



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Énergies Renouvelables

Par :

Mlle ARGOUB Assala

Sur le thème

Simulation de la charge/décharge d'une batterie plomb-acide couplée à un aérogénérateur

Soutenu publiquement le 22 Juin 2026 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme BENAZZA-DIAF Nadia	MAA	Université de Tlemcen	Présidente
Mr. MERAD Laarej	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme BOUCHAOUR Mama	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année Universitaire : 2025 ~ 2026

Remerciements

Ce Mémoire de Fin d'Études a été réalisé au sein de l'Université de Tlemcen, Faculté des Sciences, Département de Physique, dans le cadre de l'année universitaire 2026-2027.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur, Monsieur MERAD Laarej, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour la confiance qu'il m'a accordée afin de mener à bien ce travail. Ses qualités humaines remarquables, la pertinence de ses conseils ainsi que son soutien constant ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements à Madame BENAZZA-DIAF Nadia, Maître Assistante (A) à l'Université de Tlemcen, qui a accepté d'assurer la présidence du jury et d'évaluer ce travail.

Ma gratitude s'étend à Madame BOUCHAOUR Mama, Maître de Conférences (A) à l'Université de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce mémoire.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail au cours de mes années d'études, et leur adresser ici mes plus vifs remerciements.

Merci à tous...

Mlle Assala ARGOUB

Dédicace

À mes parents adorés, qui constituent ma source infinie d'énergie et ma plus grande motivation.

À mes frères, et spécialement à mon cadet Ahmed Yacine, qui occupe une place si précieuse dans mon cœur.

À mes chères amies et à mes collègues, Amina, Batoul et Zohra, de la faculté et de la cité universitaire. Merci pour l'entraide, les rires et les souvenirs inoubliables partagés durant ces années d'études.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	5
I. INTRODUCTION	6
II. SYSTEMES EOLIENS	6
II.1. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur	6
II.2. Différents types de turbines éoliennes	8
II.2.1. Turbine asynchrone	8
II.2.2. Turbine synchrone	10
II.2.3. Turbine à vitesse variable	11
III. SYSTEMES DE STOCKAGE DE L'ENERGIE	13
III.1. Différentes technologies de batteries	13
III.1.1. Batterie plomb-acide	13
III.1.2. Batterie Lithium-ion	14
III.1.3. Volant d'inertie	15
III.2. Rôle du stockage dans les systèmes éoliens	17
III.2.1. Équilibrage de l'offre et de la demande (Lissage de la production)	17
III.2.2. Stabilisation du réseau électrique	17
III.2.3. Autonomie des sites isolés	17
III.2.4. Rentabilité économique	18
IV. BATTERIE PLOMB-ACIDE	18
IV.1. Modélisation des batteries Plomb-acide	18
IV.1.1. Capacité (C)	19
IV.1.2. Tension nominale (V_{nom})	19
IV.1.3. État de charge (SOC)	19
IV.1.4. Résistance interne (R_{int})	20
IV.1.5. Taux de décharge (C_{rate})	20
IV.2. Modèle de Shepherd et modèle amélioré de Tremblay-Dessaint appliqués à la batterie Plomb-acide	21
IV.2.1. Modèle de Shepherd	21
IV.2.2. Modèle amélioré de Tremblay-Dessaint	21
IV.3. Modèle dynamique	22
IV.4. Modèle électrique (Modèle de Thévenin)	23
V. CONCLUSION	24

BIBLIOGRAPHIE	25
CHAPITRE II : SIMULATION DE LA CHARGE/DECHARGE D'UNE BATTERIE PLOMB-ACIDE.	29
I. INTRODUCTION	30
II. MODELISATION DES RESSOURCES EOLIENNES	30
II.1. Présentation du premier site d'étude	30
II.2. Présentation du deuxième site d'étude	31
II.3. Collecte des données de vent	31
II.4. Analyse statistique des données	31
III. DISTRIBUTION DE WEIBULL	33
III.1. Condition de stabilité du vent	34
IV. MODELISATION MATHEMATIQUE D'UN AEROGENERATEUR	35
IV.1. Modélisation aérodynamique	35
IV.2. Modélisation mécanique	36
V. ARCHITECTURE D'UN SYSTEME HYBRIDE	38
VI. BATTERIE PLOMB-ACIDE	38
VII. SIMULATION DE SYSTEME HYBRIDE EOLIENNE-BATTERIE	39
VIII. STRATEGIE DE GESTION DE L'ENERGIE	40
IX. CONCLUSION	41
BIBLIOGRAPHIE	43
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	45
I. INTRODUCTION	46
II. VALIDATION DU MODELE SIMULINK	46
II.1. Réponse de la chaîne de conversion éolienne	46

II.2. Validation du fonctionnement du convertisseur CC-CC	47
II.3. Dynamique de la batterie	47
III. APPLICATION DU MODELE AUX SITES D'ÉTUDE (ADRAR VS HENNAYA)	47
III.1 Scénario de simulation pour le site de Hennaya	47
III.2 Scénario de simulation pour le site d'Adrar	49
IV. ANALYSE COMPARATIVE DES PERFORMANCES SUR LES DEUX SITES	52
IV.1 Discussion et interprétation des résultats comparatifs	52
IV.1.1 Dynamique des cycles de charge et de décharge	52
IV.1.2 Amplitude des variations de l'état de charge (SOC)	52
IV.1.3 Comportement du courant et niveau de sollicitation du hacheur bidirectionnel	53
IV.1.4. Régulation de la tension du bus continu	53
V. EVALUATION DE LA STABILITE ELECTRIQUE DU SYSTEME	53
VI. CHOIX DU SITE ET AIDE A LA DECISION	54
VI.1. Synthèse technico-environnementale : Quel site offre le meilleur rendement ?	54
VII. RECOMMANDATIONS TECHNICO-ECONOMIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT	55
VII.1. Recommandations pour le site d'Adrar : Renforcement de la capacité de stockage	55
VII.1.1 Augmentation de la capacité nominale du banc de batteries	55
VII.1.2 Hybridation de la production par intégration photovoltaïque	56
VII.2 Recommandations pour le site de Hennaya : Optimisation du contrôle et de la gestion énergétique	56
VII.2.1 Amélioration du filtrage des courants de charge	56
VII.2.2. Mise en œuvre d'une gestion thermique adaptée	56
VIII. CONCLUSION	57
CONCLUSION GÉNÉRALE	59

Nomenclature

ρ	Densité de l'air (Kg/m^3)
S	Surface balayée par le rotor (m^2)

V	Vitesse du vent (m/s)
$P_{méc}$	Puissance mécanique extraire par le rotor [Watt].
P_{vent}	Puissance cinétique du vent disponible [Watt].
AGM	Absorbent Glass Mat
BMS	Battery Management System, ou Système de Gestion de Batterie
SOC	State of Charge / État de Charge
DOD	Depth of Discharge / Profondeur de Décharge
OCV	Open Circuit Voltage / Tension en Circuit Ouvert
E_0	La tension à circuit ouvert(V)
K	Coefficient de polarisation
Q_{max}	Capacité maximale de la batterie (Ah)
Q	Charge extraite en fonction du temps
$I(t)$	Courant de la batterie en fonction du temps
R_0	Résistance interne
A, B	Constantes empiriques associées à la zone exponentielle de la courbe de décharge.
$\tilde{V}_B(s)$	Variation de la tension aux bornes de la batterie.
$\tilde{I}_B(s)$	Variation du courant de la batterie.
$R_B(s)$	Modèle dynamique de la batterie.
s	Variable complexe de Laplace.
k	Gain statique du modèle,
p	Pôle du système.
Q_{max}	Capacité nominale maximale
I	Courant de charge ou de décharge (positif en décharge)
η	Rendement.
U_s	Tension de polarisation (V)
R_s	Résistance de polarisation (Ω)
C_s	Capacité de polarisation
U_{bat}	Tension la batterie(V)
U_{ocv}	Tension à circuit ouvert (V)
R_0	Résistance interne (Ω)
n	Nombre totale de mesure
v_i	Vitesse du vent individuelle

N	Nombre totale de mesure
v_{moy}	Vitesse moyenne (m/s)
$P(v)$	Densité de probabilité de la vitesse du vent
k	Facteur de forme, indiquant la variabilité ou la stabilité du vent
c	Facteur d'échelle, lié à la vitesse moyenne du vent (m/s)
CV	Coefficient de Variation.
R	Rayon des pales (m)
C_p	Coefficient de puissance ($\leq 0,593$ – limite de Betz).
λ	Rapport de vitesse de pointe.
β	Angle de calage des pales (pitch).
R	Rayon des pales(m)
V	Vitesse du vent (m/s)
J_{tot}	Inertie totale équivalente du système (kg·m ²).
ω_r	Vitesse angulaire du rotor (rad/s).
T_m	Couple mécanique aérodynamique (N.m).
T_e	Couple électromagnétique de la génératrice (N.m).
f	Coefficient de frottement visqueux.
V_d, V_q	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park [V].
i_d, i_q	Composantes du courant au stator dans le repère de Park [A].
ϕ_d, ϕ_q	Composantes du flux au stator dans le repère de Park [Wb].
ω	Vitesse de rotation électrique [rad/s].
R_s	Résistance statorique [Ω]
L_d, L_q	Inductances statoriques suivant les axes d et q [H].
ϕ_f	Flux créé par les aimants permanents [Wb].
C_n	Capacité nomina de la batterie (Ah)
EMS	<i>Energy Management System</i> (Système informatique et technique de contrôle et de supervision des flux énergétiques).
SME	Système de Management de l'Énergie (Démarche organisationnelle et stratégique globale de gestion de l'énergie, encadrée par la norme ISO 50001).
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i> (Cycle d'amélioration continue en quatre étapes)

MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturb and Observe
I_b	Courant de la Batterie
V_b	Tension aux Bornes de la Batterie

LISTE DES FIGURES

FIGURE (I.1) : ÉOLIENNE A MACHINE ASYNCHRONE A CAGE (MAS) AVEC CONVERSION COMPLETE COTE STATOR [4].	9
--	----------

FIGURE (I.2) : ÉOLIENNE A MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA) AVEC CONVERTISSEUR COTE ROTOR [4].....	9
FIGURE (I.3) : SYSTEME EOLIEN BASE SUR LA GENERATRICE SYNCHRONE (GS) [5].....	10
FIGURE (I.4) : ARCHITECTURE D'UN SYSTEME EOLIEN A GENERATRICE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS (GSAP) [5].....	11
FIGURE (I.5) : SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT DU MODELE DE THEVENIN DU PREMIER ORDRE POUR UNE BATTERIE PLOMB-ACIDE.....	24
FIGURE (II.1) : HISTOGRAMME DES VITESSES DU VENT AY HENNAYA.....	32
FIGURE (II.2) : HISTOGRAMME DES VITESSES DU VENT AU ADRAR	33
FIGURE (II.3) : DISTRIBUTION DE WEIBULL POUR LES DEUX SITES.....	34
FIGURE (II.4) : CIRCUIT EQUIVALENT DE LA MACHINE SYNCHRONE	38
FIGURE (II.5) : SCHEMA DE SIMULATION DANS MATLAB/SIMULINK	40
FIGURE (III.1) : ÉVOLUTION DU SOC, DU COURANT ET DE LA TENSION DE LA BATTERIE (HENNAYA)	49
FIGURE (III.2) : ÉVOLUTION DU SOC, DU COURANT ET DE LA TENSION DE LA BATTERIE (ADRAR)	51

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU (I.1) : COMPARAISON DES TYPES DE TURBINES ETUDIEES	12
TABLEAU (I.2) : COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ENERGIE	17
TABLEAU (III.3) : COMPARAISON DES PARAMETRES DYNAMIQUES DU SYSTEME DE STOCKAGE	52

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

La transition énergétique mondiale vers les sources d'énergie renouvelables constitue aujourd'hui une nécessité stratégique majeure face à l'épuisement progressif des ressources fossiles et aux impératifs croissants de lutte contre le changement climatique. Parmi les différentes filières renouvelables, l'énergie éolienne occupe une place privilégiée en raison de sa maturité technologique, de sa compétitivité économique et de son important potentiel de développement. Toutefois, son intégration à grande échelle au sein des réseaux électriques demeure confrontée à une contrainte fondamentale : son caractère intrinsèquement intermittent et sa forte dépendance aux conditions météorologiques. Les fluctuations aléatoires de la vitesse du vent engendrent des variations significatives de la production électrique susceptibles d'affecter la stabilité du réseau et de compromettre l'équilibre entre l'offre et la demande énergétique [1].

Afin d'atténuer ces contraintes et d'améliorer la fiabilité des systèmes éoliens, l'intégration de dispositifs de stockage d'énergie apparaît comme une solution incontournable. Dans ce contexte, la batterie Plomb-acide conserve un intérêt particulier grâce à sa robustesse, sa fiabilité éprouvée, sa maturité industrielle et son coût relativement modéré. Son association avec une installation éolienne permet de compenser les fluctuations de production, d'assurer la continuité de l'alimentation électrique et d'améliorer la qualité de l'énergie délivrée aux utilisateurs [2].

Dans le contexte algérien, où la diversification du bouquet énergétique national constitue un enjeu stratégique de premier ordre, la valorisation du potentiel éolien représente une voie prometteuse pour renforcer la sécurité énergétique du pays et réduire sa dépendance aux hydrocarbures. Cependant, les ressources éoliennes présentent une forte variabilité spatiale selon les régions, nécessitant des études approfondies afin d'identifier les configurations technologiques les plus adaptées [3]. C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, consacré à l'étude, à la modélisation et à la simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink d'un système hybride associant une éolienne et une batterie Plomb-acide. L'analyse repose sur une étude comparative de deux sites algériens aux caractéristiques climatiques distinctes : Adrar, représentatif du fort potentiel éolien saharien, et Hennaya, caractérisée par des conditions de vent plus modérées propres au Nord-Ouest algérien. La caractérisation statistique de la ressource éolienne est réalisée à l'aide de la distribution de

Weibull, tandis que l'étude porte sur les échanges énergétiques au sein du système et sur l'efficacité d'une stratégie de gestion basée sur un convertisseur continu-continu (DC-DC).

Sur le plan méthodologique, la modélisation et la simulation numérique occupent une place centrale dans la conception et l'optimisation des systèmes d'énergies renouvelables. Avant toute phase de déploiement réel, qui implique des investissements financiers et matériels considérables, les outils de simulation avancés permettent d'évaluer virtuellement le comportement du système dans une grande variété de scénarios de fonctionnement. L'environnement MATLAB/Simulink offre ainsi un cadre particulièrement adapté pour reproduire avec précision les interactions dynamiques entre la source éolienne, le système de stockage et les dispositifs de conversion d'énergie. Cette démarche permet non seulement d'anticiper les contraintes opérationnelles et les dysfonctionnements potentiels, mais également de valider les choix technologiques retenus tout en garantissant la sécurité et la fiabilité de l'installation avant sa mise en œuvre effective.

L'un des défis majeurs associés aux systèmes hybrides éolien-stockage réside dans la gestion optimale des flux énergétiques tout en préservant l'intégrité des composants, notamment celle du système de stockage. Bien que les batteries Plomb-acide présentent une robustesse reconnue, leur durée de vie demeure fortement tributaire des conditions de charge et de décharge auxquelles elles sont soumises. Des épisodes prolongés de surcharge peuvent accélérer leur vieillissement, tandis que des décharges profondes répétées entraînent une dégradation prématurée de leurs performances. Dans ce contexte, le convertisseur DC-DC joue un rôle essentiel en assurant une régulation intelligente des échanges énergétiques entre l'éolienne, la batterie et la charge. Son action permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie disponible tout en maintenant les paramètres de fonctionnement de la batterie dans des plages compatibles avec sa préservation à long terme.

L'objectif principal de ce mémoire consiste à étudier, modéliser et simuler un système hybride éolienne–batterie Plomb-acide sous MATLAB/Simulink afin d'analyser son comportement dynamique dans des conditions de vent contrastées. Plus spécifiquement, il s'agit d'évaluer l'influence des caractéristiques éoliennes des sites d'Adrar et de Hennaya sur les performances énergétiques du système. Cette analyse vise également à valider l'efficacité d'une stratégie de gestion énergétique reposant sur un convertisseur DC-DC capable d'assurer l'équilibre entre production et consommation tout en protégeant la batterie contre les phénomènes de surcharge et de décharge profonde. Les résultats obtenus permettront de formuler des recommandations technico-économiques pertinentes en vue du dimensionnement optimal de ce type d'installation dans le contexte algérien. À travers une

approche rigoureuse fondée sur la simulation numérique, ce travail contribue ainsi à la réflexion sur les conditions d'intégration durable et performante de l'énergie éolienne dans le mix énergétique national.

Le premier chapitre présente un état de l'art approfondi consacré aux technologies éoliennes et aux systèmes de stockage électrochimique. Une attention particulière y est accordée aux fondements théoriques ainsi qu'aux principaux modèles électriques et mathématiques de la batterie Plomb-acide, notamment les modèles de Shepherd, de Tremblay-Dessaint et de Thévenin.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation du système hybride étudié. Il détaille la méthodologie de collecte et de traitement des données météorologiques, l'analyse statistique du régime des vents à l'aide de la loi de Weibull pour les deux sites retenus, la modélisation de l'aérogénérateur ainsi que l'élaboration de la stratégie de gestion énergétique adoptée.

Enfin, le troisième chapitre présente la validation des modèles développés sous Simulink et analyse les performances dynamiques du système dans les deux environnements climatiques considérés. Une comparaison détaillée des résultats obtenus à Adrar et à Hennaya est réalisée, permettant de dégager des recommandations technico-économiques destinées à orienter les décisions relatives au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éolien-stockage en Algérie.

Références :

[1] IRENA, *Panorama des innovations pour un avenir alimenté par les énergies renouvelables : solutions pour intégrer les énergies renouvelables variables*, Abou Dhabi, Émirats arabes unis : Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), 2019. ISBN : 978-92-9260-247-5.

[2] Charge the Future, *Les batteries au plomb jouent un rôle clé dans la transition de l'Europe vers une énergie propre*. Bruxelles, Belgique, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://chargefuture.org/wp-content/uploads/2020/03/Clean-Energy-French-v3.pdf>.

Consulté le : 11 juin 2026.

[3] : N. Kasbadji Merzouk, « Carte des vents de l'Algérie – Résultats préliminaires », *Revue des Énergies Renouvelables, Valorisation*, pp. 209–214,

Chapitre I : Etat de l'Art

I. Introduction

Ce premier chapitre établit les fondements théoriques essentiels à la compréhension, à l'analyse et à la modélisation du système hybride éolienne–batterie étudié dans ce mémoire. Il vise à présenter un état de l'art approfondi des technologies de conversion et de stockage de l'énergie, afin de mettre en évidence leur complémentarité et leur contribution à l'amélioration de la gestion énergétique.

Dans une première partie, nous examinons les systèmes de conversion éolienne en détaillant le principe de fonctionnement des aérogénérateurs ainsi que les principales technologies de turbines et de génératrices utilisées dans les installations modernes, notamment les machines synchrones, asynchrones et les systèmes à vitesse variable, particulièrement adaptés au caractère fluctuant de la ressource éolienne.

La deuxième partie est consacrée aux solutions de stockage de l'énergie, composante indispensable pour compenser l'intermittence de la production renouvelable. Les différentes technologies disponibles, telles que les batteries lithium-ion et les systèmes à volant d'inertie, sont présentées et comparées afin de mettre en évidence leur rôle stratégique dans le lissage de la puissance produite, l'amélioration de la qualité de l'énergie et le maintien de la stabilité des réseaux électriques.

Enfin, une attention particulière est portée à la batterie plomb-acide, retenue comme dispositif de stockage dans le cadre de cette étude. Après avoir défini ses principales caractéristiques électrochimiques et électriques, notamment la capacité nominale, l'état de charge (SOC) et la résistance interne, nous présentons les modèles mathématiques et électriques les plus couramment utilisés pour sa représentation dynamique, à savoir les modèles de Shepherd, de Tremblay-Dessaint et de Thévenin. Ces modèles constituent la base méthodologique sur laquelle reposera la phase de modélisation et de simulation développée dans les chapitres suivants.

II. Systèmes éoliens

II.1. Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

L'éolienne ou comme le nom technique dit, un aérogénérateur est un dispositif qui produit l'énergie électrique en passant de l'énergie cinétique du vent à l'énergie mécanique qui est transformée à la fin à l'énergie électrique [1].

Et pour que cette production et transformation être réalisée ; ce système utilise des composants mécaniques, électriques, et électroniques aussi.

La production commence par l'énergie mécanique produite quand le vent met en rotation les pales de l'éolienne, cette énergie mécanique est ensuite transmise à une génératrice qui la convertit en énergie électrique.

La production de l'énergie éolienne dépend principalement de la vitesse du vent, les pales de l'éolienne captent l'énergie cinétique transporter par le vent et la transformer en énergie mécanique de rotation, l'augmentation de cette vitesse entraîne une augmentation de la puissance récupérable, et ça ce qui met le choix du site d'implantation important. Le système contient un contrôleur qui limite la production lorsque la vitesse du vent devient trop élevée pour des raisons de sécurités [2].

La puissance théorique contenue dans le vent traversant une surface S est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (I.1)$$

Avec :

ρ : Densité de l'air [kg/m^3].

S : Surface balayée par le rotor [m^2].

V : Vitesse du vent [m/s].

Il est impossible de convertir la totalité de l'énergie contenue dans le vent en énergie utile, car une quantité de l'énergie cinétique résiduelle de l'air doit être conservé pour que l'écoulement continue. En 1919 Albert Betz a démontré qu'il existe une limite théorique maximale à la puissance récupérable par une éolienne (idéale) [3].

Cette limite est la limite de Betz, elle représente le rendement maximal, égale à $(16/27)$ environ 59,3 %, cette limite est pour une éolienne idéale, mais quand on parle d'une éolienne réelle on prend en considération les pertes aérodynamiques liées à la forme des pales, les pertes mécaniques dues au frottement, et les pertes électriques au niveau des dispositifs de conversions et la génératrice ; ici on a le coefficient de puissance qui est toujours inférieur à la limite de Betz.

Formule de coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{méc}}{P_{vent}} \quad (I.2)$$

$P_{méc}$: Puissance mécanique extraire par le rotor [Watt].

P_{vent} : Puissance cinétique du vent disponible [Watt].

II.2. Différents types de turbines éoliennes

II.2.1. Turbine asynchrone

La configuration électrique adoptée dans un système éolien influence directement son comportement dynamique et son mode de fonctionnement, notamment le choix entre un fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable [4].

Les machines asynchrones à cage (Voir figure I.1) sont classées comme une solution simple et économique dans les systèmes éoliens. Elles sont robustes, peu coûteuses et nécessitent peu de maintenance. Dans les éoliennes de grande puissance, la vitesse de rotation du rotor est relativement faible ; il est donc nécessaire d'intégrer un multiplicateur mécanique de vitesse lors de l'utilisation d'une génératrice asynchrone afin d'assurer un fonctionnement correct de la machine [5].

Ce type de configuration fonctionne à une vitesse quasi fixe, ce qui limite l'adaptation aux variations de la vitesse du vent et réduit le rendement énergétique par rapport aux systèmes à vitesse variable. Lors de variations rapides du vent, la rigidité de la chaîne électromécanique peut également provoquer des fluctuations de puissance et des contraintes mécaniques importantes [5].

Malgré ces inconvénients, la simplicité et la fiabilité des machines asynchrones à cage expliquent leur utilisation dans certaines applications [5].

Afin de répondre aux limitations des machines asynchrones à cage, notamment le fonctionnement à vitesse quasi fixe, une autre configuration largement adoptée est la machine asynchrone à double alimentation.

Les Machines Asynchrones à Double Alimentation (MADA) (Voir figure I.2) se caractérisent par un stator de la génératrice directement connecté au réseau électrique, tandis que le rotor est relié à une chaîne d'électronique de puissance. Les tensions et la fréquence appliquées au rotor sont contrôlées par cette chaîne, ce qui permet un fonctionnement à vitesse variable [4].

La chaîne de conversion est constituée d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur, et elle est pilotée de manière à maintenir une tension continue stable. Cette configuration présente des avantages importants, notamment la réduction de la puissance nominale du convertisseur, puisque seule une partie de la puissance totale de la génératrice transite par le circuit rotorique. Par conséquent, les coûts d'investissement ainsi que les pertes associées sont limités [4].

La figure (I.1) illustre l'architecture d'une éolienne basée sur une machine asynchrone à cage.

La turbine entraîne la génératrice via un multiplicateur de vitesse. La puissance électrique produite est ensuite conditionnée par une chaîne de conversion composée d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur avant son injection dans le réseau à travers un transformateur.

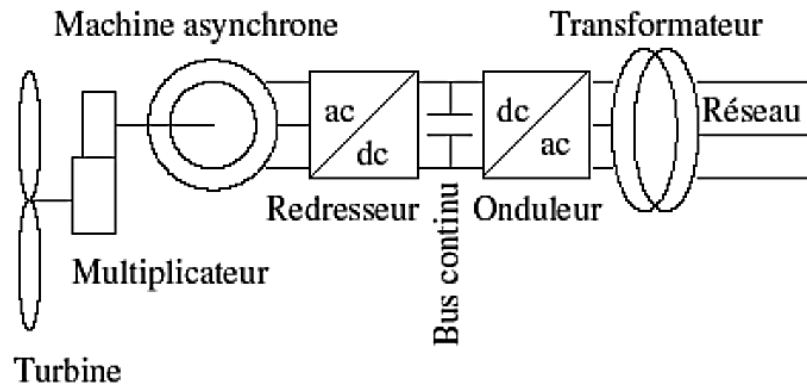


Figure (I.1) : Éolienne à Machine Asynchrone à cage (MAS) avec conversion complète côté stator [4]

La figure (I.2) présente l'architecture d'une éolienne à machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette configuration, le stator est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est relié à une chaîne d'électronique de puissance. Cette structure permet un fonctionnement à vitesse variable tout en limitant la puissance transitant par le convertisseur.

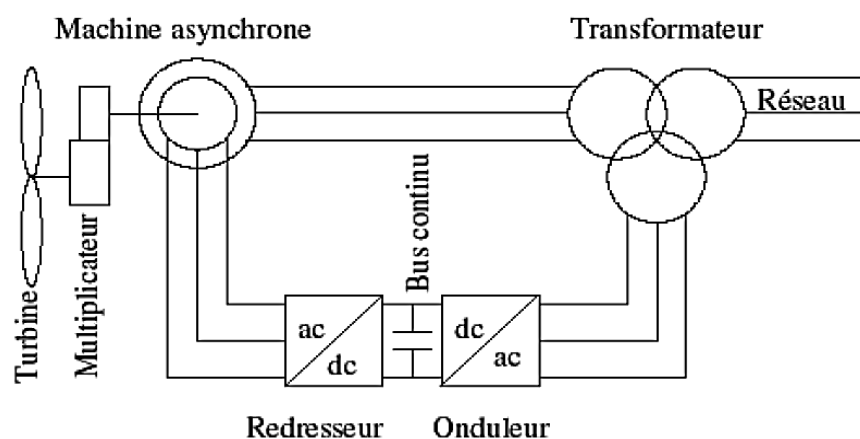


Figure (I.2) : Éolienne à Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) avec convertisseur côté rotor [4]

II.2.2. Turbine synchrone

Les systèmes éoliens peuvent contenir des génératrices synchrones reconnues pour leur capacité à fournir des couples mécaniques importants tout en conservant des dimensions compactes. Dans certaines configurations, cette caractéristique permet d'entraîner directement la turbine éolienne sans avoir recours à un multiplicateur de vitesse [5].

Comme toute machine électrique, la génératrice synchrone (Voir Figure I.3) à rotor bobiné présente certaines limitations, notamment la nécessité d'un entretien régulier du système de bagues et balais, ainsi que la présence d'un circuit d'excitation nécessitant une alimentation en puissance réactive [5].

Comme le montre la figure (I.3), la génératrice synchrone est associée à une interface d'électronique de puissance assurant l'adaptation de l'énergie produite aux caractéristiques du réseau. Cette configuration permet un contrôle efficace de la vitesse de rotation de la turbine et améliore la qualité de l'énergie électrique injectée.

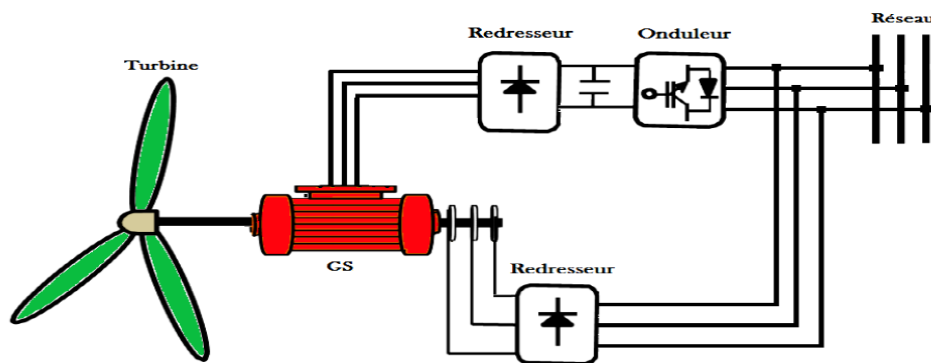


Figure (I.3) : *Système éolien basé sur la Génératrice Synchrone (GS) [5]*

En revanche, il existe un autre type de génératrice synchrone caractérisé par un grand nombre de pôles, permettant de développer des couples mécaniques importants tout en supprimant le système de bagues et balais. Il s'agit des Génératrices Synchrones à Aimants Permanents (GSAP) [5].

Pour les machines GSAP (Voir Figure I.4), il est possible de réduire le taux de défaillance et d'améliorer la fiabilité globale du système en éliminant certains éléments mécaniques et en supprimant le multiplicateur de vitesse. Cependant, l'utilisation de l'électronique de puissance dans ces machines GSAP entraîne une complexité accrue et une augmentation du coût du système GSAP. Cependant, l'électronique de puissance dans les machines GSAP permet un fonctionnement à vitesse variable et un contrôle précis de la vitesse de rotation, ce qui permet une meilleure optimisation énergétique des machines GSAP [5].

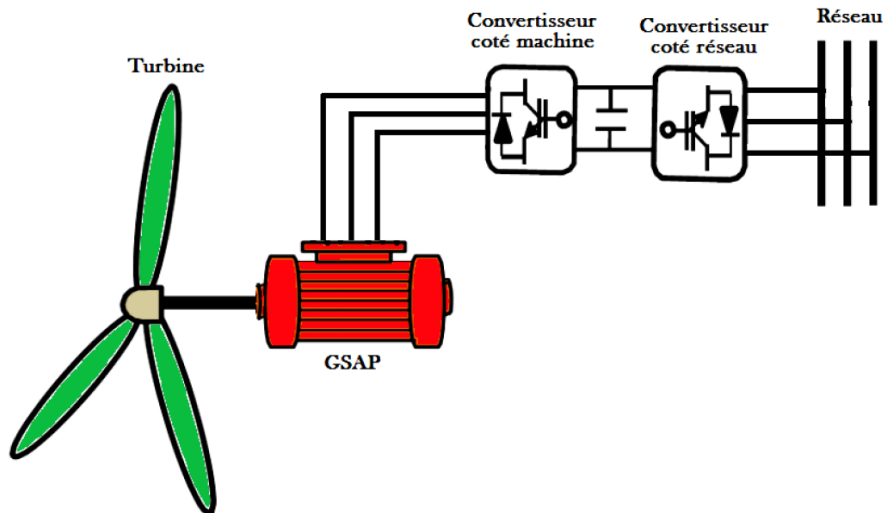


Figure (I.4) : Architecture d'un système éolien à génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) [5]

La figure (I.4) ci-dessus présente l'architecture d'un système éolien basé sur une Génératrice Synchrone à Aimants Permanents (GSAP). La turbine entraîne directement la génératrice sans multiplicateur de vitesse, grâce au couple élevé fourni par la machine. L'énergie électrique produite est ensuite traitée par une chaîne d'électronique de puissance, assurant un fonctionnement à vitesse variable et l'adaptation de la tension et de la fréquence avant l'injection au réseau.

II.2.3. Turbine à vitesse variable

La technologie dominante des éoliennes de forte puissance est celle fonctionnant à vitesse variable. Ce mode de fonctionnement se caractérise par une meilleure adaptation aux variations de la vitesse du vent, puisque la vitesse de rotation de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique.

Les performances aérodynamiques du système dépendent principalement de la géométrie des pales et des matériaux utilisés pour leur conception. Le fonctionnement à vitesse variable présente plusieurs avantages, notamment une récupération d'énergie plus importante, une amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite, une réduction du bruit de fonctionnement ainsi qu'une diminution des contraintes mécaniques [6].

En revanche, l'intégration de l'électronique de puissance entraîne des pertes supplémentaires, une augmentation du coût du système et une complexité accrue du contrôle [6].

Le tableau (I.1) présente une comparaison des principales technologies de génératrices utilisées dans les systèmes éoliens, en mettant en évidence leurs caractéristiques, avantages et limites.

Critère	MAS à cage	MADA (DFIG)	GS à rotor bobiné	GS à aimants permanents (GSAP)
Mode de fonctionnement	Vitesse quasi fixe	Vitesse variable	Vitesse variable	Vitesse variable
Connexion au réseau	Directe (stator)	Directe (stator)	Via électronique de puissance	Via électronique de puissance
Multiplicateur de vitesse	Nécessaire	Nécessaire	Optionnel	Non nécessaire (entraînement direct)
Électronique de puissance	Faible ou absente	Partielle (rotor)	Totale	Totale
Rendement énergétique	Moyen	Bon	Bon	Élevé
Adaptation aux variations du vent	Faible	Bonne	Bonne	Très bonne
Coût d'investissement	Faible	Moyen	Élevé	Élevé
Maintenance	Faible	Moyenne	Élevée (bagues/balais)	Faible
Complexité du système	Faible	Moyenne	Élevée	Élevée
Fiabilité globale	Bonne	Bonne	Moyenne	Très bonne
Domaine d'application	Petit/moyen éolien	Éolien terrestre	Éolien terrestre	Éolien moderne, grande puissance

Tableau (I.1) : Comparaison des types de turbines étudiées

Cette comparaison montre que les systèmes à vitesse variable offrent de meilleures performances énergétiques et une meilleure adaptation aux variations du vent. Les machines asynchrones à cage se distinguent par leur simplicité et leur faible coût, tandis que les

génératrices synchrones à aimants permanents présentent les rendements les plus élevés, au prix d'une complexité et d'un coût plus importants.

III. Systèmes de stockage de l'énergie

Le développement des systèmes à énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, a mis en évidence la nécessité de disposer de solutions de stockage de l'énergie fiables et efficaces. En raison du caractère intermittent de la production éolienne, le stockage permet d'assurer la continuité de l'alimentation et une meilleure gestion de l'énergie produite. Parmi les solutions de stockage disponibles, les batteries constituent la technologie la plus couramment utilisée dans les applications éoliennes. Leur simplicité d'intégration, leur disponibilité et leurs performances en font un choix privilégié.

III.1. Différentes technologies de batteries

III.1.1. Batterie plomb-acide

La batterie plomb-acide est un système de stockage d'énergie électrochimique dont le fonctionnement repose sur des réactions chimiques réversibles entre des plaques de plomb et un électrolyte d'acide sulfurique. Inventée en 1859 par Gaston Planté, cette technologie permet de stocker l'électricité sous forme chimique grâce à l'interaction entre des plaques de plomb (Pb), de dioxyde de plomb (PbO_2) et un électrolyte constitué d'acide sulfurique dilué (H_2SO_4) [12].

En phase de décharge, la batterie fournit de l'énergie électrique : les réactions chimiques se produisent spontanément, conduisant à la formation de sulfate de plomb sur les électrodes et à la circulation des électrons dans le circuit extérieur. À l'inverse, lors de la charge, un courant externe est appliqué afin d'inverser ces réactions, permettant la régénération des plaques et le stockage de l'énergie. Chaque cellule délivre une tension d'environ 2,1 V, plusieurs cellules étant assemblées en série pour atteindre des tensions usuelles telles que 12 V.

Les principales caractéristiques des batteries plomb-acide incluent une capacité exprimée en ampères-heures (Ah), un rendement énergétique généralement compris entre 70 et 75 %, ainsi qu'une bonne fiabilité en exploitation. Toutefois, certains modèles, notamment les batteries ouvertes, nécessitent une maintenance régulière telle que l'appoint en eau distillée. Des variantes plus récentes, comme les batteries AGM et Gel, permettent de réduire ces contraintes de maintenance tout en conservant des performances comparables.[13, 14].

Les batteries Plomb-acide présentent plusieurs avantages qui expliquent leur large utilisation dans de nombreuses applications. Elles se distinguent par un coût d'investissement initial relativement faible, une grande robustesse et une fiabilité éprouvée dans des conditions d'exploitation variées. Leur densité de puissance élevée leur permet de fournir des courants importants sur de courtes durées, ce qui les rend adaptées aux applications nécessitant des appels de courant élevés. De plus, le plomb constitue l'un des matériaux les plus efficacement recyclés à l'échelle mondiale, avec un taux de recyclage avoisinant 97%, ce qui représente un avantage environnemental significatif [15].

Cependant, ces batteries présentent également plusieurs limitations. Leur faible densité énergétique les rend lourdes et encombrantes pour une quantité d'énergie stockée donnée. Elles sont sensibles aux décharges profondes, ce qui réduit leur durée de vie en nombre de cycles. Les modèles ouverts nécessitent un entretien régulier, notamment l'appoint en eau distillée. Par ailleurs, le dégagement d'hydrogène lors de la charge et la présence d'acide sulfurique imposent des précautions de sécurité. Enfin, leur rendement énergétique demeure inférieur à celui de technologies de stockage plus récentes, ce qui limite leur utilisation dans des applications exigeant une forte densité énergétique ou une longue durée de vie.[15, 16]

En résumé, la batterie plomb-acide constitue une solution fiable et économique pour le stockage d'énergie, particulièrement adaptée aux applications stationnaires et aux systèmes où le poids n'est pas critique, malgré ses limites en densité énergétique et en durée de vie.

III.1.2. Batterie Lithium-ion

La batterie Lithium-ion est un système de stockage électrochimique dont le fonctionnement repose sur le déplacement réversible des ions lithium entre l'anode (électrode négative) et la cathode (électrode positive) à travers un électrolyte. Lors de la décharge, les ions lithium quittent l'anode, traversent l'électrolyte et s'intercalent dans la structure de la cathode, tandis que les électrons circulent dans le circuit externe pour alimenter une charge. Lors de la recharge, le flux s'inverse et les ions retournent vers l'anode, emmagasinant à nouveau l'énergie. Ce mécanisme d'intercalation réversible permet une forte densité énergétique, une bonne durée de vie et une recharge rapide, ce qui explique leur utilisation croissante dans les systèmes énergétiques modernes [17, 18].

Ce type de batterie présente plusieurs avantages qui expliquent leur usage croissant dans les systèmes de stockage modernes. Elles offrent une haute densité énergétique, permettant de stocker plus d'énergie pour un poids réduit, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications modernes où l'espace et le poids sont limités. Leur charge rapide et

leur faible autodécharge assurent une disponibilité efficace de l'énergie. Tandis que l'absence d'effet mémoire et la tension relativement élevée par cellule simplifient l'intégration dans des systèmes variés, tout en assurant un fonctionnement fiable et efficace [19, 20].

Cependant, ces batteries présentent certaines limites importantes pour les systèmes éoliens. Leur coût élevé et la nécessité d'un système de gestion de batterie (BMS) pour la sécurité augmentent la complexité et l'investissement initial. Des risques de sécurité subsistent, notamment liés à la surchauffe et à l'emballement thermique, ce qui impose des protections spécifiques. Par ailleurs, l'extraction et l'acheminement du lithium et du cobalt ont un impact environnemental non négligeable, bien que le recyclage de ces matériaux progresse progressivement [19], [21].

III.1.3. Volant d'inertie

Volant d'inertie est un système de stockage d'énergie mécanique qui conserve l'énergie sous forme cinétique de rotation. Pendant la charge, un moteur entraîne le volant à grande vitesse, convertissant l'électricité en énergie cinétique. Pour restituer l'énergie, le moteur agit comme générateur, ralentissant le volant et transformant l'énergie mécanique en électricité. Une fois en régime stable, le volant tourne à vitesse quasi constante, avec un apport minimal pour compenser les pertes dues aux frottements [22, 23].

L'efficacité du stockage dépend principalement de la masse du volant et du carré de sa vitesse. Les systèmes modernes réduisent les pertes grâce à un vide partiel et des suspensions magnétiques, et utilisent des matériaux comme le carbone pour atteindre des vitesses plus élevées. Les volants d'inertie sont particulièrement adaptés au lissage de la production d'énergie renouvelable, à l'alimentation de secours et à la récupération de l'énergie de freinage dans les transports [23].

Les volants d'inertie offrent un stockage d'énergie fiable et performant grâce à un rendement élevé (90–95 %) et une durée de vie exceptionnelle, pouvant dépasser 30 ans avec très peu de dégradation au fil du temps. Ils sont capables de fournir des puissances instantanées importantes, ce qui les rend particulièrement adaptés à la régulation des fluctuations de production ou à la récupération de l'énergie de freinage. De plus, cette technologie est respectueuse de l'environnement, sans émission chimique ni risque d'emballement thermique. Elle se caractérise également par un faible coût d'exploitation, une maintenance réduite et une bonne résistance aux conditions extrêmes [24, 25].

Cependant, les volants d'inertie présentent certaines limites. Leur densité énergétique reste faible par rapport aux batteries, et la durée de stockage est limitée dans le temps,

généralement de quelques minutes à quelques heures. En outre, le coût initial est relativement élevé en raison de la complexité des composants, tels que les paliers magnétiques et les systèmes sous vide. Enfin, l'encombrement, la complexité technique et les pertes résiduelles dues aux frottements constituent d'autres contraintes à considérer [24-26].

En résumé, le volant d'inertie constitue une solution de stockage performante pour les applications nécessitant une réponse rapide et un lissage de puissance à court terme, mais il reste moins adapté aux besoins de stockage énergétique de longue durée.

Afin de mieux comparer les différentes technologies de stockage d'énergie étudiées, le tableau (I.2) présente une synthèse de leurs principales caractéristiques, avantages et limitations, notamment dans le contexte des systèmes éoliens.

Critère	Batterie plomb-acide	Batterie lithium-ion	Volant d'inertie
Principe de stockage	Électrochimique (réactions Pb/PbO ₂ – H ₂ SO ₄)	Électrochimique (intercalation des ions Li ⁺)	Mécanique (énergie cinétique de rotation)
Densité énergétique	Faible	Élevée	Très faible
Densité de puissance	Moyenne	Élevée	Très élevée
Rendement énergétique	~70–75 %	~90–95 %	~90–95 %
Durée de vie (cycles)	Faible à moyenne	Élevée	Très élevée (> 30 ans)
Temps de stockage	Heures à jours	Heures à jours	Minutes à quelques heures
Maintenance	Moyenne à élever (modèles ouverts)	Faible	Très faible
Sécurité	Risque de gaz et d'acide	Risque thermique (BMS requis)	Très sûre (pas de réactions chimiques)
Coût initial	Faible	Élevé	Élevé
Impact environnemental	Recyclage élevé (~97 %)	Impact lié au lithium et cobalt	Faible
Adaptation aux systèmes éoliens	Bonne (stockage stationnaire simple)	Très bonne (performance)	Bonne pour le lissage de puissance

		élevée)	
Application principale	Stockage stationnaire, faible coût	VE, stockage performant, ENR	Régulation rapide, stabilisation réseau

Tableau (I.2) : Comparaison des technologies de stockage d'énergie

III.2. Rôle du stockage dans les systèmes éoliens

Dans les systèmes éoliens, le stockage d'énergie constitue une solution clé pour faire face à l'intermittence de la ressource éolienne. Il permet d'emmagasiner l'énergie excédentaire produite lors des périodes de vents forts et de la restituer lorsque la production diminue ou que la demande augmente. Cette fonction contribue à assurer une alimentation électrique plus stable et plus fiable, tout en améliorant l'efficacité globale des installations éoliennes et en facilitant leur intégration au réseau électrique.

III.2.1. Équilibrage de l'offre et de la demande (Lissage de la production)

Dans ce contexte ; la production d'énergie éolienne dépend fortement de la disponibilité du vent, qui ne correspond pas toujours aux périodes de forte demande en électricité. Le stockage d'énergie joue alors un rôle essentiel en permettant de conserver l'énergie produite lorsque le vent est abondant, souvent en dehors des pics de demande, afin de la restituer lorsque la consommation augmente [27]. Ce mécanisme permet de lisser la production éolienne et d'éviter les pertes d'énergie liées aux surplus de production, notamment lorsque la capacité du réseau est dépassée et que l'énergie doit être écrêtée.

III.2.2. Stabilisation du réseau électrique

L'injection importante d'énergie éolienne peut provoquer des variations de la fréquence et de la tension du réseau électrique, en raison du caractère variable et non pilotable du vent [28]. Les systèmes de stockage d'énergie, en particulier les batteries associées à des onduleurs, jouent alors un rôle clé pour stabiliser le réseau. Grâce à leur temps de réponse très rapide, elles peuvent intervenir en quelques millisecondes pour limiter les fluctuations de tension et maintenir la fréquence à sa valeur nominale (50 Hz ou 60 Hz). Elles contribuent ainsi à renforcer la fiabilité et la qualité de l'électricité produite par les systèmes éoliens [29].

III.2.3. Autonomie des sites isolés

Pour les régions isolées, comme les îles ou certaines zones rurales, le stockage d'énergie est indispensable. Il assure une continuité d'alimentation électrique 24h/24 même en l'absence de vent et limite le recours aux générateurs diesel, coûteux et polluants, tout en améliorant la fiabilité et la durabilité de l'alimentation électrique [30].

III.2.4. Rentabilité économique

Grâce au stockage, les exploitants de parcs éoliens peuvent mieux valoriser leur production. L'électricité excédentaire peut être conservée et injectée sur le réseau lorsque les prix du marché sont les plus élevés, ce qui permet d'éviter les pertes liées aux périodes de surproduction et d'optimiser le rendement économique des installations [31].

Le stockage d'énergie constitue un élément central des systèmes éoliens. Il permet de lisser la production, de stabiliser la fréquence et la tension du réseau, et de compenser l'intermittence du vent. Il garantit une alimentation continue dans les sites isolés tout en réduisant le recours aux générateurs diesel. Le stockage offre des opportunités économiques en permettant aux exploitants de mieux valoriser leur production et d'optimiser le rendement de leurs installations.

IV. Batterie Plomb-acide

La batterie Plomb-acide est un système de stockage d'énergie électrochimique reposant sur des réactions chimiques réversibles entre des électrodes de plomb et un électrolyte à base d'acide sulfurique. Son fonctionnement s'appuie sur des phases successives de charge et de décharge permettant la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique et inversement. Chaque cellule fournit une tension nominale d'environ 2,1 V, plusieurs cellules étant associées afin d'atteindre les niveaux de tension requis par les applications énergétiques.

Cette technologie se caractérise par une bonne fiabilité en exploitation, un coût relativement faible et une large utilisation dans les systèmes de stockage stationnaires. Malgré une densité énergétique limitée et une sensibilité aux décharges profondes, la batterie plomb-acide demeure une solution couramment employée, notamment dans les systèmes à énergies renouvelables, en raison de sa robustesse et de sa maturité technologique.

Dans ce contexte, l'étude de la batterie Plomb-acide ne se limite pas à ses caractéristiques générales, mais s'oriente vers l'analyse de ses modèles de représentation mathématique. Le focus suivant est ainsi consacré à la présentation et à la comparaison des principaux modèles de batteries plomb-acide proposés dans la littérature, en vue de leur utilisation dans les études de charge et de décharge.

IV.1. Modélisation des batteries Plomb-acide

Le comportement d'une batterie plomb-acide dans les systèmes éoliens est représenté par certains paramètres qui doivent être pris en compte. Ces paramètres permettent de décrire de manière fiable la charge, la décharge et les pertes internes de la batterie.

IV.1.1. Capacité (C)

La capacité d'une batterie indique la quantité totale de charge électrique qu'elle peut stocker et délivrer, généralement exprimée en ampères-heures (Ah). Elle détermine la quantité d'énergie que la batterie peut fournir à un courant donné et constitue un paramètre fondamental pour la modélisation. La capacité énergétique peut également être exprimée en watt-heure (Wh) en multipliant la capacité (Ah) par la tension moyenne (V) pendant la décharge [32].

La capacité réelle d'une batterie plomb-acide est influencée par plusieurs facteurs : la conception et la chimie des électrodes et de l'électrolyte, la température de fonctionnement, le taux de décharge, l'état de charge (SOC) et la profondeur de décharge (DOD), ainsi que l'âge de la batterie. Par exemple, une batterie profondément déchargée de manière répétée ou soumise à des températures extrêmes peut voir sa capacité diminuer avec le temps. Dans les systèmes de stockage stationnaires, la capacité des batteries plomb-acide peut varier de quelques ampères-heures pour de petites batteries à plus de 200 Ah pour les batteries de cycle profond utilisées dans les systèmes éoliens [32].

IV.1.2. Tension nominale (V_{nom})

La tension nominale correspond à la valeur de référence standard de la batterie lorsqu'elle est chargée et fonctionne dans des conditions normales. Pour une cellule plomb-acide, la tension nominale est d'environ 2,1 V. Plusieurs cellules sont généralement assemblées en série pour obtenir des tensions courantes comme 12 V ou 24 V dans les systèmes éoliens [32].

La tension nominale est une donnée essentielle pour la modélisation, car elle permet de calculer la tension globale d'une batterie et d'établir les équations électriques lors des phases de charge et de décharge. La tension réelle varie cependant continuellement au cours de la décharge en fonction de l'état de charge (SOC) et du courant appliqué.

IV.1.3. État de charge (SOC)

L'état de charge (SOC) représente le pourcentage de charge électrique disponible dans la batterie par rapport à sa capacité totale, avec 0 % correspondant à une batterie vide et 100 % à une batterie complètement chargée [32].

L'état de charge est un paramètre critique pour la modélisation, car il permet de connaître l'énergie disponible dans la batterie à un instant donné. Il est également utilisé pour protéger la batterie, en évitant des décharges trop profondes ou des surcharges qui pourraient réduire sa durée de vie.

Ce paramètre peut être estimé par différentes méthodes, la plus simple étant le comptage de Coulombs, qui consiste à intégrer le courant entrant et sortant de la batterie et à comparer la charge accumulée à la capacité nominale. Cette méthode peut être complétée par la mesure de la tension à vide (OCV) pour corriger les erreurs d'intégration et améliorer la précision. Dans les systèmes stationnaires, ces méthodes permettent de suivre avec fiabilité l'état de charge et d'optimiser les cycles de charge et de décharge [32].

IV.1.4. Résistance interne (R_{int})

La résistance interne est l'opposition au passage du courant électrique à l'intérieur de la batterie. Elle résulte de la résistance ionique dans l'électrolyte, de la résistance propre des matériaux actifs et des contacts internes.

Une résistance interne élevée provoque plusieurs effets :

- **Chute de tension** : Lorsque le courant de décharge augmente ; la tension aux bornes de la batterie diminue plus fortement.
- **Dissipation thermique** : Une partie de l'énergie est convertie en chaleur, pouvant affecter la durée de vie de la batterie.
- **Réduction de rendement** : L'énergie perdue sous forme de chaleur diminue l'efficacité globale du stockage [32].

La connaissance précise de R_{int} est essentielle pour les modèles électriques équivalents (RC, Shepherd, Tremblay-Dessaint) et pour prévoir le comportement de la batterie sous différents courants de charge et de décharge.

IV.1.5. Taux de décharge (C_{rate})

Le C-rate indique la vitesse à laquelle une batterie est déchargée par rapport à sa capacité nominale. Par exemple, un C_{rate} de 1 C signifie que la batterie se décharge complètement en une heure. Ce paramètre est essentiel pour la modélisation, car il influence directement la tension, la température et la quantité d'énergie réellement restituée par la batterie pendant la décharge [33].

Dans les batteries plomb-acide, des décharges trop rapides peuvent réduire l'énergie utile en raison de l'effet de Peukert, qui décrit la diminution de la capacité disponible à mesure que le courant de décharge augmente. La connaissance du C_{rate} est donc indispensable pour dimensionner correctement les systèmes de stockage et prévoir le comportement de la batterie lors des cycles de charge et de décharge.[33]

Dans le cadre d'un couplage avec un système éolien, la prise en compte de ces paramètres fondamentaux est indispensable pour une modélisation fidèle du comportement de

la batterie plomb-acide, permettant d'analyser avec précision ses performances lors des phases de charge et de décharge.

IV.2. Modèle de Shepherd et modèle amélioré de Tremblay-Dessaint appliqués à la batterie Plomb-acide

Dans le cadre de la modélisation des batteries Plomb-acide, les modèles mathématiques empiriques occupent une place importante dans les études de systèmes énergétiques, notamment pour l'analyse des phases de charge et de décharge. Parmi ces modèles, le modèle de Shepherd et sa version améliorée développée par Tremblay et Dessaint sont largement utilisés dans la littérature en raison de leur simplicité et de leur adéquation aux études de type système, notamment dans les applications liées aux énergies renouvelables.

IV.2.1. Modèle de Shepherd

Le modèle de Shepherd a été développé pour décrire le comportement électrochimique d'une batterie à partir de grandeurs mesurables telles que la tension aux bornes, la tension à circuit ouvert, le courant et l'état de charge. Ce modèle exprime directement la tension de la batterie en fonction du courant et de la charge extraite, et peut être appliqué aussi bien en phase de décharge qu'en phase de charge [34].

Dans sa formulation originale, le modèle de Shepherd introduit un terme non linéaire dépendant à la fois de l'amplitude du courant et de la charge réelle de la batterie. Ce terme permet de représenter un comportement réaliste de la tension, en particulier lorsque la batterie est proche de la décharge complète, où une chute rapide de la tension apparaît dès qu'un courant circule. Toutefois, cette dépendance directe au courant instantané peut entraîner des boucles algébriques et provoquer des instabilités numériques lors des simulations en boucle fermée.[34]

IV.2.2. Modèle amélioré de Tremblay-Dessaint

Afin de surmonter les limitations du modèle original de Shepherd, Tremblay et Dessaint ont proposé une formulation améliorée dans laquelle le terme non linéaire de la tension dépend uniquement de l'état de charge de la batterie. Cette modification permet d'éliminer les boucles algébriques tout en conservant une représentation fidèle du comportement de la batterie en charge et en décharge [34].

L'expression de la tension d'une cellule selon le modèle amélioré de Shepherd peut s'écrire sous la forme suivante :

$$V_{cell}(t) = E_0 - K \frac{Q_{max}}{Q_{max} - Q(t)} I(t) - R_0 I(t) + A e^{-BQ(t)} \quad (I.3)$$

Avec :

E_0 : Tension à circuit ouvert [V].

K : Coefficient de polarisation [-].

Q_{max} : Capacité maximale de la batterie [Ah].

$Q(t)$: Charge extraite en fonction du temps.

$I(t)$: Courant de la batterie en fonction du temps.

R_0 : Résistance interne [Ohms].

A et B : Constantes empiriques associées à la zone exponentielle de la courbe de décharge.

Ainsi, le modèle de Shepherd et sa version améliorée de Tremblay-Dessaint constituent des outils efficaces pour la représentation du comportement électrique des batteries plomb-acide lors des phases de charge et de décharge, tout en offrant un bon compromis entre simplicité de mise en œuvre et stabilité numérique pour les études de systèmes éoliens couplés à un stockage d'énergie.

IV.3. Modèle dynamique

Les batteries Plomb-acide présentent un comportement dynamique : la tension aux bornes ne suit pas instantanément les variations de courant, et cette réponse dépend fortement de l'état de charge (SOC). Pour représenter ce comportement transitoire, qui relie la tension de sortie à l'intensité du courant et au SOC dans le temps, on utilise des modèles dynamiques. Ces modèles permettent de prendre en compte les phénomènes d'inertie électrochimique et les effets retardés liés aux réactions internes de la batterie, tout en restant suffisamment simples pour être utilisés dans des simulations ou des systèmes de contrôle.

Pour modéliser dynamiquement les batteries Plomb-acide plusieurs approches sont proposées dans la littérature. Les modèles développés par Mauracher & Karden et al [35], utilisent une combinaison de circuit équivalent et de relations non linéaires pour représenter la dépendance de la tension et de la résistance interne par rapport au courant et au SOC. a proposé une version simplifiée linéaire du premier ordre, capable de reproduire fidèlement la dynamique de la batterie autour d'un point de fonctionnement donné [35, 36].

La formulation générale d'un modèle dynamique [37] simple du premier ordre peut s'écrire sous forme de fonction de transfert reliant la variation de tension perturbée à la variation de courant perturbée :

$$R_B(s) = \frac{\tilde{V}_B(s)}{\tilde{I}_B(s)} = \frac{k}{s+p} \quad (I.4)$$

$\tilde{V}_B(s)$: Variation de la tension aux bornes de la batterie dans le domaine de Laplace.

$\tilde{I}_B(s)$: Variation du courant de la batterie dans le domaine de Laplace.

$R_B(s)$: Modèle dynamique de la batterie, exprimé sous forme de fonction de transfert tension/courant.

s : Variable complexe de Laplace, représentant la dynamique temporelle du système.

k : Gain statique du modèle, lié aux caractéristiques électriques de la batterie autour du point de fonctionnement (dépend du SOC et des conditions de charge).

p : Pôle du système, associé à la constante de temps de la batterie, traduisant la rapidité de sa réponse dynamique.

IV.4. Modèle électrique (Modèle de Thévenin)

Pour représenter le comportement dynamique des batteries plomb-acide, le modèle de Thévenin du premier ordre est largement utilisé en raison de sa simplicité et de sa capacité à représenter correctement le comportement dynamique de la batterie. Ce modèle permet de reproduire les variations de tension lors des phases de charge et de décharge tout en capturant les effets de polarisation internes de la batterie.

Le modèle de Thévenin repose sur un circuit équivalent (Figure I.5), constitué d'une source de tension à vide U_{ocv} , dépendante de l'état de charge, d'une résistance interne ohmique R_0 , et d'un réseau RC de polarisation constitué d'une résistance R_s et d'une capacité C_s . La résistance R_0 modélise les pertes instantanées liées aux conducteurs et aux électrodes, tandis que le réseau, R_s - C_s permet de représenter les phénomènes de polarisation électrochimique responsables des variations progressives de la tension.[38]

L'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie est décrite par l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q_{max}} \int_{t_0}^t \eta I(\tau) d\tau \quad (I.5)$$

SOC : l'état de charge de la batterie.

Q_{max} : Capacité nominale maximale [Ah].

I : Courant de charge ou de décharge (positif en décharge) [A].

η : Rendement coulombien [-].

La tension de polarisation U_s est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dU_s}{dt} = \frac{I}{C_s} - \frac{U_s}{R_s C_s} \quad (I.6)$$

U_s : Tension de polarisation [V].

R_s : Résistance de polarisation [Ohms].

C_s : Capacité de polarisation [Ah].

Enfin, la tension aux bornes de la batterie est donnée par :

$$U_{bat} = U_{ocv}(SOC) - R_0 I - U_s \quad (I.7)$$

U_{bat} : Tension terminale de la batterie [V].

U_{ocv} : Tension en circuit ouvert [V].

R_0 : Résistance interne [ohms].

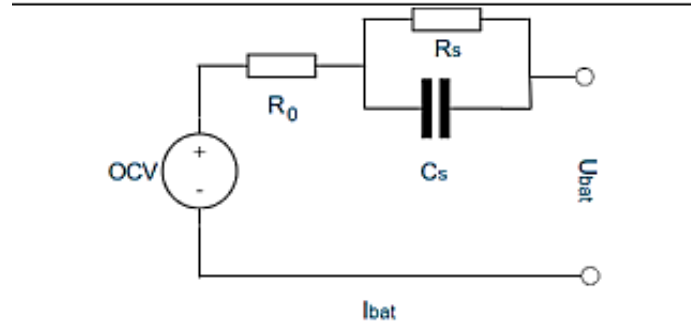


Figure (I.5) : Schéma électrique équivalent du modèle de Thévenin du premier ordre Pour une batterie plomb-acide.

V. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales nécessaires à la compréhension des systèmes éoliens autonomes avec stockage. Après avoir rappelé le principe de fonctionnement d'un aérogénérateur et les principales architectures de turbines éoliennes, une attention particulière a été portée aux différentes technologies de stockage, en mettant en évidence le rôle essentiel des batteries dans l'amélioration de la continuité et de la fiabilité de l'alimentation.

Par ailleurs, l'étude de la batterie plomb-acide a permis de présenter ses principales caractéristiques électriques ainsi que les paramètres influençant son fonctionnement. Enfin, les principaux modèles utilisés pour représenter son comportement, notamment les modèles de Shepherd, de Tremblay-Dessaint, le modèle dynamique et le modèle de Thévenin, ont été introduits afin de fournir les bases théoriques nécessaires à la modélisation et aux simulations développées dans les chapitres suivants.

Bibliographie

- [1] J.D. Delord et E. Roger, « Étude d'un aérogénérateur : Présentation – Mise en situation », Lycée Maximilien Perret, Alfortville, Académie de Créteil.
- [2] « Typepad has closed—your next chapter starts here », *Network Solutions*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.networksolutions.com/blog/typepad-closed-next-chapter-starts-here>. Consulté le: 28 décembre 2025.
- [3] S. A. Litim, « Les éoliennes : étude théorique d'une éolienne », Support de cours, École Nationale Polytechnique d'Oran "Maurice Audin", Oran,
- [4] B. Kelkoul, « Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Magister en Automatique, Université de Tlemcen, 2011.
- [5] N. Benakli, « Étude d'un système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents double étoile », Mémoire de Master en Énergies Renouvelables, Université de Béjaïa, 2021.
- [6] A. Boubekour et R. Boukourdane, « Étude et modélisation d'une chaîne éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) », Mémoire de Master en Énergies Renouvelables en Électrotechnique, Centre Universitaire de Naâma, 2020.
- [7] « Vestas V112/3000 – Manufacturers and turbines », *The Wind Power*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.thewindpower.net/turbine_en_413_vestas_v112-3000.php. Consulté le: 3 janvier 2026.
- [8] « Table 1: 3MW WTG Induction Machine Parameters », *ResearchGate*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/3MW-WTG-Induction-Machine-Parameters-Parameter-Value-Rotor-resistor-per-phase-2-97mO_tbl1_287580125. Consulté le: 3 janvier 2026.
- [9] « Étude de la MADA », Université catholique de Louvain (UCLouvain), e-LEE, Belgique. [En ligne]. Disponible sur: <https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Mada/EtudeMADA/Principe.htm>. Consulté le: 3 janvier 2026.
- [10] M. Costea, E. Vladu et T. Károly, « Wind Turbine Modeling in MATLAB Simulink », *Natural Resources and Sustainable Development*, University of Oradea, Roumanie, 2011.
- [11] M. I. Lakehal et A. Benmakhlouf, « Modélisation et contrôle d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Master en Commande électrique, Université de Annaba, 2024.

- [12] « Comment fonctionne une batterie plomb-acide ? », *Révolution Énergétique*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.revolution-energetique.com/fiches-pedagogiques/comment-fonctionne-une-batterie-plomb-acide/>
- [13] « Fonctionnement des accumulateurs au plomb : les bases », *Batterie-Solaire*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.batterie-solaire.com/content/72-principes-de-fonctionnement-des-accumulateurs-au-plomb>
- [14] S. Atoui, "Étude de l'influence de la température sur la batterie au plomb-acide pour véhicule", Mémoire de Master en Automatique et Systèmes, Université Annaba, 2020.
- [15] E. Gobes, « Tout ce que vous devez savoir sur les batteries au plomb », *Reichelt Magazin*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.reichelt.com/magazin/fr/conseils/tout-ce-que-vous-devez-savoir-sur-les-batteries-au-plomb/>
- [16] « Lead Acid Battery vs Lithium-ion – Which Is Better for Your Application », *PKENERGY*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.pkenergy.com/news/lead-acid-vs-lithium-ion/>
- [17] « Voiture électrique : comment fonctionne la batterie lithium-ion ? », *Renault Group*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.renaultgroup.com/magazine/energies-et-motorisation/voiture-electrique-comment-fonctionne-la-batterie-lithium-ion/>
- [18] « Comment fonctionne une batterie lithium-ion ? », *Parlons sciences*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-expliquees/comment-fonctionne-une-batterie-lithium-ion>
- [19] « Les batteries au lithium-ion expliquées : types, structure et utilisation », *Y-IC*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.y-ic.fr/blog/briefly-describe-the-specifications,packaging,working-principle,advantages,and-environmental-impact.html>
- [20] « Définition : batterie lithium-ion, qu'est-ce que c'est ? », *Futura*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-batterie-lithium-ion-7303/>
- [21] « La batterie lithium-ion : comment ça marche ? », *Planète Énergies*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/batterie-lithium-ion-comment-ca-marche>

- [22] « Volant d'inertie : système de stockage d'énergie », *Connaissance des Énergies*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/volant-dinertie>
- [23] « Stockage d'énergie : qu'est-ce que le stockage cinétique et son évolution ? », *France Renouvelables*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.france-renouvelables.fr/guide-stockage-energie/stockage-energie-quoi-cinetique-evolution/>
- [24] « Le stockage d'énergie par volant d'inertie », *Planète Énergies*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/stockage-denergie-par-volant-dinertie>
- [25] « Volant de stockage solaire : une piste pour le stockage de l'énergie ? », *Choisir.com*. Consulté le 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.choisir.com/energie/articles/117094/quest-ce-que-le-volant-de-stockage-solaire-voss>
- [26] A. Olabi et al., « Critical Review of Flywheel Energy Storage System », *energies* (MDPI), Vol.14, pp.2-33, 2021, doi 10.3390/en1408219.
- [27] H Flocard et J-P Pervès « Intermittence et foisonnement de l'électricité éolienne en Europe de l'Ouest », *Sauvons le Climat*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sauvonsleclimat.org/fr/ressources/base-doc/intermittence-et-foisonnement>. Consulté le: 2 janvier 2026.
- [28] N. Khezami, « Commande multimodèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence », Thèse de doctorat, École Centrale de Lille & École Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, France/Tunisie, 2011.
- [29] M. Perea « Optimisez votre énergie solaire avec un système de stockage sur batteries », *Prix-Elec*. Consulté le: 2 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://prix-elec.com/energie/solaire/stockage>.
- [30] D. Saheb Koussa, M. Belhamel, et B. Kazed, « Système éolien pour l'alimentation d'une charge à usage domestique », *Revue des Energies Renouvelables*, CDER Alger, vol. 10, N° 1, pp. 127-138, 2007.
- [31] P.J. Jordaens, « Stockage sous-marin de l'énergie éolienne | Éolien offshore », *Sirris*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sirris.be/fr/inspiration/stockage-de-lenergie-eolienne-offshore-dans-un-reservoir-sous-marin>. Consulté le: 2 janvier 2026.
- [32] « Battery Parameters », *Monolithic Power Systems (MPS)*. MPS, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/battery-management->

- [systems/introduction-to-battery-technology/battery-parameters](#). Consulté le: 6 janvier 2026.
- [33] L. Pan, « Signification du taux C dans les batteries au lithium », *Large Power (Large Battery)*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.large-battery.com/fr/blog/c-rate-in-lithium-batteries-meaning-importance-performance/>. Consulté le: 6 janvier 2026.
- [34] O. Tremblay et al « A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicle », IEEE Xplore, 2009.
- [35] M. Ceraolo, « New dynamical models of lead-acid batteries », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.15, N° 4, pp. 1184-1190, 2000, doi: 10.1109/59.898088.
- [36] P. Mauracher et E. Karden, « Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification », *J. Power Sources*, vol.67, N°1, pp. 69-84, 1997, doi: 10.1016/S0378-7753(97)02498-1.
- [37] B. J. Huang, P. C. Hsu, M. S. Wu, et P. Y. Ho, « System dynamic model and charging control of lead-acid battery for stand-alone solar PV system », *Sol. Energy*, vol. 84, N°5, pp. 822-830, 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.02.007.
- [38] V. Koponen, "Comparison of Different Battery Models and Equivalent Circuit Model Optimization", Master of Science in Technology Thesis, University of Turku, Turku, Finland, Jun. 2025.

Chapitre II : Simulation de la charge/décharge d'une batterie Plomb-acide.

I. Introduction

Afin de transformer la ressource éolienne, naturellement variable, en une source d'énergie électrique plus fiable, il est nécessaire de procéder à une modélisation rigoureuse des différents éléments constituant le système étudié. Notre démarche débute par la modélisation du potentiel éolien à l'aide des distributions statistiques de Weibull et de Rayleigh, couramment utilisées pour caractériser le régime des vents et évaluer les ressources énergétiques disponibles. Dans le cadre de cette étude, deux sites algériens présentant des conditions climatiques différentes, Hennaya (Tlemcen) et Adrar, ont été retenus afin d'analyser le comportement du vent et d'évaluer son degré de stabilité dans des environnements distincts.

Ce chapitre est également consacré à la modélisation de l'aérogénérateur, en décrivant les différentes étapes de conversion de l'énergie, depuis la captation de l'énergie cinétique du vent jusqu'à sa transformation en énergie électrique. Une attention particulière sera accordée à l'étude des paramètres influençant les performances de conversion, notamment la vitesse de rotation de la turbine et son impact sur l'efficacité d'extraction de la puissance éolienne.

Par la suite, nous présenterons l'architecture hybride retenue en intégrant un système de stockage basé sur une batterie plomb-acide. L'objectif de cette hybridation est d'améliorer la continuité de l'alimentation énergétique, de compenser les fluctuations de la production éolienne et de contribuer à la stabilité globale du système.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la gestion de l'énergie. Les stratégies de commande et de pilotage mises en œuvre pour assurer une utilisation optimale des ressources de production et de stockage y seront détaillées. Nous présenterons également les mécanismes de supervision et d'évaluation des performances permettant d'améliorer le fonctionnement du système hybride et de garantir son efficacité énergétique à long terme.

II. Modélisation des ressources éoliennes

II.1. Présentation du premier site d'étude

Dans le cadre de cette étude réalisée dans la wilaya de Tlemcen, le site retenu est la zone de Hennaya, qui présente des caractéristiques adaptées à une étude de faisabilité énergétique.

Les coordonnées géographiques du site sont :

- **Latitude** : 34.95° N
- **Longitude** : -1.35° W

La région se distingue par un climat méditerranéen de type (étés chauds et secs), ce qui la caractérise comme un site au profil climatique distinct de celui d'Adrar, situé dans le Sahara algérien. Cette différence de climat est centrale dans votre étude comparative sur l'influence des conditions météorologiques sur la production éolienne.

II.2. Présentation du deuxième site d'étude

Pour des raisons de comparaison on a étudié un autre site qui est situé dans la wilaya d'Adrar, les données ont été toujours été extraites de la base de données météorologique NASA POWER d'une période de temps de 1 janvier 2020 au 31 décembre 2024.

Les coordonnées géographiques du site sont :

- **Latitude** : 27.87° N
- **Longitude** : -0.29° E

Adrar est une ville et une wilaya situées dans le sud-ouest de l'Algérie, au cœur du désert du Sahara. Elle se distingue par un climat saharien extrême, avec des étés torrides et une pluviométrie quasi inexistante.

II.3. Collecte des données de vent

Les données de vitesse du vent utilisées dans cette étude ont été extraites de la base de données météorologique NASA POWER

- La période considérée : janvier 2020 à décembre 2024
- Résolution ; journalière
- Nombre total de points : 1827
- Hauteur de mesure : 50 m

Les vitesses du vent sont exprimées en m/s.

II.4. Analyse statistique des données

La vitesse du vent individuelle est la valeur instantanée et fluctuante mesurée en un point et à un moment donné (en m/s), qui sert de donnée d'entrée dynamique pour la simulation sous MATLAB/Simulink.

La vitesse moyenne du vent est calculée par :

$$v_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (II.1)$$

n : Nombre totale de mesure (1827)

v_i : Vitesse du vent individuelle (m/s)

La valeur obtenue pour la période 2020–2024 est :

Hennaya: $v_{moy} = 5,332316539$ m/s

Adrar: $v_{moy}=6,661866448$ m/s

• Écart-type

Représente la variation du vent (m/s), écart-type=>grand=>vent instable

Il est représenté par cette formule :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - v_{moy})^2} \quad (\text{II.2})$$

Où : N : Nombre totale de mesure (1827)

v_i : Vitesse du vent individuelle

v_{moy} : Vitesse moyenne (m/s)

Hennaya: $\sigma= 2,179256817$ m/s

Adrar: $\sigma= 1,90779013$ m/s

• Histogramme des vitesses du vent

Les histogrammes des vitesses du vent sur la période 2020–2024 des deux sites étudié est présenté dans les figures suivantes :

La figure (III.1) montre que :

- La majorité des vitesses se situent entre 3,29 et 4,53m/s
- Les vitesses extrêmes (> 20 m/s) sont rares

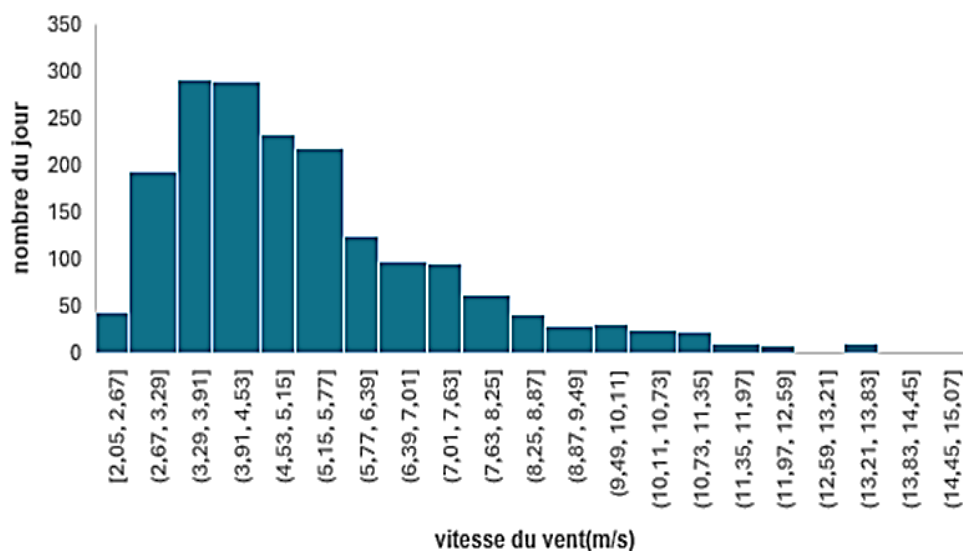


Figure (II.1) : *histogramme des vitesses du vent ay Hennaya*

La figure (III.2) montre les histogrammes de vitesse du vent du site de Adrar montre que la distribution de la vitesse n'est pas uniforme. La concentration importante s'apparaître autour des vitesses moyennes, avec une fréquence maximum de 4 m/s à 7 m/s.

Les vitesses élevées (supérieurs de 10 m/s) apparaissent rarement, tandis que les faibles vitesses (inférieurs de 3 m/s) sont moins fréquentes.

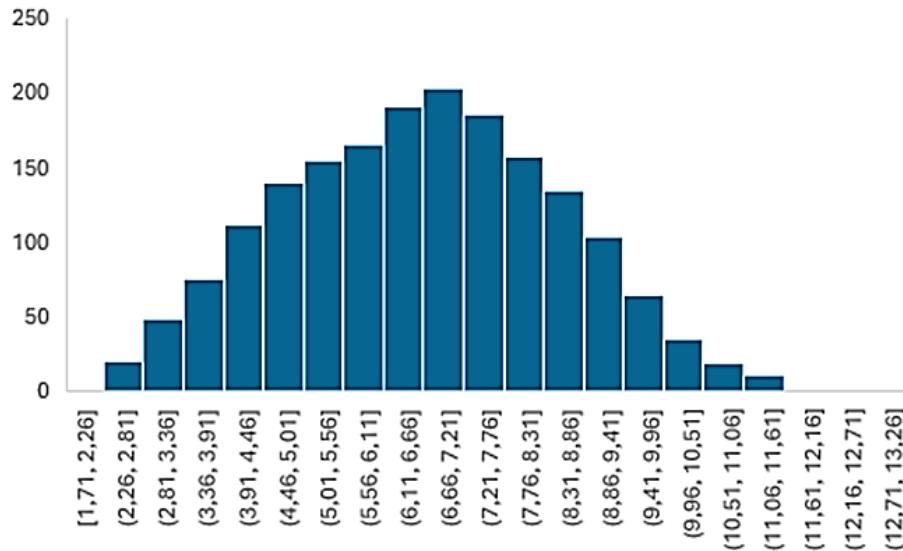


Figure (II.2) : Histogramme des vitesses du vent au Adrar

III. Distribution de Weibull

La distribution de Weibull est une loi de probabilité continue largement utilisée pour la modélisation de la répartition des vitesses du vent. Elle dépend de deux paramètres strictement positifs : le facteur de forme k et le facteur d'échelle c . Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité permettant de décrire la probabilité d'occurrence des différentes vitesses du vent observées sur un site donné. La loi de Weibull facilite l'analyse et le traitement statistique des données éoliennes sur des périodes allant de quelques semaines à plusieurs années. Elle est utilisée pour déterminer le potentiel énergétique d'un site.[1]

Cette distribution est caractérisée par la fonction suivante :

$$P(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (\text{II.3})$$

Où :

- $P(v)$: Densité de probabilité de la vitesse du vent.
- k : Facteur de forme, indiquant la variabilité ou la stabilité du vent.
- c : Facteur d'échelle, lié à la vitesse moyenne du vent (m/s).

Un faible facteur k indique un vent très variable ou irrégulier, tandis qu'une valeur plus élevée de k correspond à un vent plus stable et régulier. Le paramètre c est proportionnel à la vitesse moyenne et caractérise l'intensité du vent sur le site étudié.

Les paramètres k et c peuvent être estimés à partir de la vitesse moyenne et de l'écart-type des données mesurées.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m} \right)^{-1,086} \quad (\text{II.4})$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (\text{II.5})$$

- **Hennaya:**

$$k = 2,642577633$$

$$c = 6,000443855 \text{ m/s}$$

- **Adrar :**

$$k = 3,88838217$$

$$c = 7,36156885$$

La courbe montre que les vitesses du vent les plus probables sont autour de 5m/s.

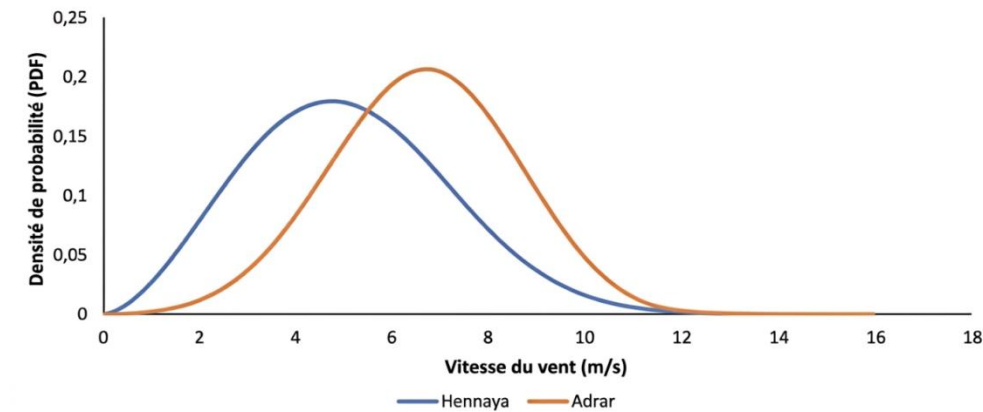


Figure (II.3) : Distribution de Weibull pour les deux sites

III.1. Condition de stabilité du vent

$$CV = \frac{\sigma}{v_{moy}} \quad (\text{II.6})$$

Dand le cas de Hennaya : $CV=0,40 < 0,5$ c'est un site stable.

Dans le cas de Adrar : $CV = 0,28 < 0,5$ c'est un site stable.

Le coefficient de variation calculé sur la période de 5 ans pour les deux sites est égal à 0,40 pour Hennaya et 0,28 pour Adrar. Selon les critères de stabilité climatologique, un $CV < 0,5$ indique un site stable. Dans notre étude, les deux sites sont stables, mais si on va choisir le mieux stable, on va choisir Adrar parce que sa valeur (0,28) est plus loin de 0,5 contrairement à l'autre site de Hennaya (0,40) qui est plus près de la limite 0,5.

Le site d'Adrar présente un potentiel éolien intéressant, ce site est favorable pour une exploitation énergétique car il est caractérisé par des vitesses modérées et relativement stables.

IV. Modélisation mathématique d'un aérogénérateur

Pour cette étude, nous avons choisi la machine synchrone à aimants permanents pour plusieurs raisons. Cette machine est reconnue pour sa fiabilité, sa robustesse et son efficacité élevée. Elle présente également un rendement supérieur par rapport aux autres types de machines électriques. De plus, elle ne nécessite pas de multiplicateur de vitesse, car elle peut être directement couplée aux pales de l'éolienne, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques [2].

L'objectif de la modélisation est de convertir l'énergie cinétique du vent capté en une énergie mécanique puis électrique.

IV.1. Modélisation aérodynamique

➤ Puissance contenue dans le vent

La puissance cinétique du vent traversant le disque du rotor est donnée par :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (II.9)$$

ρ : Densité de l'air [1,225 kg/m³]

S: Surface balayée par le rotor [m²]

V: Vitesse du vent [m/s]

R: Rayon des pales [m]

➤ Puissance réellement extraite par la turbine

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (II.10)$$

C_p : Coefficient de puissance ($\leq 0,593$ – limite de Betz). [1]

λ : Rapport de vitesse de pointe.

β : Angle de calage des pales (pitch).

➤ Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une grandeur fondamentale dans l'étude des aérogénérateurs, il dépend du rapport de vitesse en bout de pale λ et l'angle de calage β [3].

Le rapport λ représente la vitesse relative des pales par rapport à la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (\text{II.11})$$

ω : Vitesse angulaire du rotor [rad/s]

R : Rayon des pales [m]

V : Vitesse du vent [m/s]

β (Angle de pitch) : Angle d'inclinaison des pales pour contrôler la puissance extraite du vent.

IV.2. Modélisation mécanique

➤ Équation fondamentale du mouvement

$$J_{tot} \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - f\omega_r \quad (\text{II.12})$$

Où :

J_{tot} : Inertie totale équivalente du système [kg·m²].

ω_r : Vitesse angulaire du rotor [rad/s].

T_m : Couple mécanique aérodynamique [N.m].

T_e : Couple électromagnétique de la génératrice [N.m].

f : Coefficient de frottement visqueux.

➤ Expression du couple mécanique

Le couple aérodynamique est relié à la puissance mécanique par :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (\text{II.14})$$

➤ Équations électriques

Les équations (II.15) représentent les équations des tensions statoriques dans le repère (d-q) :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \phi_d - \omega \phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \phi_q - \omega \phi_d \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

V_d, V_q : Composantes de la tension au stator dans le repère de Park [V].

i_d, i_q : Composantes du courant au stator dans le repère de Park [A].

ϕ_d, ϕ_q : Composantes du flux au stator dans le repère de Park [Wb].

ω : Vitesse de rotation électrique [rad/s].

R_s : Résistance statorique [Ω].

➤ **Équations des flux magnétiques**

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Où :

L_d, L_q : Inductances statoriques suivant les axes d et q [H].

ϕ_f : Flux créé par les aimants permanents [Wb].

➤ **Équations des tensions statoriques**

En remplaçant les équations de flux magnétique dans les équations électriques nous obtenons les tensions statoriques dans le repère de Park.

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

- R_s : Résistance statorique [Ω].
- ω : Vitesse de rotation électrique [rad/s].

➤ **Couple électromagnétique**

Pour compléter le modèle électromécanique et assurer que la puissance mécanique est transférée vers la batterie on doit ajouter le couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \phi_f] \quad (\text{II.18})$$

P : représente le nombre de paires de pôles de la machine.

➤ **Circuit équivalent de la machine synchrone dans le repère de Park**

Afin de faciliter l'analyse et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, celle-ci est représentée dans le repère tournant de Park (d, q). Cette représentation permet de découpler les grandeurs électriques et de simplifier l'étude de son comportement dynamique ainsi que la conception des stratégies de commande. Le circuit équivalent correspondant est illustré par la figure (II.5).

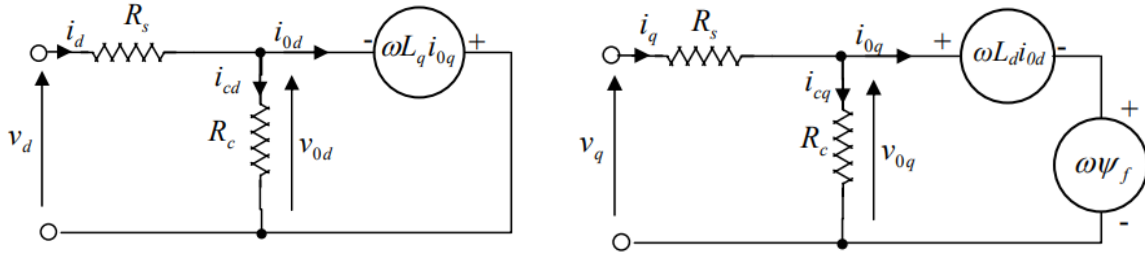


Figure (II.4) : Circuit équivalent de la machine synchrone

V. Architecture d'un système hybride

Un système hybride est un système à sources multiples qui combine au moins deux sources d'énergie. Dans notre cas, on a une source intermittente le vent et une source pilotable (la batterie). Le rôle principal de l'hybridation est d'assurer la satisfaction des besoins énergétiques tout en garantissant la continuité d'alimentation. Ce système peut être autonome (isolé) ou connecté au réseau électrique [4].

L'énergie éolienne fait partie des sources renouvelables les plus compétitives actuellement. Son principe consiste à utiliser un aérogénérateur pour capter l'énergie cinétique du vent, la transformer en énergie mécanique de rotation, puis la convertir en énergie électrique. Généralement on obtient un courant alternatif à la sortie de la génératrice [4].

Pour permettre le stockage de cette énergie, il est nécessaire d'utiliser un système de conversion. Celui-ci est composé d'un redresseur qui convertit le Courant Alternatif (AC) en Courant Continu (CC), puis d'un régulateur de tension (ou convertisseur CC/CC) qui adapte la tension à un niveau compatible avec la charge de la batterie [5].

Le système de stockage est constitué, dans cette étude, d'une batterie Plomb-acide. Cette solution permet de pallier le problème d'intermittence du vent et d'assurer la continuité énergétique lorsque la production éolienne est insuffisante [6].

VI. Batterie Plomb-acide

Comme nous l'avons souligné, le stockage d'énergie constitue la solution principale pour pallier l'intermittence du vent. La batterie plomb-acide est un système de stockage électrochimique où les opérations de charge et de décharge s'effectuent à travers des réactions chimiques réversibles [7]. Ces opérations sont caractérisées par la formule suivante :

$$v_{bat} = v_{oc} \pm R_{int} \cdot I \quad (II.19)$$

Signe (+) : mode de charge

Signe (-) : mode décharge

Le SOC est un paramètre essentiel de la modélisation, car il représente le pourcentage de charge disponible dans la batterie. Ce paramètre permet également de protéger la batterie en évitant les surcharges et les décharges profondes [8] :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t (\eta \cdot I) dt \quad (II.20)$$

C_n : Capacité nomina de la batterie [Ah].

η : Rendement.

VII. Simulation de système hybride éolienne-batterie

Le système a été modélisé dans l'environnement MATLAB/Simulink (Figure II.6), en recourant à des blocs de puissance discrets afin de représenter de manière fidèle le comportement des différents composants électroniques [2].

La Figure II.6 illustre l'architecture globale du modèle développé sous MATLAB/Simulink. Celle-ci a été conçue dans une logique de suivi rigoureux du flux énergétique, depuis sa source primaire jusqu'à son stockage, en passant par plusieurs étages fonctionnels interconnectés, organisés en trois sous-systèmes principaux :

- **Production éolienne (côté alternatif)** : La chaîne énergétique débute au niveau de la turbine éolienne (Wind Turbine), couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP). Un profil de vent variable y est appliqué afin de reproduire les conditions réelles d'exploitation et de générer des tensions alternatives triphasées.
- **Étape d'adaptation et de commande (côté continu)** : L'énergie produite est ensuite acheminée vers un pont redresseur à diodes (Universal Bridge), assurant la conversion du courant alternatif en courant continu. Dans le but d'optimiser l'extraction de puissance, un hacheur de type Buck a été intégré et piloté par un bloc MATLAB Function implémentant l'algorithme MPPT Perturb & Observe (P&O), garantissant ainsi un fonctionnement proche du point de puissance maximale.
- **Stockage de l'énergie (bus continu)** : En aval de la chaîne énergétique, le système est relié à un banc de batteries plomb-acide 48 V via un filtre RLC et un disjoncteur (Breaker). Cette configuration permet d'assurer la stabilisation du bus continu tout en permettant le suivi en temps réel des grandeurs électriques essentielles, notamment le courant, la tension, ainsi que l'état de charge (SOC) de la batterie.

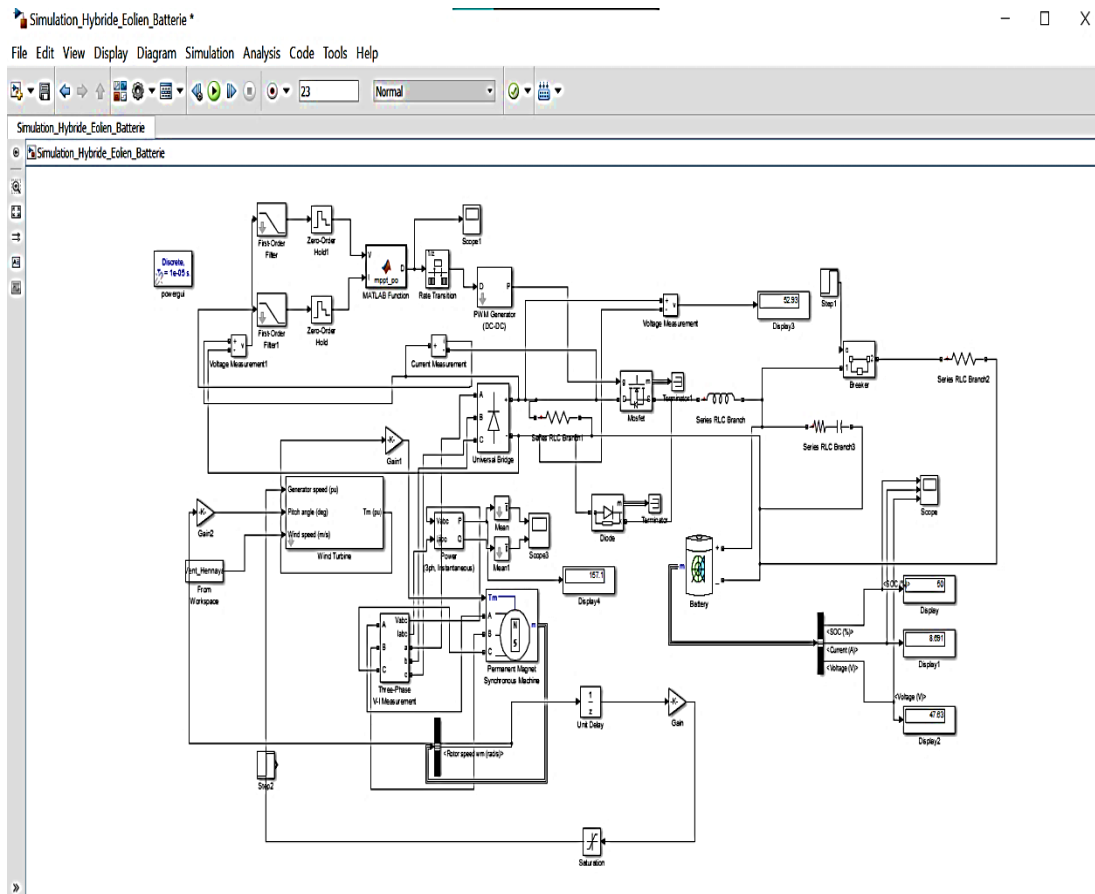


Figure (II.5) : Schéma de simulation dans Matlab/Simulink

VIII. Stratégie de gestion de l'énergie

Le Système de Management de l'Énergie (SME) constitue un dispositif structurant permettant aux organisations d'analyser, de surveiller et de piloter leur consommation énergétique en temps réel. Il offre ainsi la possibilité d'identifier les gisements d'optimisation et de s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue de la performance énergétique [9].

Il convient de distinguer le SME (Système de Management de l'Énergie) de l'EMS (Energy Management System). Dans le cadre de la présente étude, le SME renvoie à une démarche organisationnelle structurée, encadrée par la norme ISO 50001, dont l'objectif est l'amélioration durable et mesurable de la performance énergétique de l'entreprise [10].

La mise en œuvre effective d'un SME repose sur plusieurs étapes fondamentales. La première consiste en la réalisation d'un diagnostic énergétique approfondi. Bien au-delà d'une simple exigence réglementaire, celui-ci constitue un véritable outil d'aide à la décision, permettant de transformer des données brutes de consommation en un plan d'actions hiérarchisé et économiquement pertinent. Cette étape vise simultanément à assurer la conformité environnementale et à éviter les investissements non optimisés [11].

S'ensuivent les phases de déploiement, de suivi et d'amélioration continue, qui marquent le passage d'une gestion énergétique ponctuelle à un pilotage dynamique, structuré et digitalisé. Cette approche s'appuie sur les principes directeurs de la norme ISO 50001, notamment le cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act), lequel permet de convertir les actions correctives immédiates en gains durables et pérennes de performance énergétique [11].

Par ailleurs, l'EMS constitue l'outil technique opérationnel permettant d'exécuter les exigences définies par le SME. Il automatise un processus continu de type « surveillance – prévision, optimisation », reposant sur des plateformes intelligentes capables d'analyser les flux énergétiques en temps réel. Cette automatisation contribue à garantir des gains simultanément économiques et environnementaux, tout en renforçant la rentabilité énergétique et la durabilité des installations, à l'échelle d'un site industriel ou d'un ensemble de sites interconnectés [12].

En définitive, la gestion de l'énergie ne saurait être réduite à une simple démarche technique ; elle s'impose comme une stratégie globale à forte valeur ajoutée, conjuguant enjeux financiers, environnementaux, opérationnels et réglementaires :

- **Économie** : réduction significative des coûts énergétiques grâce à l'amélioration de l'efficacité, entraînant une diminution directe des charges d'exploitation.
- **Écologie** : contribution à la réduction de l'empreinte carbone et des émissions de gaz à effet de serre.
- **Performance** : optimisation des procédés industriels et amélioration de la productivité par une utilisation rationnelle de l'énergie.
- **Légalité** : conformité aux exigences normatives et réglementaires nationales et internationales en vigueur [13].

IX. CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'établir les fondements mathématiques et numériques nécessaires à la conduite de notre étude. Dans un premier temps, une analyse approfondie du potentiel éolien des sites de Hennaya et d'Adrar a été réalisée. L'exploitation des distributions statistiques de Weibull et de Rayleigh a permis de caractériser les régimes de vent de ces deux régions et d'évaluer leur potentiel énergétique ainsi que leur degré de stabilité.

Dans un second temps, une modélisation rigoureuse de l'aérogénérateur a été développée afin de représenter fidèlement son comportement dynamique et ses performances de conversion énergétique. Parallèlement, le modèle de la batterie plomb-acide a été élaboré en tenant

compte de l'évolution de son état de charge (SOC), garantissant ainsi une gestion fiable et sécurisée du stockage d'énergie.

Enfin, l'ensemble des modèles développés a été intégré sous l'environnement MATLAB/Simulink afin de constituer une plateforme complète de simulation du système hybride. Cette étape a permis de valider l'architecture globale du système et de mettre en place les bases de la stratégie de gestion énergétique qui sera étudiée et évaluée dans les chapitres suivants.

Bibliographie

- [1] A. Benfekir, F. Z. Ghazli and A. Hassini, "Modélisation, dimensionnement et estimation de production d'un parc éolien dans la région d'Oran", Oran 2 University Journal, vol. 8, No. 1, pp. 36–45, July 2023.
- [2] N. Benakli and R. Idir, "Étude d'un système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents double étoile", Mémoire de Master, Univ. Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2021.
- [3] L. Qi, L. Zheng, X. Bai, Q. Chen, J. Chen and Y. Chen, "Nonlinear maximum power point tracking control method for wind turbines considering dynamics", Applied Sciences, vol. 10, no. 3, p. 811, 2020.
- [4] R. Chakor, "Modélisation, simulation et analyse d'un système de stockage hybride photovoltaïque-éolien dans un site isolé", Mémoire de Master, Univ. Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 2021.
- [5] France Renouvelables, "Énergie éolienne : comment convertir le vent en électricité ?", [En ligne]. Disponible : <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-eolienne/energie-eolienne-comment-convertir-vent-electricite/>. [Consulté le : 27 février 2026].
- [6] H. Rezk, S. Ferahtia, R. M. Ghoniem, A. Fathy, M. M. Ghoniem and R. Alkanhel, "Robust parameter identification strategy for lead acid battery model", Batteries, vol. 8, no. 12, p. 283, 2022, doi: 10.3390/batteries8120283.
- [7] Révolution Énergétique, "Comment fonctionne une batterie plomb-acide ?", [En ligne]. Disponible : <https://www.revolution-energetique.com/fiches-pedagogiques/comment-fonctionne-une-batterie-plomb-acide/>. [Consulté le : 2 janvier 2026].
- [8] Monolithic Power Systems, "Battery parameters", [En ligne]. Disponible : <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/battery-management-systems/introduction-to-battery-technology/battery-parameters>. [Consulté le : 6 janvier 2026].
- [9] Altyn Groupe, "Management de l'énergie : un levier pour la durabilité des organisations", [En ligne]. Disponible : <https://www.altyn-groupe.com/le-blog-altyn/management-energie-durabilite-organisations>. [Consulté le : 11 avril 2026].
- [10] Greenaffair, "L'Energy Management : un levier pour l'efficacité énergétique", [En ligne]. Disponible : <https://www.greenaffair.com/conseil-efficacite-energetique/energy-management/>. [Consulté le : 11 avril 2026].
- [11] Big média, "Energy management : outils et stratégies pour un impact durable", [En ligne]. Disponible : <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/energy-management-outils-et-strategies-pour-un-impact-durable>. [Consulté le : 11 avril 2026].

[12] ABB Industrial Software, "Industrial energy management and optimization software", [En ligne]. Disponible : <https://new.abb.com/industrial-software/sustainability/energy-management-system-ems>. [Consulté le: 11 Avril 2026].

[13] Accruent, "Energy management: everything you need to know", [En ligne]. Disponible : <https://www.accruent.com/resources/blog-posts/energy-management>. [Consulté le : 11 avril 2026].

Chapitre III : Résultats et discussion

I. Introduction

Après le développement, dans les chapitres précédents, les bases théoriques et les modèles mathématiques relatifs à l'aérogénérateur, à la batterie plomb-acide ainsi qu'aux convertisseurs statiques, nous abordons dans ce chapitre la phase de simulation et de validation numérique du système étudié sous l'environnement MATLAB/Simulink.

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer et de comparer les performances du système hybride éolienne–batterie dans des conditions de fonctionnement réelles. Pour ce faire, deux sites algériens présentant des caractéristiques éoliennes distinctes, Hennaya et Adrar, ont été retenus comme cas d'étude. À partir de profils de vent représentatifs de ces régions, plusieurs simulations sont réalisées afin d'analyser le comportement dynamique du système et les échanges énergétiques entre ses différents composants.

Une attention particulière est portée à l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie, à la dynamique des courants de charge et de décharge, ainsi qu'à la capacité du système à absorber les fluctuations de la puissance éolienne. Les résultats obtenus permettront d'apprécier l'efficacité du dispositif de stockage dans l'amélioration de la stabilité énergétique du système et de mettre en évidence l'influence des conditions de vent sur ses performances globales.

II. Validation du modèle Simulink

II.1. Réponse de la chaîne de conversion éolienne

La première étape de validation consiste à analyser la dynamique de la chaîne de conversion éolienne, constituée de la turbine et de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP). Afin d'évaluer son comportement énergétique, un profil de vitesse de vent de type échelon a été appliqué, permettant d'observer l'évolution de la puissance électrique produite. Dans ce cadre, la vitesse du vent est initialement fixée à 12 m/s, puis brusquement réduite à 8 m/s à l'instant $t = 2$ s.

Les résultats de simulation montrent que la puissance électrique générée suit fidèlement les variations de la vitesse du vent. Une diminution nette de la puissance est constatée suite à la perturbation imposée, mettant en évidence la forte dépendance de la production énergétique aux conditions aérodynamiques. Cette réponse traduit le bon couplage entre la turbine et la GSAP, ainsi que l'efficacité du processus de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Par ailleurs, la dynamique du système demeure stable, ce qui confirme les performances satisfaisantes de l'ensemble chaîne turbine–génératrice.

II.2. Validation du fonctionnement du convertisseur CC-CC

La chaîne de conversion électrique intègre un redresseur triphasé à diodes assurant la conversion alternatif–continu, suivi d’un convertisseur continu–continu de type Buck, piloté par un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basé sur la méthode Perturb and Observe (P&O). Ce convertisseur joue un rôle déterminant dans l’adaptation de l’énergie issue de la génératrice aux exigences du système de stockage.

Son comportement a été évalué à travers l’analyse du rapport cyclique (duty cycle) ainsi que de la tension de sortie. Les résultats obtenus en simulation révèlent que le rapport cyclique s’ajuste de manière continue aux variations des conditions de fonctionnement, tout en demeurant dans une plage de stabilité satisfaisante. Cette régulation assure un transfert énergétique optimal vers la batterie et contribue significativement à l’amélioration des performances globales du système hybride.

II.3. Dynamique de la batterie

Le système de stockage énergétique retenu est une batterie plomb-acide de tension nominale de 48 V. Son comportement dynamique a été étudié à travers l’évolution simultanée du courant, de la tension et de l’état de charge (State of Charge – SOC).

Les résultats de simulation mettent en évidence les différentes phases de charge et de décharge de la batterie, reflétant fidèlement les échanges énergétiques au sein du système global. La stabilité de la tension aux bornes du stockage, associée à une évolution cohérente et progressive du SOC, confirme la pertinence du modèle développé. Celui-ci reproduit avec réalisme le comportement d’une batterie intégrée à une chaîne de conversion éolienne. Ces résultats attestent également du rôle central du système de stockage dans l’équilibrage et la gestion de l’énergie produite par l’ensemble du dispositif.

III. Application du Modèle aux Sites d’Étude (Adrar vs Hennaya)

Pour évaluer le comportement dynamique et la robustesse du système de stockage par batterie plomb-acide couplée à l’aérogénérateur, deux scénarios distincts ont été implémentés sous l’environnement MATLAB/Simulink. Ces scénarios exploitent les profils de vent réels issus des relevés des sites de Hennaya et d’Adrar.

III.1 Scénario de simulation pour le site de Hennaya

Ce premier scénario met clairement en évidence la capacité du système à assurer une gestion bidirectionnelle de l’énergie, en basculant automatiquement entre les modes de stockage et de déstockage en fonction de la disponibilité de la ressource éolienne locale.

Phase de charge

Au cours des onze premières secondes de la simulation, correspondant aux onze premiers jours du profil éolien considéré, le site de Hennaya bénéficie de conditions de vent particulièrement favorables. La vitesse du vent demeure constamment élevée, variant entre 10,31 m/s et 13,97 m/s. Dans ces conditions, l'aérogénérateur fonctionne au-delà de sa vitesse nominale, ce qui lui permet de produire une puissance électrique largement supérieure à la demande imposée par la charge.

L'excédent énergétique généré est alors pris en charge par la stratégie de contrôle du hacheur bidirectionnel, qui l'achemine vers le système de stockage. Cette situation se traduit par l'apparition d'un courant batterie de signe négatif, évoluant principalement entre 0 A et -10 A. Cette polarité caractérise le fonctionnement de la batterie en mode charge, c'est-à-dire en tant que récepteur d'énergie. Les fluctuations observées sur le courant suivent fidèlement les variations de la vitesse du vent, notamment lors des rafales enregistrées aux instants $t = 5$ s (13,97 m/s) et $t = 8$ s (13,72 m/s).

Cette accumulation progressive d'énergie se reflète directement sur l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie. À partir d'une valeur initiale de 50 %, le SOC augmente de manière continue pour atteindre approximativement 50,015 % à la onzième seconde de simulation.

Phase de décharge

À partir de la douzième seconde, une dégradation significative des conditions météorologiques est observée. La vitesse du vent chute brutalement jusqu'à 4,46 m/s à l'instant $t = 12$ s, puis se maintient à des niveaux particulièrement faibles, oscillant autour de 3 m/s et atteignant une valeur minimale de 2,39 m/s à $t = 19$ s.

Dans ces conditions, la puissance délivrée par l'aérogénérateur devient insuffisante pour satisfaire la demande de la charge. Afin de compenser ce déficit énergétique et de préserver la continuité d'alimentation du système, la batterie bascule instantanément en mode décharge.

Cette transition est clairement visible sur la courbe du courant batterie, dont la polarité s'inverse dès la diminution de la ressource éolienne. Le courant devient alors positif et se stabilise rapidement autour de +10 A, indiquant que la batterie fournit désormais de l'énergie au bus continu pour soutenir la charge.

En conséquence, l'état de charge de la batterie amorce une décroissance progressive et quasi linéaire tout au long de cette phase. Le SOC passe ainsi de sa valeur maximale atteinte en fin de charge à environ 49,99 % à l'issue des 22 secondes de simulation.

Comportement de la tension du bus continu

Le troisième tracé de la Figure (III.1) représente l'évolution de la tension du bus continu associée au système de stockage. Hormis le régime transitoire observé au démarrage de la simulation ($t = 0$ s), la tension demeure remarquablement stable et régulée autour de sa valeur nominale de 48 V durant toute la période d'étude.

Cette excellente stabilité est maintenue aussi bien pendant la phase de charge caractérisée par un excédent de production éolienne que lors du passage brusque au mode décharge consécutif à la chute du vent. Ce comportement atteste de la performance des algorithmes de commande intégrés au hacheur bidirectionnel ainsi que de l'efficacité des boucles de régulation mises en œuvre. Les résultats obtenus démontrent ainsi la capacité du système à atténuer efficacement les fluctuations de la ressource éolienne du site de Hennaya, tout en garantissant la stabilité énergétique et la sécurité de fonctionnement du réseau électrique alimenté.

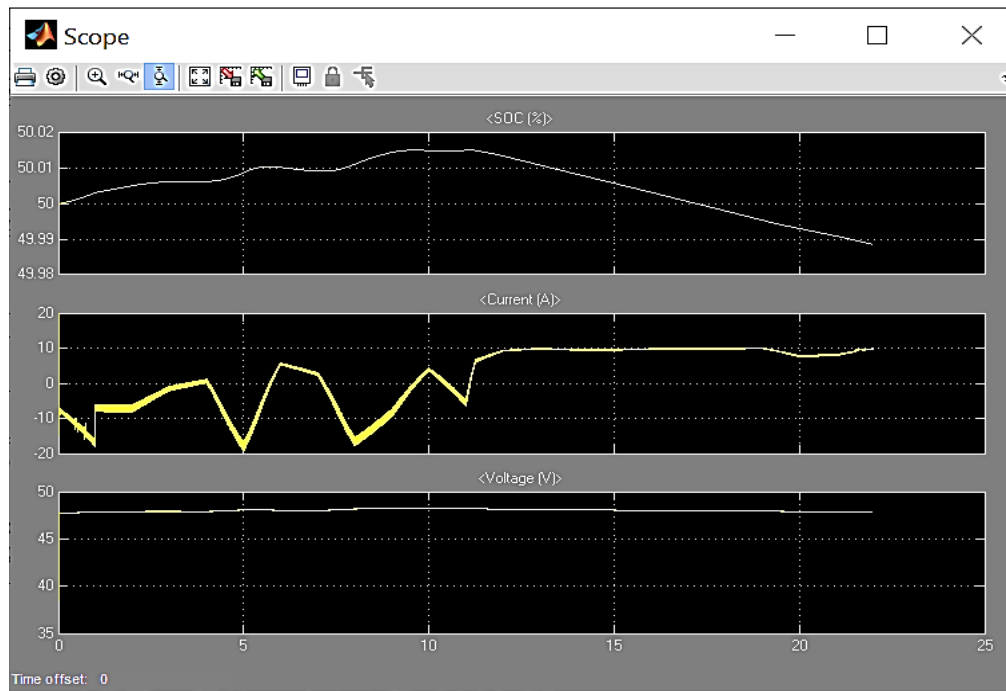


Figure (III.1) : Évolution du SOC, du courant et de la tension de la batterie (Hennaya)

III.2 Scénario de simulation pour le site d'Adrar

L'analyse des résultats obtenus pour le site d'Adrar met en évidence un comportement énergétique sensiblement différent de celui observé à Hennaya. Celui-ci se caractérise principalement par une sollicitation prédominante de la batterie en mode décharge afin d'assurer le soutien énergétique de la charge et le maintien de l'équilibre du système. Cette dynamique résulte directement de l'évolution du profil éolien injecté dans le modèle et des réponses temporelles enregistrées sur les courbes de simulation.

Phase de charge

Au début de la simulation, entre 0 s et 3,5 s, correspondant aux premiers jours du profil éolien réel, le site d'Adrar bénéficie d'un potentiel éolien particulièrement favorable. Les vitesses de vent enregistrées sont initialement élevées, atteignant 11,19 m/s à l'instant $t = 0$ s, puis un maximum de 12,98 m/s à $t = 2$ s, avant de se maintenir à 12,71 m/s à $t = 3$ s.

Durant cette courte période, la puissance électrique produite par l'aérogénérateur excède les besoins de la charge. Le système de gestion énergétique, piloté par le hacheur bidirectionnel, oriente alors automatiquement l'excédent de puissance vers la batterie plomb-acide afin d'en assurer la recharge.

Cette phase de stockage se traduit par l'apparition d'un courant négatif aux bornes de la batterie, atteignant approximativement -10 A, ce qui confirme l'absorption de l'énergie produite en surplus. En conséquence, l'état de charge (SOC) évolue progressivement à la hausse à partir de sa valeur initiale de 50 %, pour atteindre un maximum transitoire de 50,006 % aux alentours de $t = 3,5$ s.

Phase de décharge

À partir de $t = 4$ s, les conditions de vent se dégradent sensiblement. La vitesse chute à 9,12 m/s puis diminue davantage jusqu'à 7,44 m/s à $t = 5$ s. Par la suite, elle oscille autour de 9 m/s avant d'atteindre sa valeur minimale de 2,9 m/s à $t = 17$ s, pour terminer à 4,51 m/s à la fin de la simulation.

Dans ces conditions, la puissance fournie par l'aérogénérateur devient insuffisante pour satisfaire la demande énergétique de la charge. Afin de compenser ce déficit de production et de maintenir l'équilibre entre la puissance générée et la puissance consommée, la batterie bascule durablement en mode décharge.

Cette transition est clairement observable sur la courbe du courant de batterie. À partir de $t = 3,5$ s, le courant traverse le zéro et devient positif, traduisant l'inversion du flux énergétique. Il augmente ensuite rapidement pour se stabiliser dans une plage comprise entre +5 A et +10 A. La batterie joue alors pleinement son rôle de source auxiliaire en fournissant l'énergie nécessaire pour pallier l'insuffisance de la production éolienne.

Cette fourniture continue d'énergie entraîne une diminution progressive de l'état de charge. Dès la quatrième seconde, la courbe du SOC présente une décroissance quasi linéaire qui se poursuit jusqu'à la fin de la simulation. La capacité énergétique stockée passe ainsi de son maximum transitoire à une valeur finale d'environ 49,967 % à $t = 22$ s.

Stabilité de la tension du bus continu

L'analyse de la tension du bus continu, représentée sur le tracé inférieur de la figure III.2, met en évidence une excellente qualité de régulation. Après l'amortissement du régime transitoire initial associé au démarrage de la simulation, la tension se stabilise rapidement autour de sa valeur nominale de 48 V et demeure pratiquement constante durant toute la période d'observation.

Cette remarquable stabilité est maintenue malgré l'inversion du sens du courant observée vers $t = 3,5$ s ainsi que les importantes fluctuations de la ressource éolienne. Ces résultats confirment l'efficacité des stratégies de commande mises en œuvre au sein de l'association aérogénérateur–batterie. Le système de stockage assure ainsi pleinement sa double fonction : compenser les déficits temporaires de production et garantir la stabilité électrique du réseau en maintenant la tension du bus continu à sa valeur de référence.

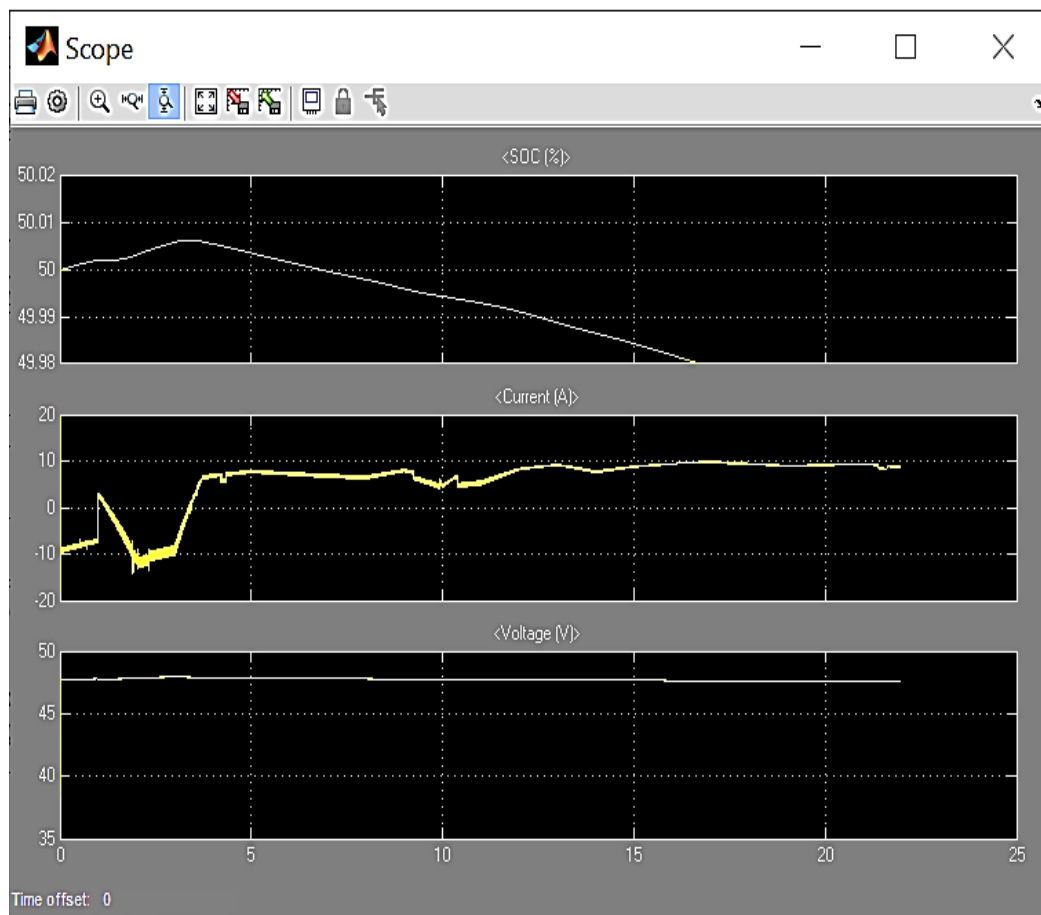


Figure (III.2) : Évolution du SOC, du courant et de la tension de la batterie (Adrar)

IV. Analyse comparative des performances sur les deux sites

Afin de dresser un bilan global du comportement de notre système de stockage face à des régimes de vent distincts, une étude comparative a été menée. Le tableau (III.1) synthétise les principaux critères d'évaluation extraits des simulations de Hennaya et d'Adrar.

Critères d'évaluation	Site d'Adrar	Site de Hennaya
Durée de la phase de charge	3,5 s	11 s
Durée de la phase de décharge	~18,5 s	~11 s
Variation totale du SOC	~0,033%	~0,02%
Comportement du courant (I_b)	Stable après 4 s	Oscillant sur tout l'horizon
Stabilité de la tension (V_b)	Rigoureusement stable à 48 V	Rigoureusement stable à 48 V

Tableau (III.3) : Comparaison des paramètres dynamiques du système de stockage

IV.1 Discussion et interprétation des résultats comparatifs

L'analyse croisée des résultats obtenus met clairement en évidence l'influence déterminante du potentiel éolien local sur le dimensionnement opérationnel du système hybride ainsi que sur le niveau de sollicitation des dispositifs de stockage d'énergie.

IV.1.1 Dynamique des cycles de charge et de décharge

Le site de Hennaya se distingue par un profil énergétique remarquablement équilibré, caractérisé par une alternance quasi symétrique entre une phase de charge de 11 secondes et une phase de décharge de même durée. Cette répartition traduit une succession régulière des périodes d'excédent et de déficit de production éolienne. À l'inverse, le site d'Adrar présente une dynamique nettement plus contraignante, marquée par une phase de charge relativement courte de 3,5 secondes, suivie d'une période de décharge prolongée atteignant 18,5 secondes. Cette configuration révèle que, pour le profil de vent considéré, l'aérogénérateur fonctionne majoritairement en situation de sous-production vis-à-vis de la demande énergétique, imposant ainsi une contribution quasi permanente de la batterie afin d'assurer l'équilibre énergétique du système.

IV.1.2 Amplitude des variations de l'état de charge (SOC)

En cohérence avec la durée respective des phases de fonctionnement, l'évolution de l'état de charge de la batterie est plus marquée sur le site d'Adrar, où la variation du SOC atteint 0,033 %, contre seulement 0,02 % pour le site de Hennaya. Bien que ces fluctuations demeurent limitées à l'échelle temporelle de la simulation, leur extrapolation sur la durée réelle

correspondant aux vingt-trois jours du profil étudié met en évidence une sollicitation plus importante du système de stockage à Adrar. Cette situation est susceptible d'engendrer des cycles de décharge plus profonds et plus fréquents, susceptibles d'accélérer le vieillissement électrochimique de la batterie et de réduire sa durée de vie opérationnelle.

IV.1.3 Comportement du courant et niveau de sollicitation du hacheur bidirectionnel

Une différence notable apparaît également dans la morphologie des courbes de courant observées sur les deux sites. À Hennaya, le courant présente de fortes oscillations durant la phase de charge, reflétant directement les fluctuations du régime éolien. Dans ce contexte, le système de commande du hacheur bidirectionnel est continuellement amené à ajuster son rapport cyclique afin de maintenir les performances du système. En revanche, sur le site d'Adrar, après la transition observée aux environs de la quatrième seconde, le courant évolue vers un régime plus stable et quasi permanent. Cette régularité réduit les variations rapides de puissance et contribue à limiter les contraintes thermiques et électriques imposées aux composants semi-conducteurs du convertisseur, favorisant ainsi leur fiabilité et leur longévité.

IV.1.4. Régulation de la tension du bus continu

L'un des résultats les plus significatifs de cette étude réside dans l'excellente stabilité de la tension du bus continu, maintenue à sa valeur nominale de 48 V dans les deux configurations étudiées. Malgré des comportements énergétiques fortement contrastés, caractérisés par des oscillations soutenues à Hennaya et par une inversion rapide suivie d'un régime stabilisé à Adrar, les stratégies de commande du hacheur bidirectionnel assurent efficacement la régulation du système. Cette performance témoigne de la robustesse des boucles de contrôle mises en œuvre, capables de garantir la continuité et la qualité de l'alimentation électrique en dépit des variations importantes de la ressource éolienne.

V. Evaluation de la stabilité électrique du système

L'analyse de la stabilité globale du système hybride (aérogénérateur–batterie) s'appuie principalement sur l'évolution de la tension du bus continu, laquelle constitue l'indicateur fondamental de l'équilibre instantané des flux de puissance au sein de l'architecture étudiée.

Les résultats issus des simulations réalisées sur les deux sites considérés, à savoir Hennaya et Adrar, attestent de la robustesse du modèle électrique selon trois axes d'analyse essentiels :

- **Robustesse vis-à-vis des perturbations climatiques :**

Malgré des variations importantes et continues des profils de vent injectés, notamment des chutes abruptes de vitesse observées à $t = 11$ s pour Hennaya et à $t = 4$ s pour Adrar, la tension du bus continu demeure remarquablement stable. Aucune déviation significative, ni sous-tension ni surtension critique, n'est observée, ce qui traduit une excellente capacité d'adaptation du système face aux aléas de la ressource éolienne.

- **Comportement dynamique lors des commutations énergétiques**

Le basculement de la batterie entre les modes de charge (récepteur) et de décharge (générateur) constitue une sollicitation transitoire particulièrement contraignante pour le système. Néanmoins, les résultats de simulation montrent que le hacheur bidirectionnel assure une transition parfaitement fluide entre ces états, en maintenant la tension du bus à sa valeur nominale de 48 V, sans apparition d'oscillations persistantes ni instabilités dynamiques.

- **Amortissement du régime transitoire de démarrage**

Le pic initial observé à l'instant $t = 0$ s, attribué aux phénomènes d'établissement liés à l'initialisation des éléments inductifs et capacitifs dans l'environnement Simulink, est rapidement amorti. Le système converge vers son régime permanent en moins de 0,5 seconde, ce qui témoigne d'une dynamique transitoire bien maîtrisée.

Ces résultats confirment, de manière globale, que les boucles de régulation mises en œuvre garantissent une stabilité dynamique rigoureuse du système hybride. Cette performance est déterminante pour assurer à la fois la qualité de l'énergie délivrée et la préservation de la durée de vie des équipements électriques connectés.

VI. Choix du site et aide à la décision

VI.1. Synthèse technico-environnementale : Quel site offre le meilleur rendement ?

L'analyse comparative des deux sites, réalisée à partir de profils de vent réels appliqués à un aérogénérateur de 500 W, met en évidence des différences significatives de comportement énergétique et fournit des éléments déterminants pour l'évaluation de leur aptitude à accueillir un système hybride éolien-stockage.

- **Site de Hennaya**

Pour la période d'étude considérée, correspondant à un profil de 23 jours, le site de Hennaya présente les performances les plus favorables en matière d'exploitation directe de l'énergie éolienne. En effet, durant environ 11 jours, la vitesse du vent demeure dans la plage nominale de fonctionnement de l'aérogénérateur (10 à 14 m/s), permettant à celui-ci d'opérer à sa puissance optimale pendant près de la moitié de la période simulée. Cette disponibilité

énergétique soutenue génère un excédent de production régulier, assurant la recharge de la batterie dans des conditions favorables tout en limitant les cycles de sollicitation excessifs, ce qui contribue à préserver sa durée de vie et à améliorer la stabilité globale du système.

- **Site d'Adrar**

Bien que la région d'Adrar soit généralement reconnue pour l'importance de son potentiel éolien, le profil temporel spécifique retenu dans cette étude révèle une évolution moins favorable. Après une phase initiale de forte production, la vitesse du vent décroît rapidement et passe sous le seuil nécessaire à la couverture de la charge dès les premières 3,5 journées de la simulation. Cette diminution entraîne une baisse notable de la contribution directe de l'aérogénérateur à l'alimentation du système. En conséquence, la batterie devient la principale source d'énergie durant la majeure partie de la période étudiée, le système fonctionnant en mode décharge pendant environ 84 % du temps. Cette configuration traduit une dépendance accrue vis-à-vis du stockage et met en évidence l'influence déterminante de la variabilité temporelle de la ressource éolienne sur les performances énergétiques globales du système.

I.1. Aide à la décision : Pour une petite éolienne de 500 W, le site de Hennaya s'avère être le choix le plus rentable et le plus sûr à court terme, car il offre une meilleure adéquation directe entre la production éolienne et la charge, limitant ainsi le vieillissement prématuré de la batterie. Le site d'Adrar, bien que très prometteur, ne peut pas être exploité efficacement avec une configuration aussi réduite sans surdimensionner massivement le parc de stockage.

VII. Recommandations technico-économiques pour le dimensionnement

Les résultats obtenus à travers les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink permettent de dégager plusieurs recommandations techniques visant à améliorer le dimensionnement, la fiabilité et les performances globales du système hybride étudié. Ces recommandations tiennent compte des spécificités énergétiques observées sur chacun des deux sites analysés.

VII.1. Recommandations pour le site d'Adrar : Renforcement de la capacité de stockage

VII.1.1 Augmentation de la capacité nominale du banc de batteries

L'analyse des résultats met en évidence une phase de décharge prolongée de l'ordre de 18,5 secondes, accompagnée d'une diminution plus marquée de l'état de charge (SOC), atteignant environ 0,033 %. Cette sollicitation accrue du système de stockage traduit une insuffisance relative de la capacité énergétique disponible face aux périodes de faible production éolienne. Dans cette perspective, il apparaît judicieux d'augmenter la capacité nominale du banc de batteries plomb-acide. Une telle mesure permettrait de réduire la

profondeur de décharge (Depth of Discharge – DoD), d’atténuer les contraintes électrochimiques imposées aux accumulateurs et, par conséquent, d’accroître significativement leur durée de vie ainsi que leur fiabilité opérationnelle.

VII.1.2 Hybridation de la production par intégration photovoltaïque

Compte tenu du potentiel solaire exceptionnel dont bénéficie la région d’Adrar tout au long de l’année, l’intégration d’un générateur photovoltaïque en complément de l’aérogénérateur de 500 W constitue une solution particulièrement pertinente. La mise en œuvre d’un système hybride photovoltaïque-éolien permettrait de compenser les déficits de production observés durant les périodes de faibles vitesses de vent. Cette complémentarité entre les ressources solaire et éolienne contribuerait à améliorer la continuité de l’alimentation énergétique, à réduire la sollicitation du système de stockage et à renforcer la stabilité globale de l’installation.

VII.2 Recommandations pour le site de Hennaya : Optimisation du contrôle et de la gestion énergétique

VII.2.1 Amélioration du filtrage des courants de charge

Les simulations ont révélé une forte variabilité du courant de charge, directement liée aux fluctuations rapides de la ressource éolienne. Ces oscillations entraînent l’apparition de micro-cycles de charge et de décharge susceptibles d’accélérer le vieillissement prématuré des batteries. Afin de limiter ces phénomènes, il est recommandé de renforcer le filtrage sur le bus continu par l’intégration d’une capacité de filtrage plus élevée ou, alternativement, d’optimiser la stratégie de commande du hacheur bidirectionnel. L’objectif est d’assurer un lissage plus efficace du courant injecté dans la batterie, réduisant ainsi les contraintes électriques et améliorant la qualité de la gestion énergétique.

VII.2.2. Mise en œuvre d’une gestion thermique adaptée

Les variations importantes du courant de charge, pouvant atteindre des valeurs de l’ordre de -10 A , sont susceptibles de provoquer des élévations locales de température au sein du banc de batteries sous l’effet des pertes Joule. À long terme, ces contraintes thermiques peuvent affecter les performances et la durée de vie des accumulateurs. Il est donc recommandé de prévoir un système de gestion thermique approprié, qu’il soit passif (dissipateurs thermiques, ventilation naturelle) ou actif (ventilation forcée, refroidissement contrôlé), afin de maintenir les batteries dans une plage de température optimale et de garantir un fonctionnement sûr et durable de l’installation.

VIII. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de concrétiser les développements théoriques précédemment établis à travers une démarche de validation numérique rigoureuse et approfondie. Les résultats issus des simulations mettent clairement en évidence le comportement dynamique du système hybride associant un aérogénérateur de 500 W à une batterie plomb-acide, tout en confirmant la pertinence des modèles développés.

L'analyse des différentes réponses temporelles souligne le rôle déterminant du hacheur bidirectionnel dans la gestion et l'optimisation des échanges énergétiques entre la source éolienne, le système de stockage et la charge. Les performances du dispositif de commande démontrent une remarquable robustesse face aux variations des conditions de fonctionnement. En effet, qu'il s'agisse des fluctuations soutenues du vent observées sur le site de Hennaya ou des périodes prolongées de faible ressource éolienne caractérisant le site d'Adrar, la stratégie de régulation a assuré avec efficacité le maintien de la tension du bus continu à sa valeur nominale de 48 V, garantissant ainsi la stabilité et la continuité de l'alimentation électrique.

Par ailleurs, l'étude comparative réalisée constitue un outil d'aide à la décision particulièrement pertinent pour l'évaluation du potentiel de déploiement de telles configurations. Les résultats obtenus révèlent que le site de Hennaya présente un équilibre énergétique naturellement favorable pour le profil de charge considéré, tandis que le site d'Adrar engendre une sollicitation plus importante du système de stockage. Cette situation justifie l'examen de solutions complémentaires, telles qu'un dimensionnement accru de la capacité de stockage ou l'intégration d'une source photovoltaïque afin d'améliorer la disponibilité énergétique globale.

Ainsi, l'ensemble des résultats obtenus confirme la faisabilité technique et la fiabilité du couplage entre une batterie plomb-acide et un aérogénérateur pour la sécurisation de l'alimentation des sites isolés. Cette association constitue une réponse efficace aux contraintes liées à l'intermittence de la ressource éolienne, tout en contribuant à l'amélioration de la stabilité et de la qualité de l'énergie fournie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La modélisation, la simulation et la gestion énergétique d'un système hybride associant une éolienne à un dispositif de stockage par batteries au plomb-acide. L'objectif fondamental de cette étude consistait à concevoir, analyser et évaluer le comportement dynamique de cette architecture sous l'environnement MATLAB/Simulink, à travers une approche comparative appliquée à deux sites algériens présentant des caractéristiques climatiques nettement différenciées : Adrar et Hennaya.

La démarche adoptée a permis, dans un premier temps, d'établir un cadre théorique rigoureux consacré aux technologies de conversion et de stockage de l'énergie. Une attention particulière a été portée à l'étude approfondie des modèles électrochimiques et électriques des batteries, notamment les modèles de Shepherd, de Tremblay-Dessaint et de Thévenin, dont l'analyse a constitué une base essentielle pour la compréhension des phénomènes de charge et de décharge. Par ailleurs, la caractérisation du potentiel éolien à l'aide de la distribution statistique de Weibull a fourni un outil pertinent pour l'évaluation des ressources disponibles et leur intégration dans la chaîne globale de conversion énergétique. Les simulations réalisées ont également permis de valider les performances du convertisseur DC-DC ainsi que l'efficacité de la stratégie de gestion des flux de puissance mise en œuvre.

Les résultats obtenus mettent en évidence des comportements énergétiques fortement dépendants des spécificités climatiques de chaque région, imposant ainsi des choix de dimensionnement distincts. Dans le cas du site d'Adrar, localisé dans le Sud saharien, l'étude a confirmé l'existence d'un gisement éolien particulièrement abondant et remarquablement stable. Cette disponibilité énergétique élevée favorise une production électrique importante, mais induit simultanément des cycles intensifs de charge et de décharge susceptibles d'accroître les contraintes imposées au système de stockage. Dans cette configuration, une augmentation significative de la capacité des batteries apparaît indispensable afin d'absorber efficacement les excédents de production, de limiter les courants transitoires élevés et, par conséquent, de prolonger la durée de vie des accumulateurs.

À l'inverse, le site de Hennaya, situé au Nord-Ouest de l'Algérie, se caractérise par un potentiel éolien plus modéré et davantage soumis aux fluctuations temporelles. Dans ce contexte, l'enjeu principal ne réside pas dans l'accroissement de la capacité de stockage, mais dans l'amélioration de la qualité de l'énergie fournie au système. Il devient alors primordial d'optimiser les stratégies de commande et de filtrage du convertisseur afin d'atténuer les

variations rapides induites par les fluctuations du vent et de garantir une meilleure stabilité de la tension délivrée à la charge.

L'apport majeur de cette étude réside ainsi dans la démonstration qu'aucune approche de dimensionnement universelle ne saurait être appliquée efficacement à l'ensemble des systèmes hybrides. La conception optimale d'une telle installation doit impérativement s'appuyer sur une analyse approfondie des conditions locales, en tenant compte des caractéristiques statistiques du vent et des spécificités microclimatiques propres à chaque site d'implantation. À cet égard, ce travail constitue un outil d'aide à la décision pertinent et robuste pour accompagner le développement et l'intégration des énergies renouvelables en Algérie.

Dans la perspective de prolonger ces recherches, plusieurs axes d'investigation apparaissent particulièrement prometteurs. Une première extension consisterait à intégrer une source photovoltaïque afin de développer un système hybride multi-sources exploitant la complémentarité naturelle entre les ressources solaire et éolienne. Par ailleurs, l'introduction de modèles avancés de vieillissement électrochimique et thermique permettrait d'évaluer avec une plus grande précision la dégradation des batteries en fonction des conditions réelles d'exploitation propres à chaque site. Enfin, l'implémentation de stratégies de commande intelligentes, fondées notamment sur la logique floue, les algorithmes d'optimisation ou la commande prédictive, offrirait des perspectives intéressantes pour renforcer la robustesse et les performances du système face au caractère aléatoire des ressources éoliennes, avant d'envisager une validation expérimentale sur banc d'essai.

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسةً شاملةً لنمذجة ومحاكاة نظام هجين قائم على طاقة الرياح ومدعم بوحدة تخزين تعتمد على بطاريات الرصاص الحمضية، وذلك بهدف تحسين إدارة الطاقة وضمان استقرار الإنتاج الكهربائي والحد من تأثير التذبذبات الناجمة عن الطبيعة المتقطعة لمورد الرياح. وقد استهلّ العمل باستعراض أهم تقنيات استغلال الطاقة الريحية ونماذج تمثيل البطاريات، ولاسيما نماذج شيبيرد (Shepherd) وترامبلي-ديسان (Tremblay-Dessaint) وثيفنين (Thevenin). كما تم تحليل الخصائص الريحية لموقعين جزائريين هما الحناية وأدرار بالاعتماد على توزيعي ويبول ورايلي لتوصيف الموارد الريحية. بعد ذلك، جرى تطوير نموذج متكامل للنظام يضم العنفة الريحية، والمحول المستمر-المستمر (DC-DC)، ومنظومة التخزين، ومحاكاته باستخدام بيئة MATLAB/Simulink. وقد أكدت النتائج صحة النموذج المقترح وكفاءته الديناميكية، كما أبرزت فروق الأداء بين الموقعين المدروسين؛ إذ يتطلب موقع أدرار، الذي يتميز بموارد ريحية مرتفعة، ساعات تخزين أكبر لاستيعاب تقلبات الشحن والتفريغ، في حين يستدعي موقع الحناية اعتماد استراتيجيات تحكم وترشيح أكثر فاعلية للتخفيف من تأثير تغيرات سرعة الرياح. وتُختتم الدراسة بجملة من التوصيات التقنية والاقتصادية الرامية إلى تحقيق الأبعاد المثلى للنظام وتحسين مردوديته التشغيلية.

الكلمات المفتاحية: النظام الهجين لطاقة الرياح، بطاريات الرصاص الحمضية، MATLAB/Simulink، توزيع ويبول، إدارة الطاقة، الحناية، أدرار.

Résumé : Ce mémoire présente une étude approfondie consacrée à la modélisation et à la simulation d'un système hybride associant l'énergie éolienne à un dispositif de stockage basé sur des batteries au plomb-acide, dans le but d'optimiser la gestion énergétique, de lisser la production électrique et de renforcer la stabilité du réseau. Le travail débute par une analyse des principales technologies éoliennes ainsi que des modèles de batteries les plus représentatifs, notamment les modèles de Shepherd, de Tremblay-Dessaint et de Thévenin. Les ressources éoliennes de deux sites algériens, Hennaya et Adrar, ont ensuite été caractérisées à l'aide des distributions statistiques de Weibull et de Rayleigh afin d'évaluer leur potentiel énergétique. Un modèle global intégrant l'éolienne, le convertisseur continu-continu (DC-DC) et le système de stockage a été développé et simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus confirment la validité du modèle proposé ainsi que ses performances dynamiques satisfaisantes. L'étude comparative des deux sites met en évidence des exigences distinctes en matière de gestion énergétique : le site d'Adrar, caractérisé par un potentiel éolien élevé, requiert des capacités de stockage plus importantes afin d'absorber les variations de charge, tandis que le site de Hennaya nécessite la mise en œuvre de stratégies de commande et de filtrage plus performantes pour atténuer les fluctuations du vent. Enfin, cette recherche débouche sur un ensemble de recommandations techniques et économiques visant à déterminer le dimensionnement optimal du système et à améliorer son efficacité opérationnelle.

Mots-clés : Système hybride éolien, batterie au plomb-acide, MATLAB/Simulink, distribution de Weibull, gestion de l'énergie, Hennaya, Adrar.

Abstract

This dissertation presents a comprehensive study on the modeling and simulation of a hybrid wind energy system integrated with lead-acid battery storage, with the objective of optimizing energy management, smoothing power generation, and enhancing grid stability. The work begins with a detailed review of major wind energy technologies and widely adopted battery models, particularly the Shepherd, Tremblay-Dessaint, and Thévenin models. The wind resources of two Algerian sites, Hennaya and Adrar, were subsequently characterized using the Weibull and Rayleigh statistical distributions to assess their energy potential. A complete system model, comprising the wind turbine, the DC-DC converter, and the battery storage unit, was then developed and simulated within the MATLAB/Simulink environment. The simulation results validate the proposed model and demonstrate its satisfactory dynamic performance. Furthermore, the comparative analysis of the two sites highlights distinct energy management requirements: the Adrar site, characterized by superior wind resources, demands larger storage capacities to accommodate charging and discharging fluctuations, whereas the Hennaya site requires more advanced control and filtering strategies to mitigate wind variability. The study concludes with a set of technical and economic recommendations aimed at achieving optimal system sizing and improving overall operational efficiency.

Keywords: Hybrid wind energy system, lead-acid battery, MATLAB/Simulink, Weibull distribution, energy management, Hennaya, Adrar.