplémentaire au photo-courant proportionnel à la tension créée en plus du courant de la diode. En utilisant la loi de Kirchhoff sur le circuit

équivalent de la figure I.14, on peut trouver le rapport entre la tension de sortie  $V$  et le courant de sortie  $I$  aux bornes de la résistance de charge  $R_c$  [41].

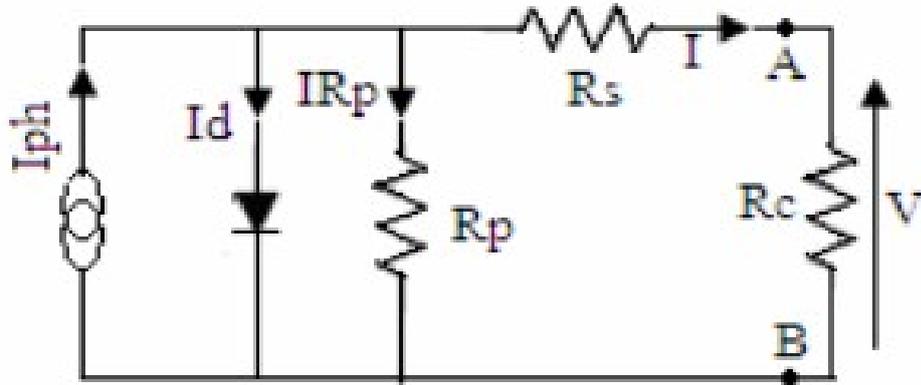


Figure I.14: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode [41]

Ainsi, le modèle mathématique du courant-tension d'une cellule photovoltaïque est fourni par:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{e}{nKT} (V_{pv} + IR_s) \right) - 1 \right] \quad (\text{I.1})$$

$V_{pv}$  est la constante de saturation lorsqu'elle fonctionne en générateur. La tension aux bornes de la cellule en question,  $R_{shu}$  est la résistance,  $I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien le courant court (court circuit), shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,  $R_{ser}$  est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

[42].

### I.6.2.2 Modèle à deux diodes:

Il est également appelé 2M7P (Lumped, two mechanism model with seven parameters) . Le schéma électrique équivalent dans la figure I.15 peut être utilisé pour représenter le fonctionnement d'une cellule solaire. Le circuit équivalent comporte deux diodes branchées en parallèle avec une source de courant électrique dont l'intensité dépend de l'éclairement solaire [43]. La résistivité du matériau, la résistivité des électrodes et le contact semi-conducteur-métal sont tous représentés par la résistance série  $R$ . L'inverse de la pente de la caractéristique  $I(V)$  pour une tension  $V$  égale à  $V_{co}$  donne sa valeur. C'est idéalement le plus faible pour limiter son impact sur le courant cellulaire. Cela peut être atteint grâce à un contact optimal entre le métal et le semi-conducteur tout en réduisant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage excessif entraîne une recombinaison accrue des porteurs.

La présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut, est indiquée par la résistance parallèle (shunt) ou le court-circuit  $R_{sh}$ . Cela se produit lorsque des contacts métalliques à haute température pénètrent dans l'émetteur. Elle peut également être causée par un court-circuit à l'extérieur de la cellule. Il est nécessaire que cette valeur soit la plus élevée possible [44].

Une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de techniques itératives est utilisée pour représenter le modèle à deux diodes. La loi de Kirchhoff est utilisée pour

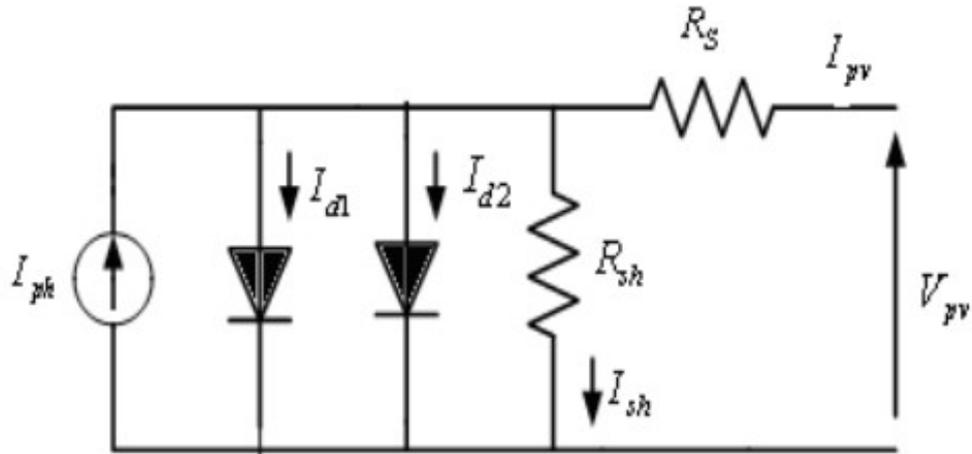


Figure I.15: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P. [41]

déduire directement l'équation caractéristique. [44]

$$I_{d1} = I_{s1} \cdot \left( \exp \left( -\frac{V_d}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \cdot \left( \exp \left( -\frac{V_d}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- $V_t = \frac{KT_c}{e}$  : représentant le potentiel thermodynamique
- $T_c$  : est la température absolue
- $e$  : la constante de charge d'électron,  $1.602 \times 10^{-19}$  C
- $K$  : la constante de Boltzmann,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

- $I_{sh}$  : est le courant de la résistance de shunt

L'expression suivante donne le courant électrique produit par la cellule. [45][46]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left( \exp \left( -\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left( \exp \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.5)$$

## I.7 Définition de l'énergie éolienne:

Les sources d'énergie renouvelable incluent l'énergie éolienne. L'arbre de l'aérogénérateur est entraîné par l'énergie cinétique du vent. Cette énergie est ensuite convertie en énergie mécanique et transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique combiné à une turbine éolienne. Si les vitesses de la turbine et de la génératrice sont du même ordre, ce couplage mécanique peut être effectué directement ou peut être effectué à l'aide d'un multiplicateur. Enfin, l'énergie électrique produite peut être utilisée pour alimenter des charges isolées, stockée dans des accumulateurs ou distribuée par un réseau électrique[8].

Une éolienne (classique) se compose généralement d'une turbine éolienne avec des pâles qui tournent en présence de vent, d'un moyeu qui fixe les pâles, d'un arbre qui transmet le mouvement des pâles vers un multiplicateur qui amplifie le mouvement de rotation, d'une génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, d'une tour sur lequel repose la nacelle qui contient les composants électriques et électroniques nécessaires à l'exploitation de l'énergie électrique produite (voir figure I.16 ) [8].

### I.7.1 Modes d'installation et différents types d'éoliennes:

Il existe généralement deux types de modes d'installation des éoliennes :

- Éoliennes non connectées : Ces éoliennes sont installées sur des sites isolés et utilisent des réseaux dits "personnels".
- Éoliennes combinées : Ces éoliennes sont installées sous forme de parcs éoliens terrestres ou de plus en plus souvent offshore. Dans les parcs éoliens offshore, la présence du vent est plus régulière. Posséder une ferme offshore permet de réduire les nuisances sonores et d'améliorer l'esthétique. D'un point de vue structurel, les deux principaux types d'éoliennes se composent de trois éléments : le rotor, la nacelle et la tour.

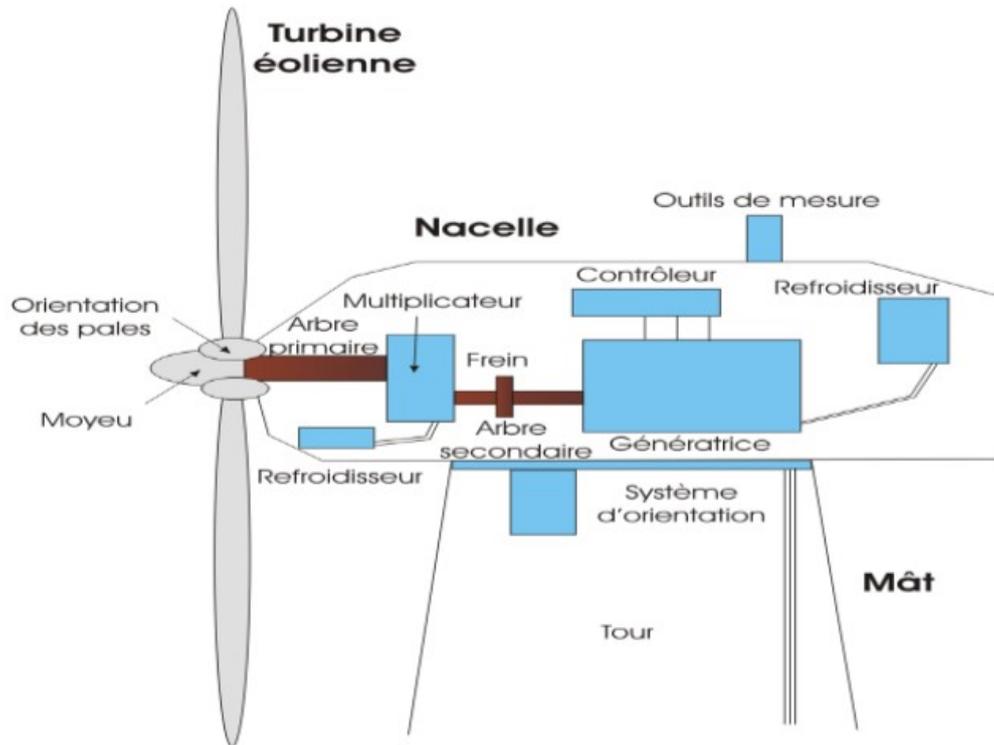


Figure I.16: Principaux composants d'une éolienne [8]

#### I.7.1.1 Eoliennes à axe vertical:

Les éoliennes à axe vertical ont des tours plus courtes, mesurant entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer l'ensemble des équipements de conversion d'énergie (générateurs, multiplicateurs, etc.) à la base de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents étant plus faibles près du sol et les éoliennes étant affectées par les turbulences, leur efficacité est réduite. En outre, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et les mâts sont soumis à de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, les fabricants d'éoliennes privilégient aujourd'hui les éoliennes à axe horizontal.[8].

#### I.7.1.2 Eoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal fonctionnent selon le principe de l'éolienne traditionnelle. Elles se composent d'une à trois pales aérodynamiques, le type le plus courant étant le rotor tripale. Ce dernier offre un bon compromis entre la puissance, le coût, la vitesse et l'esthétique. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées en raison de leur rendement élevé, supérieur à celui des éoliennes à axe vertical. [8].

## I.7.2 Notions théoriques sur l'aérogénérateur:

### I.7.2.1 Coefficient de puissance $C_p$ :

La puissance aérodynamique contenue dans le vent traversant une éolienne est donnée par

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (\text{I.6})$$

Nous remarquons que la puissance aérodynamique est proportionnelle au cube de la vitesse  $v$  mesurée en  $m/s$  et où :

$\rho$  : Densité de l'air

$A = \pi R^2$  : Surface balayée par les pales de l'éolienne et  $R$  rayon de la pôle

$v$  : Vitesse du vent

Toutefois cette puissance ne peut pas être entièrement récupérée par l'éolienne. On multiplie donc cette puissance par un coefficient dit coefficient de puissance  $C_p$  qui quantifie le rendement de l'éolienne et dépend des caractéristiques aérodynamiques de celle-ci [8], telle que:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (\text{I.7})$$

Le rapport  $C_p$  peut être défini comme[8]:

$$C_p = \frac{P_{\text{mécanique}}}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

### I.7.2.2 Couple produit par l'éolienne:

Le couple  $\tau$  produit par l'éolienne est donnée par

$$\tau = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_p R \quad (\text{I.8})$$

où :

$\rho$  : Densité de l'air

$A$  : Surface balayée par les pales de l'éolienne

$v$  : Vitesse du vent

$C_p$  : Coefficient de puissance de l'éolienne

$R$  : Rayon de la turbine éolienne

### I.7.2.3 Vitesse spécifique de l'éolienne:

Le paramètre de rapidité, également connu sous le nom de rapport de vitesse en bout de pale, est le rapport de la vitesse d'extrémité des pales à la vitesse du vent [8].

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v_{vent}} \quad (\text{I.9})$$

où  $\Omega$  est la vitesse de rotation des pâles,  $R$  le rayon des pâles et  $v_{vent}$  la vitesse du vent.

### I.7.2.4 Limite de Betz:

Étant donné que la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle, l'éolienne ne peut pas capter toute l'énergie. Par conséquent, une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été recueillie. Selon le théorème du physicien allemand Betz, le rotor peut récupérer la plus grande quantité d'énergie du vent. Il représente environ 59% de l'énergie totale du vent, soit  $16/27$ . Il est maintenant possible de présenter la notion de coefficient de puissance  $C_p$ . En réalité, cette limite n'est jamais atteinte et chaque éolienne a son propre coefficient de puissance calculé en fonction de la vitesse spécifique normalisée  $\lambda$  [8].

## I.8 Description du stockage d'énergie:

Dans les systèmes en site isolé, les unités de stockage sont essentielles et jouent un rôle important dans la garantie de l'autonomie du site en créant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent un excédent et en la restituant lorsque celles-ci ne produisent pas assez [8]. Dans notre travail, nous utilisons un type de stockage électrochimique, à savoir les batteries d'accumulateurs.

### I.8.1 Principe de fonctionnement de batteries :

Les batteries sont la meilleure option pour un stockage électrochimique de faible taille. En utilisant le principe de la pile, ils emmagasinent de l'énergie électrique à la charge, qui peut être restituée à la décharge avec un bon rendement, autour de 85 %. en fonction des types de batteries.

### I.8.2 Différentes technologies de batteries:

Les industriels utilisent actuellement trois grandes familles de batteries en fonction de la nature de leurs électrodes:

- Batteries Plomb-acide;
- Batteries à base de Nickel-Cadium
- Batteries Lithium-ion

Certaines caractéristiques distinguent les batteries, telles que:

- tension nominale en charge (en Volts)
- Capacité (en Ah)
- Energie spécifique (en  $Wh/kg$ )
- Durée de vie (en cycle de charge/décharge)

## I.9 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différentes configurations de systèmes hybrides, leurs composants, les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. Ensuite, nous avons défini les propriétés physiques et techniques des trois éléments du système hybride utilisé dans cette étude, à savoir la cellule photovoltaïque, l'éolienne et les batteries.

# Chapitre 02 : Généralités sur les réseaux de neurones

## II.1 Introduction:

En 1948, Mac Culloch et Pitts, deux chercheurs américains, ont développé le premier modèle mathématique d'un neurone biologique, qu'ils ont nommé le neurone formel. A l'origine, un réseau de neurones artificiels est un système dont la conception est inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. Une unité simple de neurones est capable de réaliser certains calculs de base. Si ces unités sont connectées entre elles, celles-ci peuvent résoudre des problèmes plus complexes. Le réseau utilise différentes structures, tailles et mécanismes d'apprentissage en fonction du type et de la complexité de l'application en question. Ce chapitre abordera la présentation générale des réseaux de neurones, puis examinera les fondements de la théorie des réseaux de neurones.

## II.2 Base biologique :

Un neurone représente une cellule très complexe qui se spécialise dans la réception de signaux électriques. Selon la figure II.1, le rôle d'une neurone consiste à recevoir, conserver et transmettre des informations. Le corps cellulaire, les dendrites et l'axone constituent les trois parties principales du neurone[47].

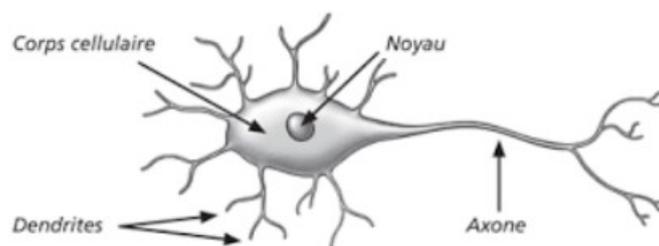


Figure II.1: Neurone biologique [47].

## II.3 Modélisation mathématique du neurone biologique:

### II.3.1 Neurone artificiel :

La figure II.2 montre le modèle mathématique du neurone artificiel. Un neurone est principalement un intégrateur qui réalise une évaluation pondérée de ses données. Ensuite, une fonction de transfert  $f$  modifie le résultat  $n$  de cette somme, ce qui entraîne la sortie du neurone  $D$ . Le vecteur  $\mathbf{R}$  du neurone est l'entrée  $\mathbf{R} = \{p_1, p_2, \dots, p_R\}$ , tandis que  $\mathbf{W} = \{W_{1,1}, \dots, W_{1,\dots}\}$ . Un vecteur de poids du neurone est représenté. L'équation suivante donne la sortie  $n$  de

l'intégrateur[48][49].

$$n = W_{1,1} \cdot p_1 + W_{1,2} \cdot p_2 + \dots + W_{1,R} \cdot p_R - b \quad (\text{II.10})$$

$$D = f(n) = f\left(\sum_{i=1}^R w_{i,j} p_j - b\right) \quad (\text{II.11})$$

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

$$n = W^T \cdot P - b$$

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

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

et le vecteur  $\mathbf{p}$  :

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_R \end{pmatrix}$$

Le biais  $b$  du neurone, également connu sous le nom de seuil d'activation neuronal, 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. Quand le seuil d'activation est atteint ou dépassé, l'argument de  $f$  est positif (ou nul). Sinon, il est négatif [48][49]. La figure II.2 illustre le modèle d'une neurone artificiel, alors que la figure II.3 représente un exemple de fonctionnement d'un réseau de neurones artificiels.

- $S$  : 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

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

Les principes de fonctionnement d'un neurone artificiel sont citées ci-après:

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

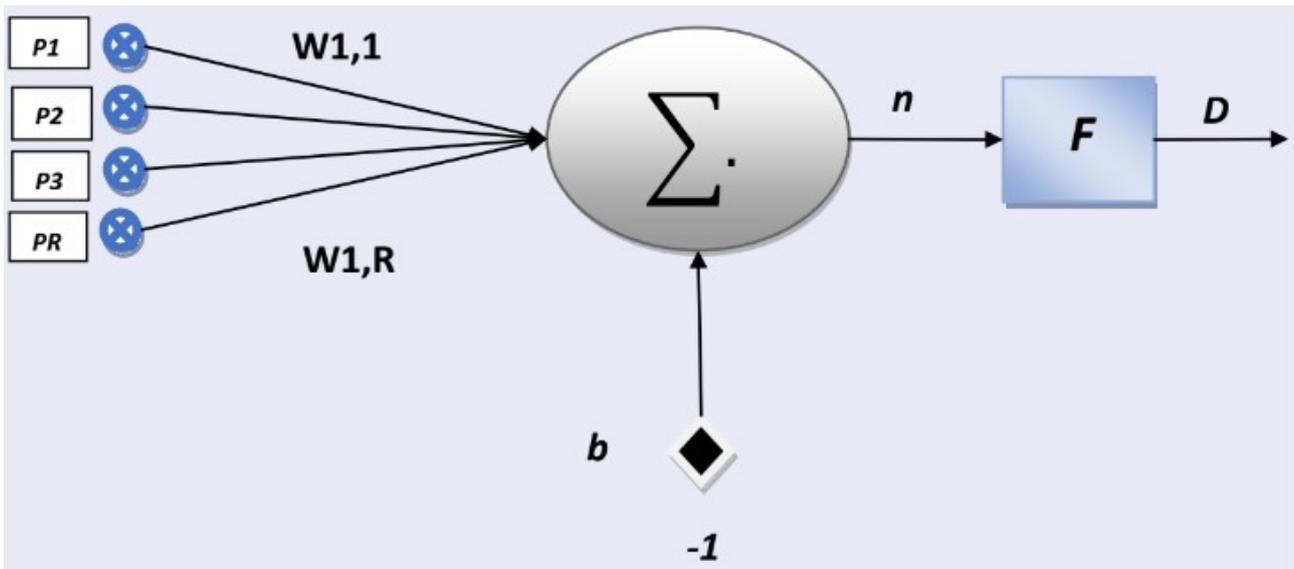


Figure II.2: Modèle d'un neurone artificiel [9].

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

Le tableau II.1 dresse une analogie entre les neurones biologiques et les neurones artificiels.

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

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

## II.5 Fonctions d'activation :

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 [47]. La figure II.4 donne les fonctions d'activation les plus utilisées.

## II.6 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.

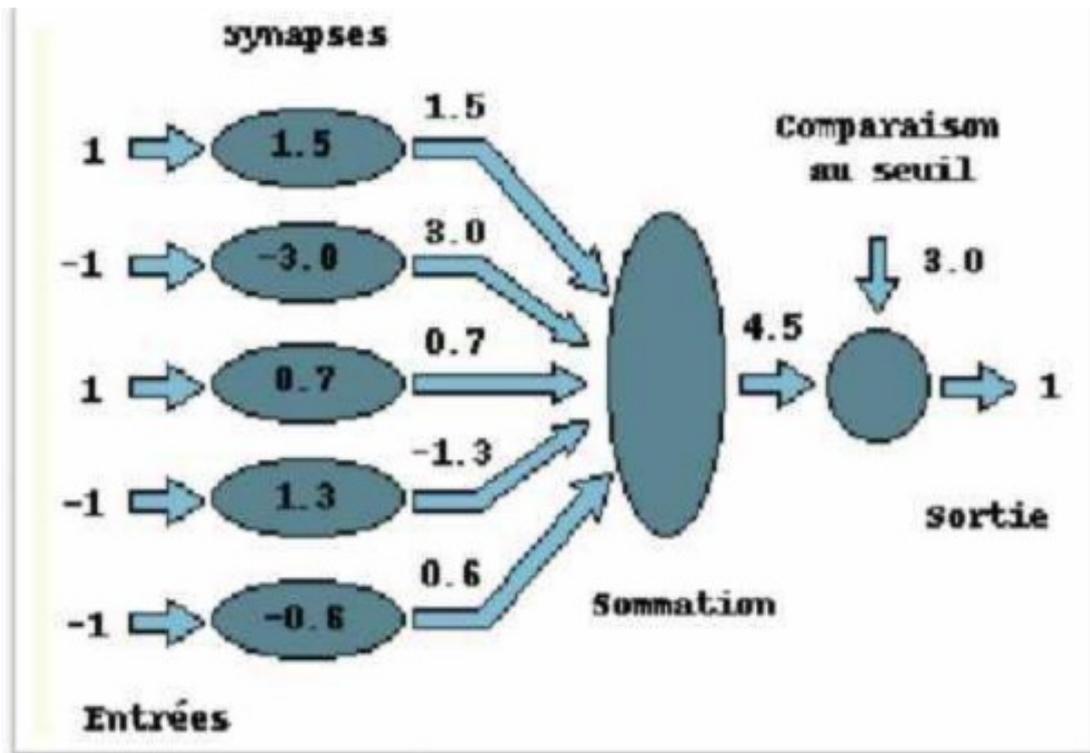


Figure II.3: Principes d'un neurone artificiel[9]

- 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.

## II.7 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).

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Forme
seuil	$a = \begin{cases} 0 & \text{si } n < 0 \\ 1 & \text{si } n \geq 0 \end{cases}$	
seuil symétrique	$a = \begin{cases} -1 & \text{si } n < 0 \\ 1 & \text{si } n \geq 0 \end{cases}$	
linéaire	$a = n$	
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	$a = \begin{cases} 0 & \text{si } n < 0 \\ n & \text{si } n \geq 0 \end{cases}$	
sigmoïde	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	
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 II.4: Fonctions d'activation les plus utilisées[9]

- 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[50].

## II.8 Erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error, MSE):

La loi de l'erreur quadratique moyenne (Mean Squared Error, MSE) dans les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks, ANN) est utilisée comme fonction de coût pour mesurer la performance du modèle. Elle permet de quantifier l'écart entre les prédictions du modèle et les valeurs réelles des données. Pour un ensemble de données avec N échantillons, l'erreur quadratique moyenne est donnée par :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

où : -  $y_i$  est la valeur réelle pour l'échantillon  $i$ , -  $\hat{y}_i$  est la valeur prédite pour l'échantillon  $i$ , -  $N$  est le nombre total d'échantillons.

## II.9 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation  $R$  est une mesure statistique utilisée pour évaluer la performance d'un modèle de régression.  $R$  est toujours un nombre entre -1 et 1.  $R > 0$  indique une corrélation positive entre les sorties du réseau (output) et les valeurs désirées (targets), alors que  $R < 0$  indique une corrélation négative. D'autre part, des valeurs de  $R$  proches de zéro signifient qu'une relation linéaire entre ces paramètres est très faible.

## II.10 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons passé en revue quelques rudiments de la théorie des réseaux de neurones artificiels, en citant l'origine de cette théorie, sa modélisation mathématique ainsi les outils numériques utilisés (calcul d'erreurs, paramètre de corrélation, etc) pour assurer une meilleure application de l'algorithme à différentes situations. En effet, à la différence des techniques traditionnelles qui ont révélé leurs limites, les réseaux de neurones ont démontré leur capacité à s'adapter à des problèmes complexes grâce à leur capacité de calcul et d'apprentissage élevée. Ils sont utilisés pour cela dans divers domaines tels que : la détection des formes et le traitement des images, la gestion des données... etc.

# Chapitre 03 : Modèle d'optimisation du système hybride

### III.1 Introduction:

Une fois que nous avons mentionné les divers éléments du système hybride (photovoltaïque-éolien) et des batteries, ainsi que l'impact de leurs paramètres sur le système, nous entamons la modélisation du système global. Pour évaluer la stratégie d'optimisation appropriée, il est nécessaire de comprendre le comportement du système en se basant sur les données d'entrée. Ainsi, la modélisation permet de représenter mathématiquement les processus techniques. L'objectif est d'analyser de manière théorique le comportement de certains paramètres et de les optimiser en fonction des contraintes établies. Ainsi, il est essentiel de représenter le système énergétique hybride (photovoltaïque-éolien-batteries) afin de mettre en relation directe l'énergie générée par le système avec la demande de la charge.

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre traitera de la modélisation de la puissance du système hybride photovoltaïque-éolien-batterie. Ensuite, nous aborderons les modèles de dimensionnement optimal de ce système hybride.

### III.2 Modélisation du générateur photovoltaïque:

Un système photovoltaïque est un appareil non-linéaire dont le fonctionnement peut être expliqué par sa relation entre le courant et la tension  $I - V$ , ainsi que par son circuit électrique correspondant. Différents schémas mathématiques ont été créés pour décrire le fonctionnement d'un système photovoltaïque [51].

Par ailleurs, les résultats d'un module photovoltaïque varient en fonction des caractéristiques physiques du matériau de la cellule photovoltaïque, de sa température et de l'exposition à l'éclairage solaire. D'un point de vue technique, les performances d'un générateur photovoltaïque sont d'autant plus élevées que sa puissance maximale de sortie est plus importante.

Dans cette étude, nous employons un modèle mathématique simple afin d'évaluer la puissance de sortie des modules photovoltaïques. Nous utilisons les informations du rayonnement solaire disponible sur une surface inclinée, de la température ambiante, ainsi que des données du fabricant des modules photovoltaïques pour la calculer. De cette manière, on peut calculer la puissance instantanée générée par un générateur photovoltaïque  $P_{PV}$  en utilisant l'expression suivante [52]:

$$P_{PV}(t) = \eta_{gpv} N A_{gpv} G_i(t) \quad (\text{III.12})$$

où  $\eta_{gpv}$  le rendement instantané du générateur photovoltaïque,  $A_{gpv}$ , est calculée en fonction de la surface d'un module unique utilisé dans un système.  $m^2$ ,  $G_i(t)$  l'éclairement global incident

sur un plan incliné (mesuré en  $W/m^2$ ) et  $N$  le nombre de modules.

Le générateur photovoltaïque est supposé être géré par une commande MPPT qui permet d'optimiser la puissance extraite. De plus, il est supposé que toutes les pertes d'énergie dans le générateur photovoltaïque, telles que les pertes de connexion, les pertes de câblage et les autres pertes, sont nulles.

L'équation suivante donne le rendement instantané  $\eta_{gpv}$  du générateur photovoltaïque. [53]:

$$\eta_{gpv} = \eta_r \eta_{cp} [1 - \beta_t (T_c - T_{c,réf})] \quad (\text{III.13})$$

où  $\eta_r$  est le rendement de référence du générateur photovoltaïque,  $\eta_{cp}$  est le rendement de conditionnement de puissance (power conditioning efficiency) qui est égal à 1 si un suiveur du point de puissance maximale parfait est utilisé,  $T_c$  la température de la cellule photovoltaïque (en  $C$ ),  $T_{c,réf}$  la température de référence de la cellule photovoltaïque et  $\beta_t$  le coefficient de rendement en température (generator efficiency temperature coefficient), allant de 0,004 à 0,006 par  $C$  pour les cellules à base de silicium.

Sur la base du bilan énergétique proposé par Duffie et al. [10], la température de la cellule photovoltaïque peut être exprimée comme suit :

$$T_c = T_a + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) G_i(t) \quad (\text{III.14})$$

où  $T_a$  est la température ambiante ( $C$ ),  $NOCT$  la température nominale de fonctionnement des cellules (NOCT pour Nominal Operating Cell Temperature en anglais).

Notons que  $\eta_r$ ,  $\eta_{cp}$ ,  $\beta_t$ ,  $NOCT$  et  $A_m$  sont des paramètres qui dépendent du type de module photovoltaïque, et qui sont donnés par le constructeur des modules.

### III.3 - Courbe de puissance d'un générateur éolien:

La littérature a employé différentes méthodes pour représenter la courbe de puissance des éoliennes (voir figure). III.1). En effet, la puissance électrique  $P_{éol}(V)$  délivrée par une éolienne en fonction de la vitesse du vent  $V$  peut être exprimée comme [54]

$$P_{éol}(V) = \begin{cases} 0 & V < V_{dém} \\ Q(V) & V_{dém} \leq V < V_n \\ P_n & V_n \leq V \leq V_{max} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

où  $V_{dém}$  est la vitesse de démarrage de l'éolienne,  $V_n$  vitesse du vent pour laquelle l'éolienne

délivre une puissance nominale  $P_n$ ,  $V_{\max}$  vitesse maximale du vent au delà de laquelle il serait dangereux pour l'éolienne de s'exposer au vent (l'éolienne doit être mise en drapeau) et  $Q(V)$  une relation prédéfinie entre la puissance de sortie et la vitesse du vent.

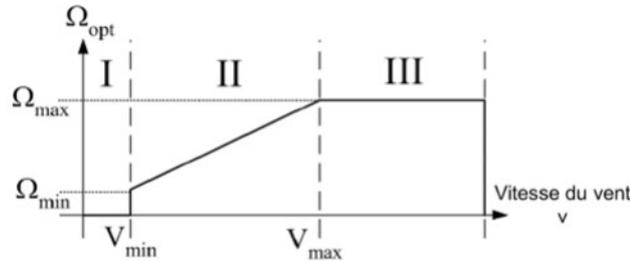


Figure III.1: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

Effectivement, il est possible d'approcher la relation  $Q(V)$  en utilisant différentes fonctions, telles que des expressions polynomiales et autres non polynomiales. Le tableau présente les équations qui régissent les diverses approximations de la courbe de puissance. (III.1).

Modèle	Expressions de Q	Paramètres
Linéaire[10 11]	$Q(v) = P_n \frac{V - V_{\text{dém}}}{V_n - V_{\text{dém}}}$	-
Quadratique[12 14]	$Q(v) = P_n \left( \frac{V - V_{\text{dém}}}{V_n - V_{\text{dém}}} \right)^2$	-
Basé sur la distribution de Weibull[1]	$Q(v) = a + bV^k$	$a = \frac{P_n V_{\text{dém}}^k}{V_{\text{dém}}^k - V_n^k}$ $b = \frac{P_n}{V_{\text{dém}}^k - V_n^k}$

Table III.1: Équations régissant les différentes approximations pour la puissance éolienne.

1. En se basant sur le modèle le plus simplifié de la courbe linéaire, la région (2) de la courbe de puissance (voir figure) (III.1)) est représentée comme une ligne rectiligne. Ce comportement est employé dans de multiples domaines.
2. La partie non linéaire de la courbe où  $q(V)$  est approximée par une équation quadratique est utilisée dans le modèle quadratique pour décrire la relation entre la puissance de sortie de l'éolienne et la vitesse du vent.
3. Une méthode basée sur la distribution de Weibull est suggéré de définir des paramètres pour calculer la puissance de l'éolienne. Comme d'autres modèles, il y a aussi des

problèmes de précision, car plusieurs éoliennes ont des courbes de puissance différentes, selon leur conception et leur puissance nominale propre. Ainsi, il est impossible de reproduire avec précision les performances de toutes les éoliennes à l'aide d'un ensemble d'équations généralisées.

Dans notre travail, nous utilisons le modèle linéaire pour la puissance en fonction de la vitesse du vent, à savoir:

$$P_{\text{éol}}(V) = \begin{cases} 0 & V < V_{\text{dém}} \\ P_n \frac{V - V_{\text{dém}}}{V_n - V_{\text{dém}}} & V_{\text{dém}} \leq V < V_n \\ P_n & V_n \leq V \leq V_{\text{max}} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

### III.4 Modélisation du système de stockage par les batteries:

L'état de charge de la batterie est influencé par le modèle mathématique suivant : l'état de charge précédent, l'énergie générée par l'éolienne  $E_{\text{éol}}$ , l'énergie générée par le générateur photovoltaïque  $E_{pv}$  et l'énergie requise par la charge  $E_{ch}$ . Il est possible de calculer l'état de charge des batteries à un moment donné en utilisant deux scénarios [55, 51]:

#### III.4.1 Premier scénario:

Dans le cas où  $P_{\text{éol}}(t) \geq P_{ch}(t)$ , les batteries commencent à être chargées, et la capacité de stockage instantanée  $C_{bat}(t)$  (mesurée en  $Wh$ ) (EDC pour état de charge) est donnée par:

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + [P_{pv}(t) + (P_{\text{éol}}(t) - P_{ch}(t))\eta_{cad}] \eta_{cha} \Delta t \quad (\text{III.17})$$

et où  $P_{pv}(t)$  est la puissance produite par le générateur photovoltaïque à l'instant  $t$ ,  $P_{\text{éol}}(t)$  la puissance produite par l'éolienne à l'instant  $t$ ,  $P_{ch}(t)$  la puissance produite par la charge à l'instant  $t$ ,  $\Delta t$  et l'intervalle de mesure temporel (ici 1 heure),  $\eta_{ond}$  le rendement de l'onduleur et  $\eta_{cha}$  le rendement de charge des batteries.

#### III.4.2 Deuxième scénario :

Dans le cas  $E_{\text{éol}}(t) \leq E_{ch}(t)$ , deux possibilités se présentent:

1. Si  $P_{pv}(t) \geq (P_{\text{éol}}(t) - P_{ch}(t))/\eta_{ond}$ , le processus de décharge des batteries se déclenche,

lequel est caractérisé par la relation suivante:

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + \left( P_{pv}(t) - \frac{P_{éol}(t) - P_{ch}(t)}{\eta_{ond}} \right) \Delta_t \eta_{cha} \quad (\text{III.18})$$

2. Si  $P_{pv}(t) \leq (P_{éol}(t) - P_{ch}(t))/\eta_{ond}$ , dans cet état, nous avons un processus de décharge des batteries, qui est caractérisé par la relation suivante :

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + \left( P_{pv}(t) - \frac{P_{éol}(t) - P_{ch}(t)}{\eta_{ond}} \right) \frac{\Delta_t}{\eta_{déch}} \quad (\text{III.19})$$

où  $\eta_{déch}$  est le rendement de décharge des batteries.

### III.4.3 Limites de l'état de chargement des batteries:

Dans tous les cas envisageables, il est nécessaire que l'état de charge des batteries réponde à la condition suivante :

$$C_{bat,min} \leq C_{bat}(t) \leq C_{bat,max} \quad (\text{III.20})$$

où  $EDC_{bat,max}$  est l'état de charge maximum des batteries et  $EDC_{bat,min}$  l'état de charge minimum des batteries donné par

$$C_{bat,min} = DOD \times C_{bat-n} \quad (\text{III.21})$$

avec  $C_{bat,n}$  l'état de charge nominal des batteries et  $DOD$  la profondeur de décharge des batteries (DOD de l'anglais Depth of discharge)

### III.4.4 Détermination de la capacité nominale du système de stockage :

La capacité d'énergie des batteries  $Wh$  est principalement influencée par le nombre de jours d'autonomie  $N_{ja}$ , l'énergie générée quotidiennement par les générateurs à énergies renouvelables sans système de stockage, et la consommation énergétique quotidienne par la charge.

La différence entre l'énergie demandée par la charge et l'énergie produite par les générateurs à énergies renouvelables est calculée pour chaque jour de l'année.

$$E_d(t) = E_{ch}(t) - E_p(t) \quad (\text{III.22})$$

avec

$$E_p(t) = E_{éol}(t) + E_{pv}(t) \quad (\text{III.23})$$

Cela nous donnera la possibilité de calculer la disparité d'énergie en une journée (déficit quotidien) pour tous les jours de l'année.

$$E_{dj}(t) = \sum_{t=1}^{24} E_d(t), \quad \text{si } E_d(t) \geq 0 \quad (\text{III.24})$$

Ensuite, pour déterminer la capacité nominale, nous tenons compte du déficit journalier  $E_{dj}$  maximum sur une année, selon l'expression suivante:

$$C_{bat,n} = \frac{N_{ja} \max E_{dj}(j)}{\eta_{déch}} \quad (\text{III.25})$$

### III.5 Méthode de dimensionnement du système hybride:

Le but principal de cette étude consiste à déterminer la configuration idéale de la centrale hybride éolienne, photovoltaïque et stockage pour répondre aux besoins de puissance de la charge sélectionnée. En ce qui concerne l'analyse technique, différentes méthodes sont employées afin de procéder à la configuration optimale des systèmes hybrides. La méthode du moindre carré (least-square) est l'une de ces méthodes numériques. method)[56, 57], la méthode du compromis (trade-off, en anglais) [58, 59] et la méthode technique appelée LPSP [10, 60, 61, 62, 63].

Nous utilisons une méthode basée sur une analyse technico-économique pour dimensionner et évaluer notre système hybride photovoltaïque/éolien avec système de stockage, qui se déroule en deux étapes. Tout d'abord, nous allons utiliser la méthode connue sous le nom de LPSP (en anglais *Loss of Power Supply Probability*), qui, comme son nom l'indique, utilise le calcul d'un paramètre spécifique pour le système hybride afin de mesurer la probabilité de perte d'approvisionnement en puissance du système. Le calcul nous fournira les triplets de configurations de puissances nominales photovoltaïques et éoliennes, ainsi que le nombre de batteries, afin de déterminer la valeur souhaitée de LPSP ( $P_{PV_n}, P_{éol_n}, N_{bat}$ ). Ensuite, en se basant sur les configurations obtenues pour un LPSP spécifique, nous adoptons une approche économique qui nous permettra de déterminer la configuration la plus rentable (la moins coûteuse en termes d'achat, de maintenance et enfin de renouvellement des équipements).

### III.6 Description de la méthode LPSP:

La méthodologie utilisée peut être résumée dans les phases de fonctionnement du système suivantes:

- **Phase 1:** La charge nécessite une puissance moindre que celle produite par l'aérogénérateur.

( $P_{ch} < P_{éol}$ ). Dans cette situation, les panneaux photovoltaïques transfèrent l'énergie supplémentaire ainsi que l'énergie générée par les panneaux aux batteries grâce à des convertisseurs statiques. On calcule le nouvel état de charge des batteries en utilisant l'équation ( III.17). Si ce dernier dépasse l'état maximal admissible  $C_{bat-max}$ , l'énergie excédentaire sera dirigée vers les charges auxiliaires.

- **Phase 2:** La puissance requise (demandée) par la charge est supérieure à la puissance produite par l'éolienne ( $P_{ch} > P_{éol}$ ). Dans ce cas, le déficit d'énergie ( $P_{ch} - P_{éol}$ ) Le générateur photovoltaïque compense cela. Si ce dernier n'est pas en mesure de satisfaire la demande de charge, ( $P_{pv}(t) < P_{ch}(t) - P_{éol}/\eta_{ond}$ ), les batteries compensent le déficit d'énergie grâce aux batteries. à condition que la limite minimale de l'état de charge ne soit pas dépassée.  $C_{bat} < C_{bat-min}$ , et une nouvelle capacité de batterie est calculée à l'aide de l'équation (III.19).

Dans la phase 2, les générateurs photovoltaïques et éoliens produisent une quantité d'énergie insuffisante pour répondre aux besoins de la charge énergétique au fil du temps. Le déficit énergétique (Loss of Power Supply)  $LPS(t)$  peut être exprimé comme suit:

$$LPS(t) = (P_{ch}(t) - P_{éol}(t))\Delta t - (P_{pv}(t) + C_{bat}(t - 1) - C_{bat-min})\eta_{ond} \quad (III.26)$$

Enfin, on peut définir la probabilité LPSP comme la somme de tous les besoins non comblés "LPS", divisée par l'énergie totale nécessaire à la charge pendant la durée de fonctionnement.  $T$  (Pour cette étude,  $T = 1$  année).

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T P_{ch}(t) \times \Delta t} \quad (III.27)$$

Elle exprime le taux d'insatisfaction des charges.

### III.7 Algorithme de dimensionnement par LPSP:

Pour le besoin de simulation, nous fixons les limites supérieure et inférieure des puissances photovoltaïques et éoliennes:  $P_{pv-inf}$ ,  $P_{pv-sup}$  et  $P_{éol-inf}$ ,  $P_{éol-sup}$ . De plus, nous fixons des pas de variation des puissances nominales photovoltaïque et éolienne  $dP_{pv}$  et  $dP_{éol}$ . Nous devons aussi fixes le nombre de jours d'autonomie  $N_{ja}$  afin de calculer la capacité nominale des vatteries.

Les données d'entrée de cet algorithme sont:

- l'éclairage solaire sur un plan incliné.
- les valeurs moyennes de la température ambiante.
- la vitesse du vent pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année.
- la valeur de la 'LPSP' désirée sur une année.
- les paramètres techniques des différents composants du système.

Cet algorithme permet de déterminer un ensemble de configurations pour le système  $(P_{pv}, P_{éol}, N_{bat})$  qui satisfait la condition sur la 'LPSP'. Seule une analyse économique permet de déterminer le dimensionnement optimal du système hybride. Enfin, l'organigramme de la méthode LPSP est présenté sur la figure (III.2).

### III.8 Modèle économique:

La performance financière des systèmes d'alimentation électrique décentralisés basés sur les énergies renouvelables est souvent évaluée à l'aide de l'indicateur *LCE* [61], lequel est défini comme le rapport entre le coût annualisé total du système et l'énergie électrique annuelle fournie[61]:

$$LCE = \frac{PVC \times CRF}{E_{tot}} \quad (III.28)$$

où *PVC*, *CRF* et  $E_{tot}$  représentent, respectivement, la valeur actuelle des coûts (present value of costs, en anglais), le facteur de récupération des capitaux (capital recovery factor, en anglais) et de l'énergie totale fournie par année par les générateurs photovoltaïques et éoliens. Pour un taux de réduction donné, *d*, et la durée de vie utile, *T*, le *CRF* est défini comme [61]:

$$CRF = \frac{d(1+d)^T}{(1+d)^T - 1} \quad (III.29)$$

La valeur actuelle des coûts (*PVC*) peut être calculée comme suit:[61]

$$PVC = IC + C_m + RC \quad (III.30)$$

où *IC* est le coût initial (initial cost),  $C_m$  la valeur actuelle de la maintenance (maintenance costs) et *RC* est la valeur actuelle du remplacement des pièces et des frais d'installation (replacement costs).

Le montant initial du système comprend les frais des éléments (générateur éolien avec tour et contrôleur, générateur photovoltaïque, banque de batterie, invertisseur), les frais de construction, l'installation et les câbles de connexion. Les travaux civils et les frais d'installation sont considérés comme 20% du prix du générateur éolien (turbine + tour + contrôleur) pour la pièce éolienne et 40% du prix d'un générateur PV pour la partie photovoltaïque. Le prix de substitution est principalement influencé par le remplacement de certaines pièces de l'installation. Puisque les générateurs éolien et PV ont une durée de vie similaire à celle du système, il est possible de considérer que leurs coûts de remplacement sont nuls, tandis que les batteries et le convertisseur doivent être remplacés. Le coût de remplacement actuel peut être déterminé comme suit[61]:

$$RC = U_c C_n \sum_{i=1}^{N_{rem}} \left( \frac{1 + g_1}{1 + d} \right)^{\left( \frac{T_i}{N_{rem}} + 1 \right)} \quad (\text{III.31})$$

où  $C_n$  est la capacité/puissance nominale (batterie/convertisseur), (Wh ou W),  $U_c$  est le coût unitaire (\$/Wh), (US\$/W),  $g_1$  est le taux d'inflation des remplacements de composants et  $N_{rem}$  est le nombre de remplaçants de composantes (batterie ou invertisseur) sur  $T$  ans. La valeur actuelle des coûts de maintenance (25 ans d'entretien) du système hybride est exprimée comme[61]:

$$C_m = C_{m0} \left[ \frac{1 + i}{d - i} \left( 1 - \left( \frac{1 + i}{1 + d} \right)^T \right) \right] \quad (\text{III.32})$$

Dans cette formule,  $i$  représente le taux d'inflation des opérations,  $d$  le pourcentage d'intérêt et  $T$  la durée de vie du système en années (25 ans). Le  $C_{m0}$  correspond au coût de maintenance pendant la première année. Ce prix est représenté par une partie du prix de la composante. Dans cette étude, on estime que le coût de maintenance du générateur photovoltaïque et du convertisseur représente 1 % du coût d'achat, tandis que le coût de maintenance de l'éolien représente 3 %. Le coût annuel de maintenance pour le stockage des batteries est considéré comme nul. Le taux de diminution annuel est estimé à 8%.

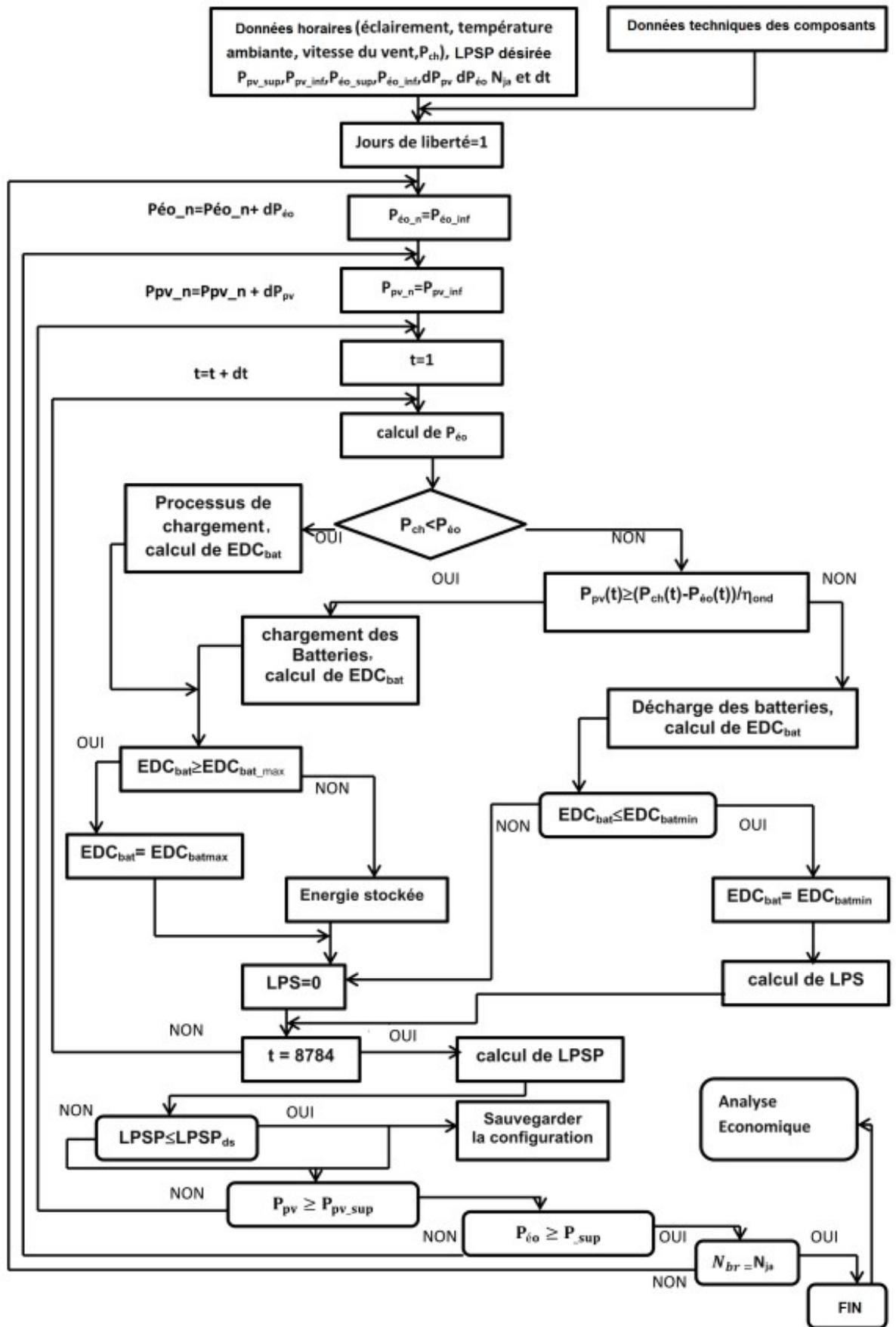


Figure III.2: Organigramme global de l'algorithme de dimensionnement [10]

### III.9 Tableau d'entraînement des réseaux de neurones:

Selon l'organigramme de la figure III.2, le système de gestion de l'énergie fait deux tests de comparaison entre différents types d'énergie, à savoir  $P_{ch} \leq P_{éol}$  et  $P_{pv} \leq (P_{ch} - P_{éol})/\eta_{ond}$  où  $P_{ch}$  est la puissance de la charge,  $P_{éol}$  la puissance éolienne et  $P_{pv}$  la puissance photovoltaïque. Ces deux tests se font chaque heure pendant une année. Selon les résultats de ces tests le système donne l'ordre aux batteries de se charger ou de se décharger selon des équations définies ci-dessus. C'est précisément à ce niveau que nous faisons intervenir la technique de réseaux de neurones artificiels. Pour cela, on dresse un tableau (voir figure III.2) avec deux colonnes d'entrée (inputs) pour les différents cas de tests sur les puissances, avec 0 lorsque l'inégalité n'est pas vérifiée et 1 dans le cas contraire. Chaque cas correspond à un mode auquel correspond une action de charge ou de décharge des batteries. Ainsi, si le mode est égal à -1, les batteries se déchargeront selon l'équation III.19, alors que si le mode est égal à 1 celles-ci se déchargeront selon l'équation III.18. D'autre part, si le mode est égal à 2, les batteries se chargeront selon l'équation III.17.

$P_{ch} < P_{éol}$	$P_{pv} \geq \frac{P_{ch}-P_{éol}}{\eta_{ond}}$	Mode	Action
0	0	-1	décharge selon équation III.19
0	1	1	décharge selon équation III.18
1	0	2	charge selon équation III.17
1	1	2	charge selon équation III.17

Table III.2: Tableau d'entraînement pour les puissances

Après que ces actions de charge et de décharge soient accomplies, nous devons tester l'état de charge des batteries afin de s'assurer à chaque fois que la charge des batteries ne dépassera pas une valeur maximum, telle que  $EDC_{bat} \leq EDC_{batmax}$  et que la décharge des batteries ne passera pas en dessous d'une valeur minimum, telle que  $EDC_{bat} \geq EDC_{batmin}$ . Selon la technique LPSP, une fois que les batteries atteignent la valeur minimum de l'état de décharge, une valeur de LPS est calculée, signe que le système énergétique souffre d'une insuffisance à alimenter la charge pendant cette heure. Nous dressons donc un tableau avec deux colonnes (voir figure III.3) pour les deux tests de l'état de charge (inputs), une colonne pour la variable LPS et une autre pour l'ordre donné. En effet, si  $EDC_{bat} \leq EDC_{batmax}$ , LPS prend la valeur de 1; ce qui correspond à un ordre de calculer LPS selon l'équation III.26. Le système ne pouvant pas tolérer que l'état de charge passe au dessous d'une valeur minimum, il égalisera celle-ci à sa valeur minimum et empêchera les batteries de se décharger davantage. Par contre, si l'état de charge est entre sa valeur minimum et sa valeur maximum, LPS prend une valeur nulle; ce qui

correspond réellement à sa valeur et l'ordre est donné pour le calcul de l'état de charge selon les équations données ci-dessus. Dans le cas où l'état de charge atteint sa valeur maximum,  $LPS$  prend une valeur nulle et le système égalisera  $EDC_{bat}$  à sa valeur maximum. Les batteries ne se chargeront plus.

$EDC_{bat} < EDC_{bat\_min}$	$EDC_{bat} > EDC_{bat\_max}$	LPS	Action	ordre	Action
1	0	1	calcul de LPS	-1	$EDC_{bat} = EDC_{bat\_min}$
0	1	0	LPS=0	1	$EDC_{bat} = EDC_{bat\_max}$
0	0	0	LPS=0	0	Calcul de $EDC_{bat}$

Table III.3: Tableau d'entraînement pour capacité du batterie

Le nombre d'échantillons d'entraînement du modèle de réseaux de neurones étant très petit (4 échantillons pour le tableau des puissances et 3 échantillons pour le tableau de l'état de charge), les valeurs de sortie que nous a données le modèle ne correspondaient pas aux valeurs désirées. Pour remédier à cela, nous avons dupliqué les tableaux dix fois; ce qui a amélioré nettement les résultats des sorties: le modèle nous a donné des valeurs exactes.

### III.10 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons examiné les modèles mathématiques utilisés pour représenter les puissances générées par un générateur photovoltaïque et un générateur éolien, ainsi que l'état de charge des batteries dans un système hybride alimentant une charge électrique. Nous avons aussi passé en revue la technique LPSP qui a pour objectif de quantifier le degré de fiabilité du système énergétique à alimenter une charge électrique. Après, nous avons détaillé les expressions mathématiques du modèle économique. La procédure d'entraînement du modèle de réseaux de neurones est explicité en fin du chapitre.

# Chapitre 04 : Résultats et discussion

## IV.1 Introduction:

Après avoir exposé dans le chapitre précédent les modèles mathématiques utilisés pour la simulation des systèmes photovoltaïque et éolien ainsi que le stockage des batteries, et exposé la technique LPSP, nous dédions ce chapitre aux résultats obtenus à l'aide d'un code de programmation sur Matlab. Nous commencerons donc ce chapitre par exposer les résultats de l'utilisation des réseaux de neurones artificiels

## IV.2 Résultats de l'application de l'algorithme des réseaux de neurones:

La figure IV.1 montre que nous avons choisi l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour l'entraînement du réseau de neurones sur Matlab. La figure montre aussi le nombre d'échantillons utilisés pour l'entraînement, à savoir 32. Quatre échantillons sont laissés pour la validation et quatre autres pour le test. On peut constater sur la même figure que l'erreur quadratique pour les trois procédures est nulle. Aussi, le paramètre  $R$  qui mesure la corrélation entre les sorties et les valeurs cibles est égal à l'unité, ce qui indique une corrélation parfaite.

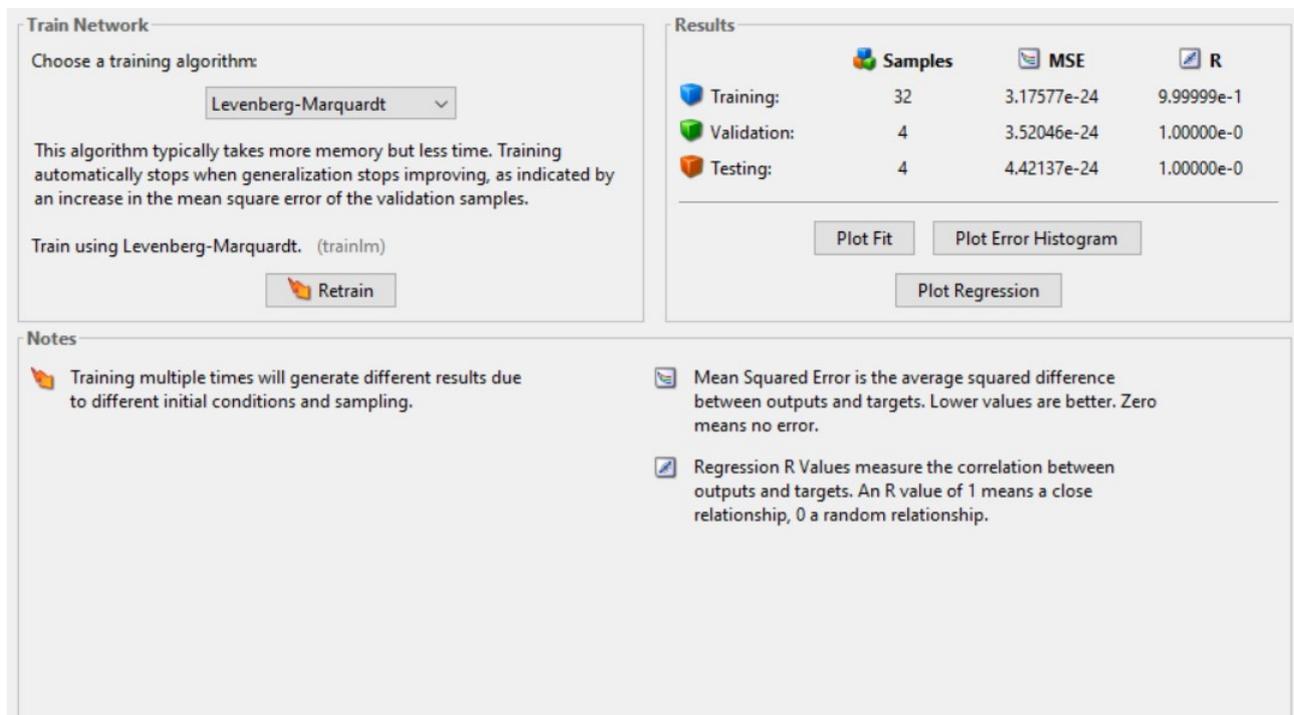


Figure IV.1: Résultats de l'application de l'algorithme des réseaux de neurones à notre système

Les figures IV.2 et IV.3 montre une parfaite convergence des sorties vers les valeurs cibles des deux tableaux utilisées dans l'étude; à savoir le tableau de tests des puissances et celui des

tests des états de charges des batteries. Ces résultats sont obtenus par la duplication de 10 fois de ces tableaux.

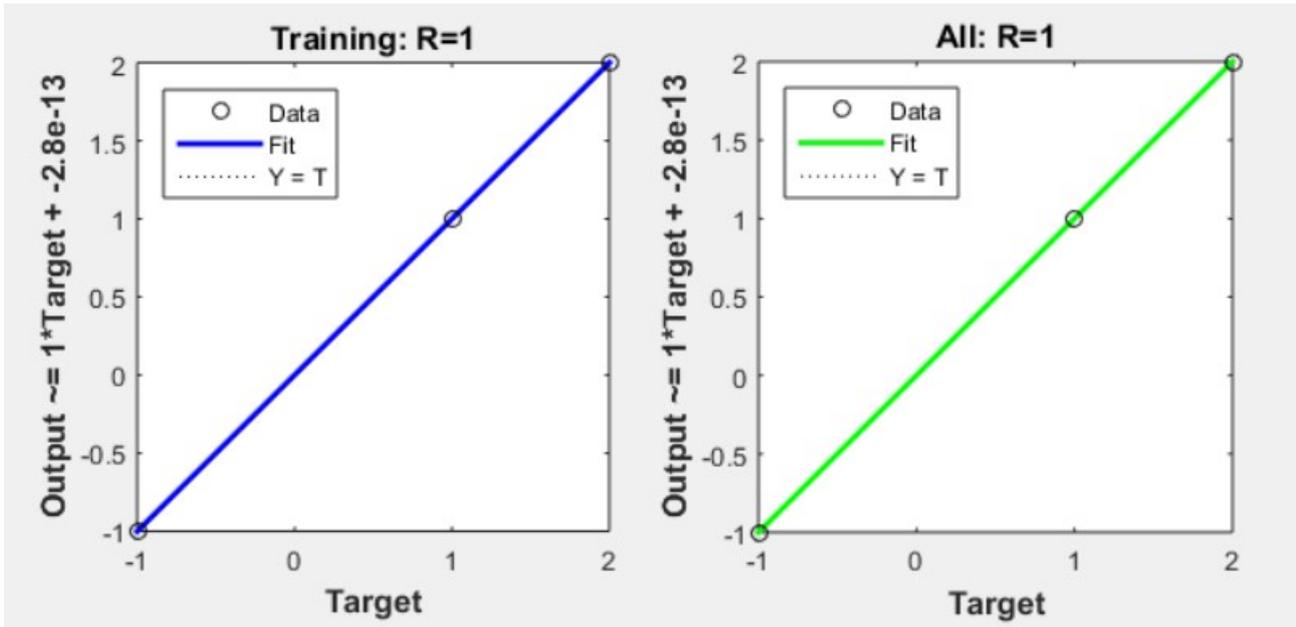


Figure IV.2: Courbe de test pour le tableau de puissances

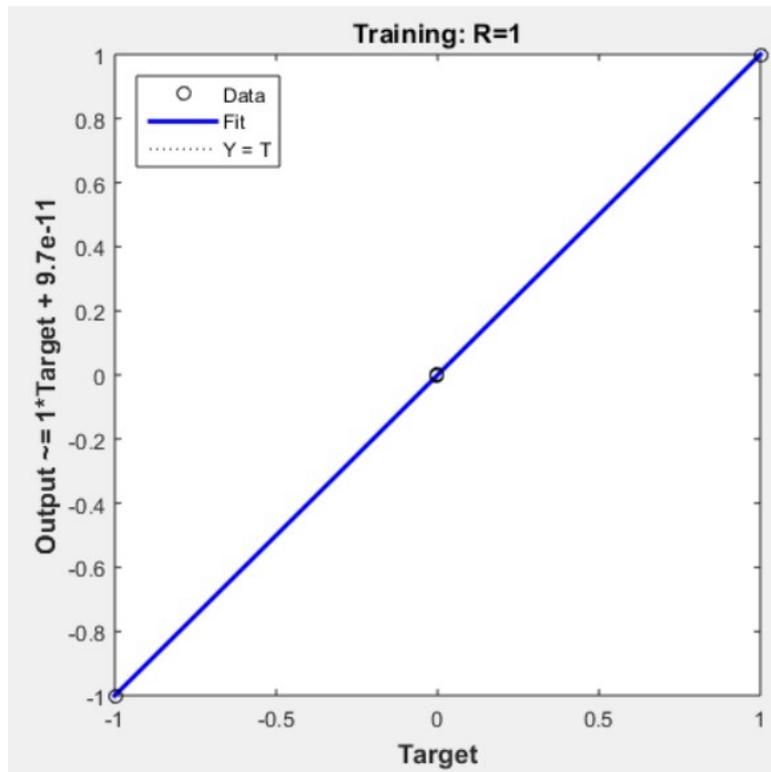


Figure IV.3: Courbe de test pour le tableau des capacités

La figure IV.4 montre l'architecture du réseau de neurones utilisé dans notre étude. La figure montre que le nombre de couches cachées est de 10 et qu'une seule couche pour le output est utilisée.

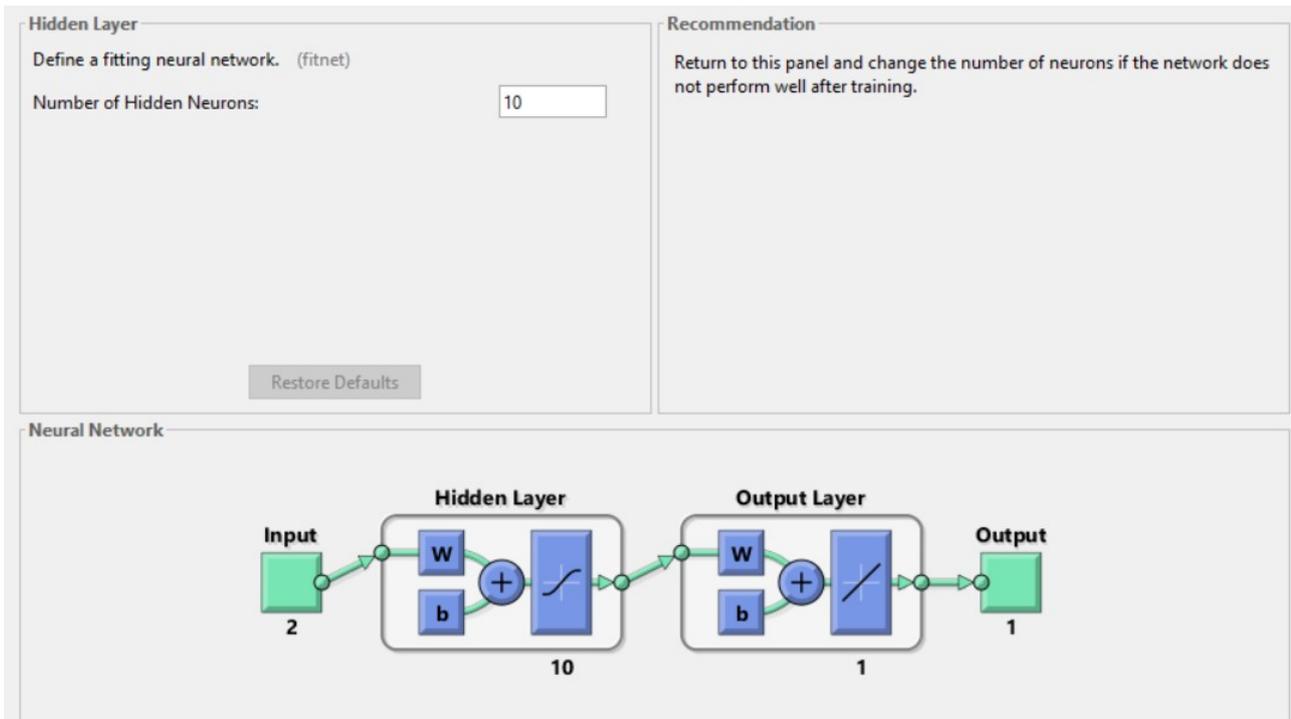


Figure IV.4: Architecture ANN utilisée dans notre étude

### IV.3 Données météorologiques des deux sites et profil de la charge à alimenter:

Nous avons choisi deux sites spécifiques pour notre étude, à savoir Tlemcen (plateau de Lalla Seti) et Adrar (tous deux situés en Algérie) dont les coordonnées météorologiques sont données dans le tableau IV.1.

Site	Longitude	Latitude	Altitude
Tlemcen	-1.317° E	34.882° N	800 m
Adrar	-1.368° E	26.406° N	279 m

Table IV.1: Données géographiques pour les sites sélectionnés

Dans le cadre de cette étude de dimensionnement nous avons utilisé les données météorologiques d'une année (366 jours) allant du 1er février 2004 au 31 janvier 2005 pour les deux sites choisis. La variation de l'éclairement ( $W/m^2$ ) à intervalle d'une heure est représentée dans la figure IV.5 sur les sites de Tlemcen (à gauche) et d'Adrar (à droite). De plus, la figure IV.6 montre la variation de la température ambiante ( $^{\circ}C$ ) à intervalles d'une heure. De plus, la figure IV.7 présente la variation de la vitesse du vent à 10 m d'altitude du sol à intervalles d'une heure sur les deux sites. Sur la figure IV.8, on peut observer le profil de la charge électrique quotidienne (la même pour les deux sites) utilisée dans cette étude. La charge électrique est liée à une unité administrative d'une entreprise algérienne située dans la région de Tlemcen.

Le profil de charge repose principalement sur la consommation d'électricité de l'unité pendant la journée et sur l'irrigation et l'éclairage pendant la nuit. Une activité importante de la charge est observée de 9h à 16h, avec un pic de consommation vers 11h. Il convient de souligner que l'éclairage, la température et la vitesse du vent sont supposés stables durant une heure. Les mesures des grandeurs (éclairage, température et vitesse du vent) indiquent que le site d'Adrar est plus chaud et plus venté.

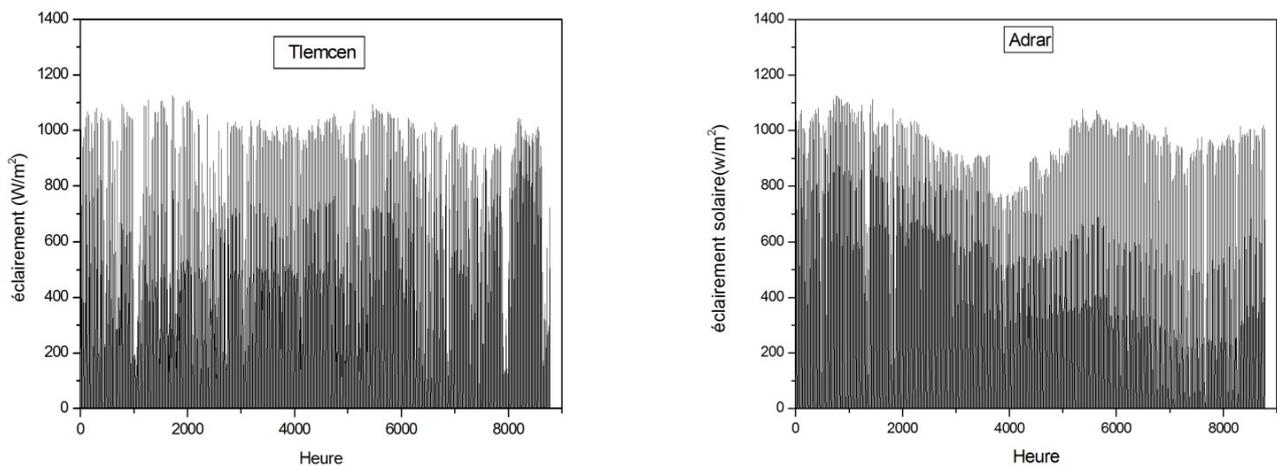


Figure IV.5: Profils de l'éclairement solaire sur les deux sites sélectionnés: Tlemcen (Plateau Lalla Setti) (à gauche) et Adrar (à droite) pour une année (1 février 2004-31 janvier 2005)

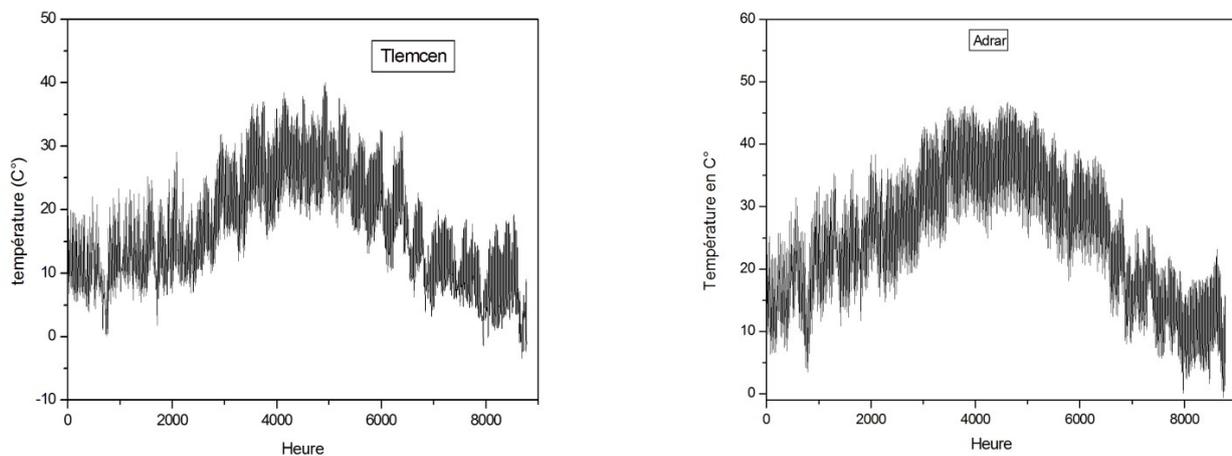


Figure IV.6: Profil de la température ambiante sur les deux sites sélectionnés: Tlemcen (Plateau Lalla Setti) (à gauche) et d'Adrar (à droite) pour une année (1 février 2004-31 janvier 2005)

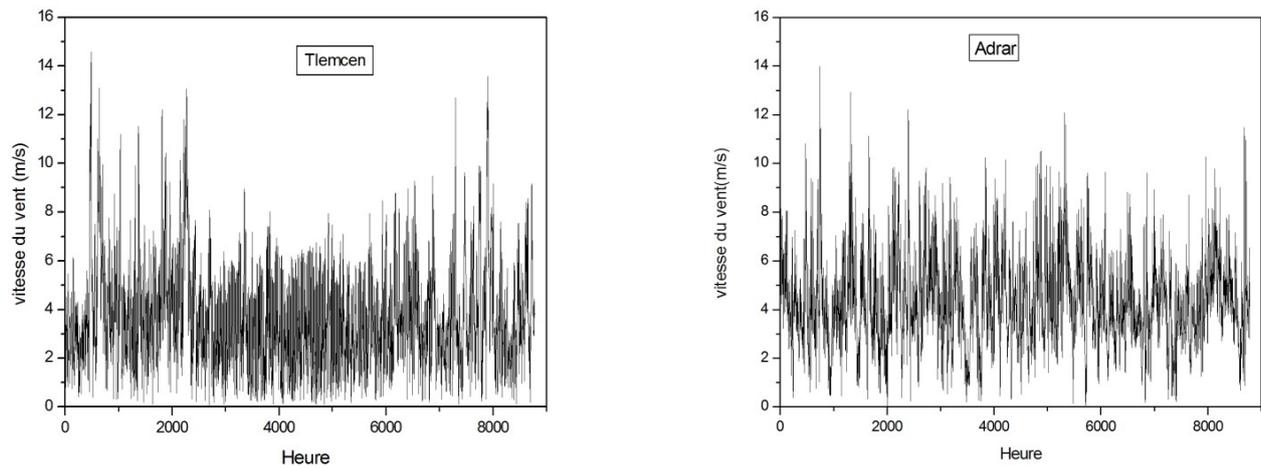


Figure IV.7: Profil de la vitesse du vent sur les deux sites sélectionnés: Tlemcen (Plateau Lalla Setti) (à gauche) et d'Adrar (à droite) pour une année (1 février 2004-31 janvier 2005)

#### IV.4 Paramètres physiques, techniques et économiques du système hybride:

Les valeurs numériques des différents paramètres physiques utilisés dans la modélisation du générateur photovoltaïque sont présentées dans le tableau IV.2.

Paramètres	Désignation	Valeur
$\eta_r$	Rendement référence du module	0.182
$\eta_{PC}$	Rendement de conditionnement de la puissance	1
$\beta_t$	Coefficient de rendement pour température par $^{\circ}C$	0.005
$T_{c,ref}$	Température de référence d'une cellule	$25^{\circ}C$
NOCT	Température nominale de fonctionnement d'une cellule	$45^{\circ}C$

Table IV.2: Paramètres physiques pour la modélisation du générateur photovoltaïque [64]

Le tableau IV.3 présente les valeurs numériques des différents paramètres physiques utilisés dans la modélisation du générateur éolien.

Paramètres	Désignation	Valeur
$V_{dem}$	la vitesse de démarrage	3 ms
$V_n$	la vitesse nominale	10 ms
$V_{max}$	vitesse maximale	25 ms

Table IV.3: Paramètres physiques pour la modélisation du générateur éolienne

Dans le tableau IV.4, nous présentons les valeurs numériques des différents paramètres physiques employés pour représenter l'état de charge des batteries ainsi que la puissance apparente de l'onduleur et son rendement.

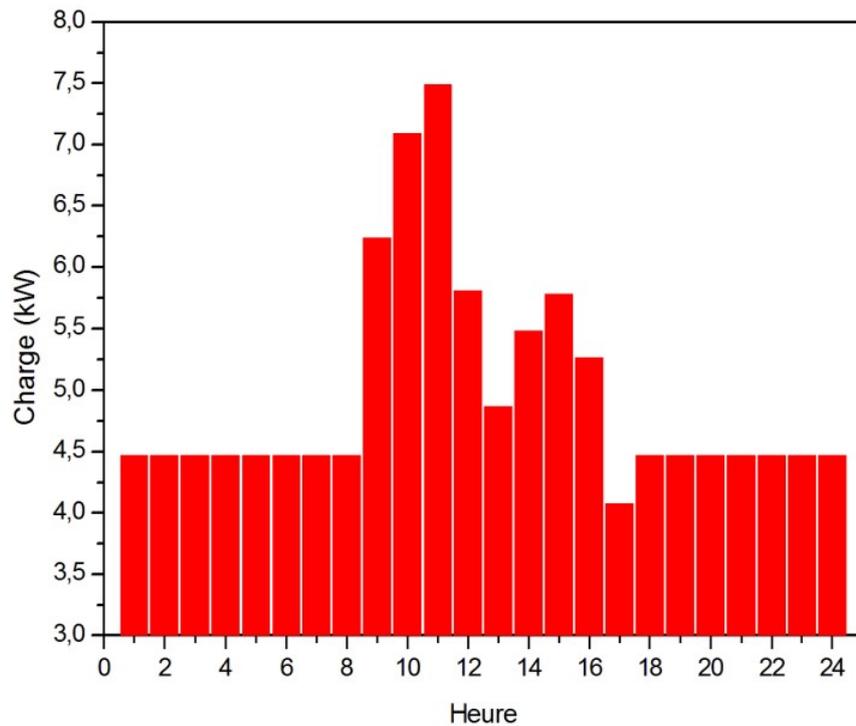


Figure IV.8: Profil de la charge

Paramètres	Désignation	Valeur
$\eta_{ond}$	Rendement de l'onduleur	0.95 [65]
$S_{ond}$	Puissance apparente de l'onduleur	8000 VA [65]
$\eta_{ch}$	Rendement de charge de batteries	0.9 [64]
$\eta_{déch}$	Rendement de décharge de batteries	1 [64]

Table IV.4: Paramètres physiques pour la modélisation de l'état de charge du batteries et la puissance apparente de l'onduleur

Dans le tableau IV.5 nous présentons les caractéristiques des panneaux choisis ainsi que celles des batteries.

Paramètres	Désignation	Valeur
$P_{pv}/S$	Puissance photovoltaïque crête du module par unité de surface	300W/m <sup>2</sup>
$V_{bat}$	Tension du batteries	24 V [64]
$Ah_{bat}$	Capacité de batteries	200 Ah [64]

Table IV.5: Paramètres techniques des composants du système.

Avant de passer en revue les résultats obtenus, il est utile à ce stade d'expliquer la procédure suivie pour le dimensionnement de notre système. Tout d'abord, nous calculons la capacité minimale des batteries en fonction des jours d'autonomie  $N_{ja}$  choisis (ici nous avons choisi  $N_{ja} = 1, 3, 5$ ). Ensuite, nous varions la puissance éolienne d'un pas de 5 kW et la surface des panneaux d'un pas de 5 m<sup>2</sup> (2 boucles dans le code), puis nous calculons les puissances produites par les panneaux photovoltaïques et l'éolienne et suivons l'évolution de l'état de

charge des batteries, tout en calculons le paramètre LPSP pour une année complète.

La profondeur de décharge (PDD, DOD (depth of discharge) en anglais) tolérée dans cette étude est de 0,7 et les batteries étaient initialement chargées à 90% de leur charge maximale.

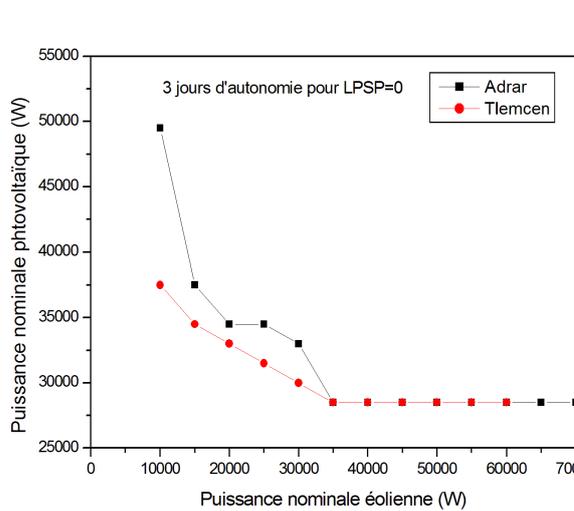


Figure IV.9: Variation de la puissance photovoltaïque nominale pour une puissance éolienne donnée pour une fiabilité totale du système (LP SP = 0.0) pour les deux sites sélectionnés (3 jours d'autonomie).

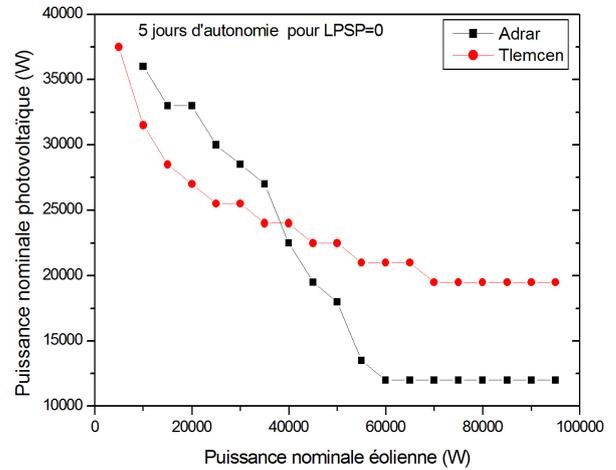


Figure IV.10: Variation de la puissance photovoltaïque nominale pour une puissance éolienne donnée pour une fiabilité totale du système (LP SP = 0.0) pour les deux sites sélectionnés (5 jours d'autonomie)

La figure IV.9 montre la variation de la puissance nominale photovoltaïque en fonction de la puissance éolienne pour trois (03) jours d'autonomie pour les deux sites de Tlemcen et Adrar avec  $LPSP = 0$ . En augmentant la puissance éolienne nominale, on peut réduire la puissance photovoltaïque nominale requise. Cette réduction est plus marquée avec une pente plus élevée de la variation de la puissance photovoltaïque nominale jusqu'à une puissance éolienne nominale de 35 kW. Au-delà de cette valeur, l'augmentation de la puissance éolienne sur la puissance photovoltaïque nominale perd de son effet.

Il est à noter qu'une augmentation de la puissance éolienne nominale au-delà de 40 kW sur le site d'Adrar ne réduit pas significativement la puissance photovoltaïque nominale requise, car cette dernière n'est pas très variable. En revanche, sur le site de Tlemcen, une puissance éolienne supérieure à 30 kW entraîne une diminution du besoin en puissance photovoltaïque nominale.

La figure IV.10, correspondant à une autonomie de 5 jours, montre une tendance similaire à celle pour une autonomie de 3 jours, avec une diminution de la puissance photovoltaïque nécessaire par rapport à la puissance éolienne. De plus, cette diminution est observée en raison de l'augmentation du nombre de batteries pour cette période prolongée. Sur le site de

Tlemcen, si une puissance éolienne dépasse 100 kW, le besoin en puissance photovoltaïque peut être considérablement réduit jusqu'à 20 kW, bien que cette proposition ne soit pas optimale en raison des conditions de vent limitées et des coûts associés à une telle installation. En revanche, sur le site d'Adrar, le besoin en puissance photovoltaïque reste relativement constant malgré l'augmentation de la puissance éolienne.

Il est utile de noter que pour une seule journée d'autonomie, nous n'avons pas pu atteindre une valeur nulle de LPSP; ce qui montre le rôle des batteries dans l'amélioration la fiabilité du système énergétique.

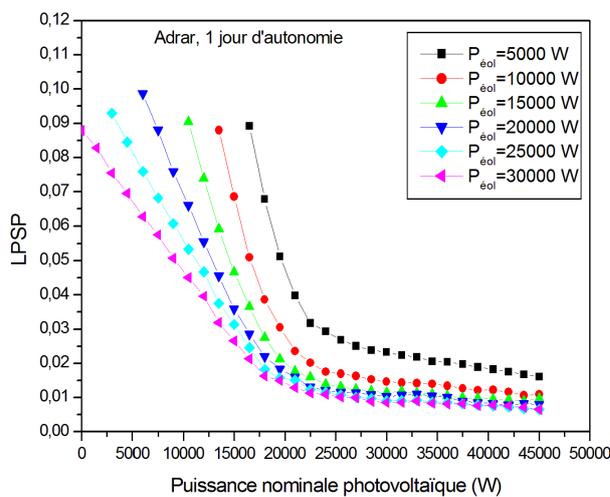


Figure IV.11: Variation LPSP en fonction de la puissance photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour le site de Adrar (1 jours d'autonomie).

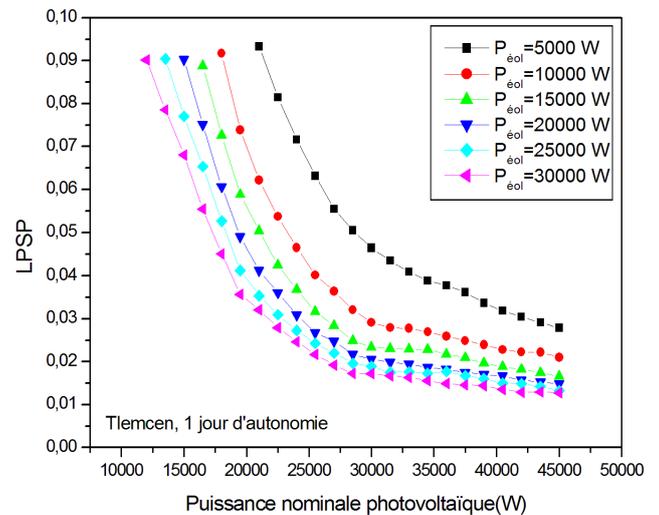


Figure IV.12: Variation LPSP en fonction de de la puissance photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour le site de Tlemcen (1 jours d'autonomie)

Les figures IV.11, IV.12, IV.13 et IV.14 montrent la variation de LPSP en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance nominale éolienne, pour les sites de Tlemcen et Adrar, et ce pour une journée d'autonomie, et 5 jours d'autonomie. Dans les quatre figures onous remarquons une diminution de la valeur de LPSP lorsue les puissance photovoltaïque et éolienne augmentent, signe d'une augmentation de la fiabilité du système; sauf que pour une journée d'autonomie sur les deux sites, la valeur de LPSP n'atteint jamais la valeur exacte de zéro. Il est donc impératif pour la même puissance photovotaïque et éolienne d'augmenter la capacité des batteries pour améliorer la fiabilité du système.

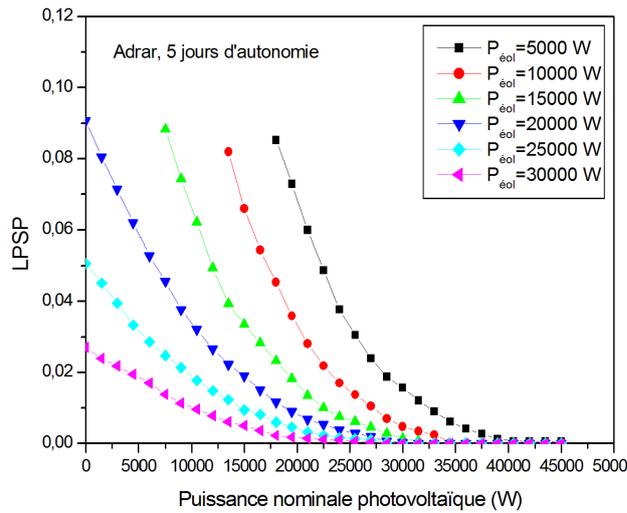


Figure IV.13: Variation LPSP en fonction de la puissance photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour le site de Adrar (5 jours d'autonomie).

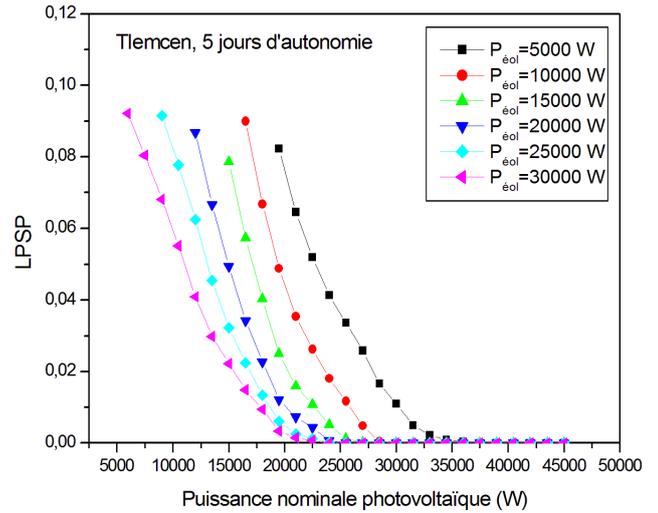


Figure IV.14: Variation LPSP en fonction de la puissance photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour le site de Tlemcen (5 jours d'autonomie).

Les figures IV.15 et IV.16 illustrent la variation du coût en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour les deux sites, pour différentes valeurs de puissance éolienne et pour un LPSP inférieur ou égal à 0.1. Ces courbes montrent qu'il existe un coût minimal pour des puissances photovoltaïque et éolienne donnée. Cela permettra à l'utilisateur de choisir parmi les solutions optimale celle qui correspond à sa situation vis-à-vis de l'obtention du matériel pour son système énergétique.

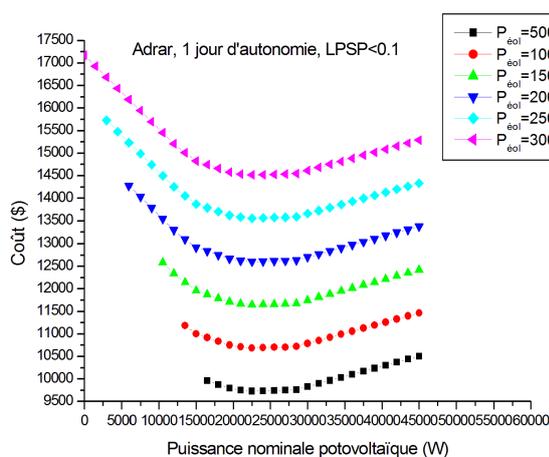


Figure IV.15: Coût en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour différentes valeurs de puissance éolienne pour le site de Adrar (1 jour d'autonomie)

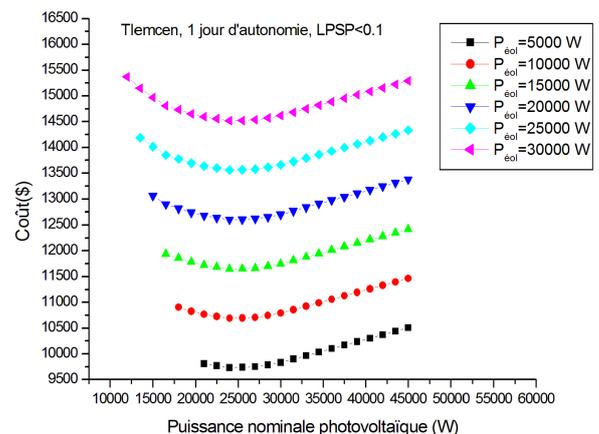


Figure IV.16: Coût en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour le site de Tlemcen (1 jour d'autonomie)

Les figures IV.17 et IV.18 illustrent la variation de l'énergie des batteries en fonction de la puissance nominale photovoltaïque pour trois jours d'autonomie pour les deux sites pour différentes valeurs de la puissance éolienne. L'énergie des batteries est inversement proportionnelle à la puissance photovoltaïque et est la même pour toutes les valeurs de la puissance éolienne, sauf pour une valeur de 5 kW de la puissance éolienne.

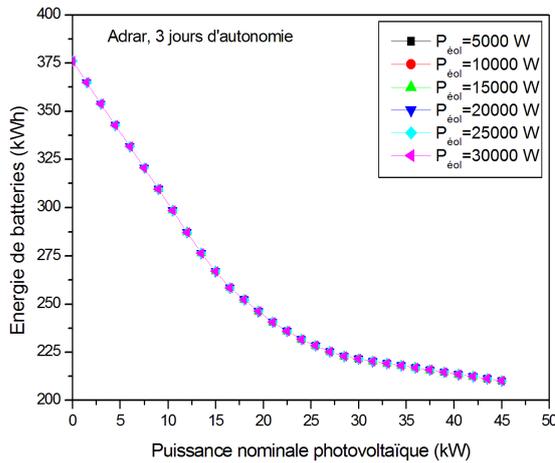


Figure IV.17: Energie des batteries en fonction de la puissance nominale photovoltaïque dans le site de Adrar(3j d'autonomie)

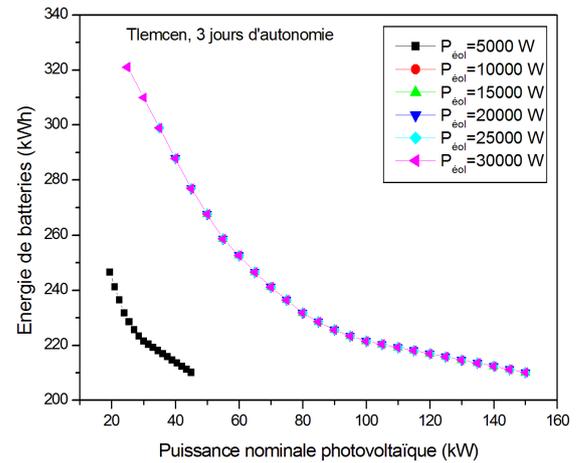


Figure IV.18: Energie des batteries en fonction de la puissance nominale photovoltaïque dans le site de Tlemcen(3j d'autonomie)

Les figures IV.19 et IV.20 illustrent la variation du cout nivelé d'énergie (LCE) en fonction du LPSP pour différentes valeurs de la puissance éolienne pour les deux sites pour un jour d'autonomie. Le cout nivelé augmente avec la valeur de LPSP et est plus prononcé pour de faibles puissances éoliennes; ce qui est évident selon l'expression de LCE.

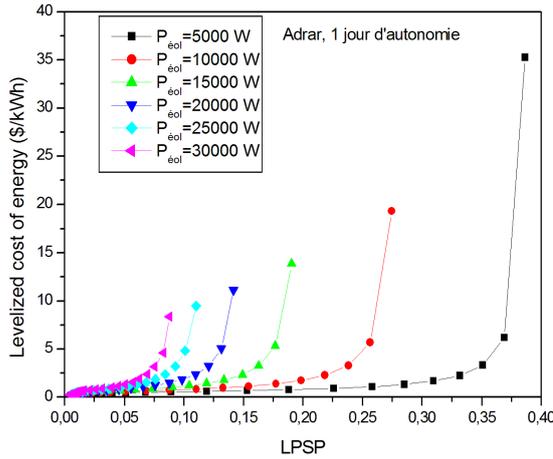


Figure IV.19: LCE en fonction le nombre jour d'autonomie dans le site de Adrar

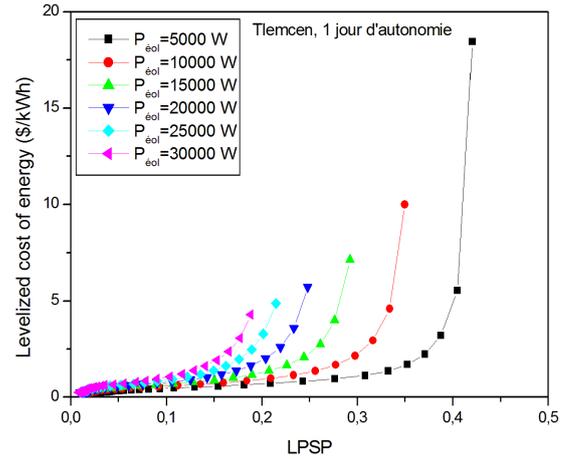


Figure IV.20: LCE en fonction le nombre jour d'autonomie dans le site de Tlemcen

Les figures IV.21 et IV.22 illustrent la variation du cout nivelé d'énergie (LCE) en fonction du nombre de jours d'autonomie pour les deux sites pour trois valeurs de LPSP (0, 0,01 et 0,1). Il est évident que le LCE augmente lorsque le nombre de jours d'autonomie augmente.

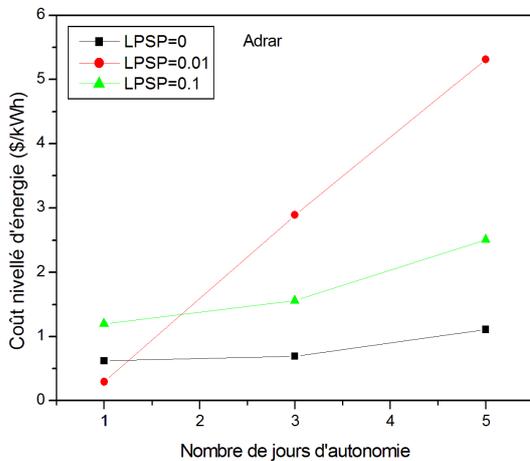


Figure IV.21: LCE en fonction du nombre de jours d'autonomies sur le site de Adrar

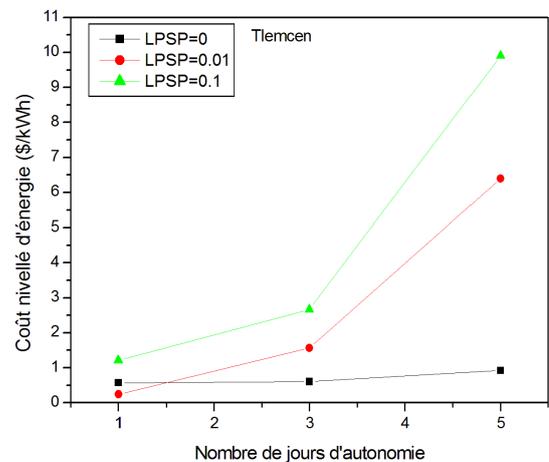


Figure IV.22: LCE en fonction du nombre de jours d'autonomies sur le site de Tlemcen

Le tableau IV.6 illustre pour les deux sites étudiés et pour différents jours d'autonomie les valeurs de la puissance éolienne, de la puissance photovoltaïque et de l'énergie des batteries correspondant au cout le plus bas. Pour chaque coût, la valeur du LPSP correspondant est donnée. Nous observons que le LPSP n'est pas égal à 0; ce qui signifie que le système n'est pas complètement fiable. De ce fait, nous avons établi dans le tableau IV.7 le même schéma des puissances mais cette fois-ci avec un LPSP égal à zéro (pour le cas d'un jour d'autonomie, on

n'a pas pu avoir un LPSP égal à zéro). Nous remarquons que pour avoir une fiabilité totale, le coût a considérablement accru; ce qui est tout fait normal.

Ville	Jour	Peol (kW)	P <sub>PV</sub> (kW)	Ebat (kWh)	LPSP	Coût min (\$)
Tlem	1 ja	5.0	24.0	77.273	0.073	9733.07
Adrar	1 ja	5.0	22.5	78.399	0.032	9732.06
Tlem	3 ja	5.0	45.0	210.142	0.00012	22975.04
Adrar	3 ja	5.0	28.5	222.640	0.00163	22974.1
Tlem	5 ja	5.0	45.0	350.237	0.00000	35443.30
Adrar	5 ja	5.0	45.0	350.281	0.00000	35447.19

Table IV.6: LPSP avec coût minimum

Des résultats précédents nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- **Efficacité et fiabilité** : La fiabilité augmente avec la capacité du système et le nombre de jours couverts, comme le montre la diminution des valeurs de LPSP.
- **Coût** : Le coût du système augmente considérablement avec la capacité de la batterie et la puissance de production, reflétant le besoin de composants supplémentaires et de coûts plus élevés pour assurer une plus grande fiabilité.

## IV.5 Comparaison entre les sites Tlemcen et Adrar

Bien que les systèmes à Adrar nécessitent légèrement moins de puissance de production dans certains cas, la capacité de la batterie et le coût du système sont très proches entre les deux sites.

Tlemcen et Adrar nécessitent des systèmes similaires en termes de taille et de capacité pour répondre à la demande électrique, mais la variation de la puissance de production requise reflète les différences potentielles dans les conditions climatiques ou l'ensoleillement de chaque ville. Le site d'Adrar étant plus ensoleillé et plus venté, il nécessite moins d'équipements pour venir au besoin de la charge que le site de Tlemcen.

Ville, Jour	Péol (kW)	P <sub>PV</sub> (kW)	Ebat (kWh)	LPSP	Coût (\$)
Tlem, 1 ja	200	57.0	68.898	0.000088	48537.20
Adrar, 1 ja	200	60.0	68.177	0.000110	48675.44
Tlem, 3 ja	10	37.5	215.839	0.00000	23933.11
Adrar, 3 ja	5.0	43.5	211.302	0.00000	22977.09
Tlem, 5 ja	5.0	37.5	359.733	0.00000	35782.40
Adrar, 5 ja	5.0	30.0	369.177	0.00000	34443.9

Table IV.7: coût avec LPSP minimum

Les données indiquent que Adrar a besoin d'une capacité de production moins élevée pour les panneaux solaires par rapport à Tlemcen dans certains cas, mais nécessite une capacité de batterie plus grande. Adrar montre une meilleure efficacité dans certains aspects comme le LPSP, où la valeur de LPSP est nulle dans de nombreux cas, comparé à Tlemcen qui montre des valeurs légèrement plus élevées de LPSP dans certaines périodes.

En ce qui concerne les coûts et l'économie, Adrar affiche généralement des coûts plus élevés par rapport à Tlemcen, bien que les coûts du système varient en fonction de la période et de la taille du système.

En termes de fiabilité, il semble que les deux villes bénéficient de systèmes de technologie solaire à haute fiabilité, avec des valeurs de LPSP proches de zéro, ce qui reflète la qualité de conception et d'exécution des systèmes dans chaque région.

Ces données montrent l'importance d'étudier les conditions locales et les facteurs économiques lors du choix et de la mise en œuvre des systèmes d'énergie renouvelable, car ces facteurs peuvent influencer l'efficacité et les coûts du système.

## IV.6 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats de l'évaluation d'un système hybride (PV/éolien) en utilisant des batteries de stockage pour fournir de l'énergie électrique à une unité administrative d'une entreprise sur deux sites en Algérie : Tlemcen (Lalla Setti) et Adrar, en utilisant des données météorologiques (luminosité, température ambiante, vitesse du vent) des deux sites sur une année complète, à pas d'une heure. Pour les deux sites, nous avons effectué des calculs du paramètre d'efficacité du système hybride, à savoir la probabilité de perte d'alimentation en puissance LPSP (Loss of power supply probability), qui est nulle pour un système d'alimentation en énergie totalement fiable. Afin d'expliquer comment les divers paramètres du système (LPSP,

jours d'autonomie, puissance éolienne nominale donnée) influencent la taille du système, nous avons mesuré la variation de la puissance photovoltaïque nominale optimale en fonction de la puissance éolienne nominale donnée, ainsi que la puissance photovoltaïque en fonction de LPSP et pour différentes durées d'autonomie. Ces résultats concordent avec d'autres obtenus dans la littérature (cf. par exemple [61]). Finalement, nous avons évalué le prix optimal du système hybride pour les deux sites, en prenant en compte une autonomie de 1, 3 et 5 jours

# CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail était d'élaborer un système hybride qui combine deux ressources renouvelables, à savoir l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, avec un système de stockage en batteries, et ce pour alimenter en électricité une unité administrative au sein d'une entreprise de moyenne consommation. L'analyse repose sur les données météorologiques collectées sur une année à intervalles d'une heure, provenant de deux sites situés sur le territoire national algérien: Tlemcen (plateau Lalla Setti) et Adrar. On a utilisé la technique LPSP (Loss of Power Supply Probability, en anglais) pour quantifier le degré de fiabilité du système énergétique tout au long d'une année, lorsque celui-ci alimente une charge. En effet, un système totalement fiable a une valeur de LPSP égale à zéro; et augmente lorsque la fiabilité du système décroît. La technique de LPSP est combinée à la technique des réseaux de neurones artificiels, laquelle permettra au système, d'un côté, de prendre les décisions de charge ou de décharge des batteries selon des tests établis, et de l'autre côté, de s'assurer que l'état de charge des batteries ne sorte pas de l'intervalle de sécurité prédéfini par l'utilisateur.

Ensuite, une étude économique se basant sur un modèle économique qui tient compte des coûts initiaux des éléments du système, des coûts de remplacement et de maintenance; mais aussi des taux d'inflation pendant la durée de fonctionnement du système, est réalisée. Cette étude nous permet de choisir la configuration (Nombre de batteries, puissance photovoltaïque, puissance éolienne) qui correspond au coût le plus bas.

Ceci dit, il est laissé à l'utilisateur de choisir entre deux critères contradictoires, à savoir: un coût bas et une fiabilité totale. En effet, si l'utilisateur choisirait un système avec un coût le plus bas, il perdrait, dans ce cas, de la fiabilité de son système énergétique, puisque une fiabilité totale exige un coût très élevé.

Aussi, l'analyse des deux sites a révélé une disparité entre les configurations optimales en termes d'équipements et de dépenses pour les deux sites choisis. Nous visons également à pouvoir exploiter des données météorologiques authentiques provenant des sites étudiés, obtenues par des stations météorologiques locales agréées.

Sur le plan académique, cette étude nous a permis de mieux comprendre la technique de dimensionnement des systèmes hybrides, mais aussi de pouvoir appliquer la technique des réseaux de neurones artificiels et de saisir, sinon toutes ses subtilités, quelques uns de ses aspects.

Au niveau pratique, il serait opportun de réaliser un système énergétique physique qui adoptera cette technique pour la gestion du flux énergétique, en se basant sur l'acquisition en temps réel des conditions météorologiques d'un site choisi.

## Bibliographie

- [1] SASSIA BOUALEM. Optimisation d'un micro réseau intelligent vert eolienne/pv/batteries/groupe electrogene connecté au réseau. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2023.
- [2] Laarej Merad, Boumédiène Benyoucef, and Jean Pierre Charles. Etude technico-économique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 2(2), 2006.
- [3] Abdelbasset Tayebi, Zohra Belhadj, and Rachid MAOUEDJ. Installation et expérimentation d'un système hybride photovoltaïque-éolien pour la production d'électricité. Mémoire de master, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2013.
- [4] Ionel Vechiu. Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [5] Abdellatif Mahammedi. Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque. Mémoire de master, Université de Sétif, 2018.
- [6] Belhadj Mohammed and Modélisation D'un Système de Captage. Photovoltaïque autonome mémoire de magister. Mémoire de master, Centre Universitaire de Bechar, 2008.
- [7] Ibrahim Bendjamâa. Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid-TLEMCEM, 2012.
- [8] Khaled Ferkous. Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne. Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [9] Gérald PETITJEAN. Dossier: l'intelligence artificielle et l'aide à la décision dans les entreprises.
- [10] John A Duffie and William A Beckman. Solar engineering of thermal processes john wiley & sons. *Inc. New York*, 1991.
- [11] Mamadou Aliou Barry, Younoussa Moussa Balde, and Nicola Milimono Tamba. Etude et optimisation d'un système hybride photovoltaïque-eolien à telico mamou. *African Scientific Journal*, 3(12), 2022.

## Bibliographie

---

- [12] Dhaker Abbas, André Martinez, Gérard Champenois, and Jean Paul Gaubert. Étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage: Dimensionnement et analyse du cycle de vie. *European Journal of Electrical Engineering (EJEE)*, 15:5, 2012.
- [13] Ahmed El Khadimi, Lahsen Bchir, and Abdelouhab Zeroual. Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-eolien avec système de stockage. *Journal of Renewable Energies*, 7(2):73–83, 2004.
- [14] AHLAM MOUSSAOUI, Khadidja BOUKELKOULA, et al. Etude et dimensionnement d'une alimentation photovoltaïque destinée pour une station service. Mémoire de Master, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2023.
- [15] Oualid Slimani and Mohamed Fares Meziani. Dimensionnement d'un système énergétique hybride "solaire-éolien-batteries" combinant la technique lpsp et la méthode des moindres carrés. Mémoire de Master, ESSAT, 2022.
- [16] GUEZGOUZ Mohammed. Perfectionnement et expertise des systèmes énergétiques complexes incorporant des sources renouvelables: Application au système hybride éolien-pv avec batteries sur un site national. *Université de Mostaganem*, 2(07), 2020.
- [17] Houssam Mehibel. Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-diesel-batterie. Mémoire de Master, Ecole nationale polytechnique, 2017.
- [18] FERRAH BILLEL. Etude d'un système hybride (photovoltaïque-éolien). Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [19] Ludmil Stoyanov. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. Thèse de Doctorat, Université de corse Pascuale Paoli, 2011.
- [20] Rachid Maouedj, Souad Bousalem, and Boumediene Benyoucef. Optimisation d'un système de pompage éolien application aux sites sahariens. *Journal of Renewable Energies*, 11(2):239–250, 2008.
- [21] JA Carta, J González, and C Gómez. Operating results of a wind–diesel system which supplies the full energy needs of an isolated village community in the canary islands. *Solar Energy*, 74(1):53–63, 2003.
- [22] Gilles Notton, Christian Cristofari, Philippe Poggi, and Marc Muselli. Wind hybrid electrical supply system: behaviour simulation and sizing optimization. *Wind Energy: An*

- International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 4(2):43–59, 2001.
- [23] AJ Bowen, M Cowie, and N Zakay. The performance of a remote wind–diesel power system. *Renewable energy*, 22(4):429–445, 2001.
- [24] Henrik Lund and Poul Alberg Østergaard. Electric grid and heat planning scenarios with centralised and distributed sources of conventional, chp and wind generation. *Energy*, 25(4):299–312, 2000.
- [25] Henrik Lund and Woodrow W Clark. Management of fluctuations in wind power and chp comparing two possible danish strategies. *Energy*, 27(5):471–483, 2002.
- [26] Sabah Lamouri. Etude de l’optimisation d’énergie dans un système hybride avec stockage. Mémoire de Master, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2020.
- [27] Abdelhalim Borni and Rachid Chenni. Etude et optimisation d’un multi système hybride de conversion d’énergie électrique. Mémoire Master, Université Frères Mentouri-Constantine 1 ,2015.
- [28] MR Nouni, SC Mullick, and TC Kandpal. Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in india. *Energy Policy*, 35(4):2491–2506, 2007.
- [29] Tao Zhou. Commande et supervision énergétique d’un générateur hybride actif eolien incluant du stockage sous forme d’hydrogène et des super-condensateurs pour l’intégration dans le système électrique d’un micro réseau. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, 2009.
- [30] Gabriele Zini and Paolo Tartarini. Wind-hydrogen energy stand-alone system with carbon storage: Modeling and simulation. *Renewable Energy*, 35(11):2461–2467, 2010.
- [31] Leonidas Ntziachristos, Chariton Kouridis, Zissis Samaras, and Konstantinos Pattas. A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected aegean islands grid. *Renewable energy*, 30(10):1471–1487, 2005.
- [32] Magnus Korpaas, Arne T Holen, and Ragne Hildrum. Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(8):599–606, 2003.

- [33] MT Iqbal. Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system. *Renewable energy*, 28(4):511–522, 2003.
- [34] J Shi, YJ Tang, L Ren, JD Li, and SJ Chen. Application of smes in wind farm to improve voltage stability. *Physica C: Superconductivity*, 468(15-20):2100–2103, 2008.
- [35] Mochamad Ashari and CV Nayar. An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (pv)–diesel–battery hybrid power system. *Solar energy*, 66(1):1–9, 1999.
- [36] Samia Saib. Contribution à l’optimisation d’un système hybride (pv/éolien) avec stockage d’énergie connecté au réseau électrique. Mémoire de Master, Université de Sétif, 2018.
- [37] Boualam Benlahbib. Supervision d’un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique. *Revue de CDER*, 2019.
- [38] Bati Ernest Boya Bi, Prosper Gbaha, Magloire Paul Ekoun Koffi, and Kamenan Blaise Koua. Modélisation des composants d’un système hybride panneaux photovoltaïque–stockage d’énergie via l’hydrogène–batteries. *European Scientific Journal January*, 2018.
- [39] Bounaceur Amin. Etude et conception d’un système hybride de production d’énergie. *Mémoire de Master, Université Kasdi merbah, Ouragla, algérie*, 2015.
- [40] Mohamed Lakhdar Louazene. *Etude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla*. PhD thesis, Mémoire de Master, Université de Batna 2, 2008.
- [41] Kamelia Helali. Modélisation d’une cellule photovoltaïque: étude comparative. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [42] Fatiha HANANOU and Aicha ROUABAH. Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque. Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2014.
- [43] JA Gow and CD Manning. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 146(2):193–200, 1999.
- [44] Stéphane Petibon. Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III , 2009.

- [45] Boubakeur Hadjaissa. Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire. Mémoire nde Master, Ecole nationale polytechnique, 2008.
- [46] Lucio Almeida Hecktheuer, Arno Krenzinger, and César Wilhelm Massen Prieb. Methodology for photovoltaic modules characterization and shading effects analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 24:26–32, 2002.
- [47] 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.
- [48] Marc Parizeau. Réseaux de neurones gif-21140 et gif-64326. Thèse de Doctorat, Université laval, 2004.
- [49] 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.
- [50] B Habiboullah and B Ladjedel. Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la vitesse de vent". Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf d'Msila, 2018.
- [51] Bogdan S Borowy and Ziyad M Salameh. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and pv array in a wind/pv hybrid system. *IEEE Transactions on energy conversion*, 11(2):367–375, 1996.
- [52] Hongxing Yang, Wei Zhou, Lin Lu, and Zhaohong Fang. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with lpsp technology by using genetic algorithm. *Solar energy*, 82(4):354–367, 2008.
- [53] JA DuffieandW and A Beckman. Solar engineering ofthermalprocess, john wiley& sons, 1991.
- [54] Abderrezak Bouharchouche, Ahmed Bouabdallah, El Madjid Berkouk, Said Diaf, and Hocine Belmili. Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque. *Journal of Renewable Energies*, 17(3):359–376, 2014.

- [55] Ai Bin, Yang Hongxing, Shen Hui, and Liao Xianbo. Computer aided design for pv/wind hybrid system. In *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of*, volume 3, pages 2411–2414. IEEE, 2003.
- [56] W Kellogg, MH Nehrir, G Venkataramanan, and V Gerez. Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system. *Electric Power Systems Research*, 39(1):35–38, 1996.
- [57] S Gomaa, AK Aboul Seoud, and HN Kheiralla. Design and analysis of photovoltaic and wind energy hybrid systems in alexandria, egypt. *Renewable energy*, 6(5-6):643–647, 1995.
- [58] ES Gavanidous and AG Bakirtzis. Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(1):42–48, 1992.
- [59] MA Elhadidy and SM Shaahid. Optimal sizing of battery storage for hybrid (wind+ diesel) power systems. *Renewable Energy*, 18(1):77–86, 1999.
- [60] A Kaabeche, M Belhamel, and R Ibtiouen. Optimal sizing method for stand-alone hybrid pv/wind power generation system. *Revue des Energies Renouvelables (SMEE'10) Bou Ismail Tipaza*, 1:205–213, 2010.
- [61] Said Diaf, Djamila Diaf, Mayouf Belhamel, Mourad Haddadi, and Alain Louche. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid pv/wind system. *Energy policy*, 35(11):5708–5718, 2007.
- [62] Lin Lu, Hongxing Yang, and John Burnett. Investigation on wind power potential on hong kong islands—an analysis of wind power and wind turbine characteristics. *Renewable energy*, 27(1):1–12, 2002.
- [63] Imad Abouzahr and R Ramakumar. Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach. *IEEE Transactions on energy conversion*, 5(3):445–452, 1990.
- [64] Arnaud Delaille. Développement de méthodes d'évaluation de l'état de charge et de l'état de santé des batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques. Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 2006.
- [65] Mohamed Amine BEN LAKEHAL and YAHIA AMOURA. Dimensionnement optimal par essaim particulaire et par algorithme génétique d'un système énergétique hybride pour l'alimentation du bloc administratif de sarl boublenza. Mémoire de Master, ESSAT, 2020.