

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Laboratoire de Matériaux,
Technologie des Systèmes
Énergétiques et Environnement

Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière: *Energies Renouvelables*

Spécialité: *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

Par: Hiba BEN AMMAR

Thème

**CONTROLE D'UN SYSTEME HYBRIDE
EOLIENNE-PHOTOVOLTAIQUE AVEC
BATTERIES DE STOCKAGE**

Soutenu publiquement le 24/06/2019

Devant le jury:

Abdelouhab KHATTARA	MCB	Univ. Ghardaïa	Président
Charaf Abdelkarim MOSBAH	MAB	Univ. Ghardaïa	Examineur
Fatima BOUCHELGA	MAB	Univ. Ghardaïa	Examineur
Daoud REZZAK	MRB	U.R.A.E.R	Encadreur

Année universitaire 2018/2019

N° d'ordre :
N° de série :

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu tout puissant de m'avoir donné courage, volonté, patience et santé tout au long de ces années que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Au terme de cette travaille, je tiens à exprimer en premier lieu mes gratitudees à Mr. Daoud REZZAK, enseignant chercheur à l'URAEER-Ghardaia. Je le remercie vivement pour la qualité de son encadrement, son esprit scientifique, son aides précieuses. Je le remercie également pour sa disponibilité totale, son encouragement dans toutes les phases du travail et son conseil objectif, tout au long de cette année, qu'il trouve ici ma grande reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire jusqu'à l'université.

Je remercie également tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Dédicace

Ne dites jamais de quelque chose

impossible, dites que c'est possible

Ben Ammar Hiba

À mes très chers parents, que Dieu les protège...

À Mes cher frère et Ma chère sœur....

À ma grande famille...

Et à tous mes amis et A tous ceux qui m'aiment...

À tous mes amis de la promotion énergie renouvelable sans exception...

ملخص :

تقدم هذه المذكرة استراتيجية للتحكم في النظام الهجين لتوليد الطاقة الكهربائية، الذي يدمج بين مصدرين للطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية و طاقة الرياح) مع بطاريات التخزين و محرك كهربائي ذو تيار مستمر. هذا العمل يظهر نمذجة و تحجيم للنظام الهجين، مما يوفر حلاً للتحكم في الطاقة وإدارتها ، لحماية البطارية من جهة وضمان التشغيل السليم للأجهزة الكهربائية من جهة أخرى. الهدف من هذا العمل هو تطوير استراتيجية تحكم لإدارة النظام، وتحدد هذه الاستراتيجية الجهد والتيار وحالة شحن البطارية والطاقة المتاحة التي توفرها المصادر للتحكم في الأجهزة التي تتصل بين مصادر مختلفة وتهمة. ستوفر الدراسة جميع الجوانب المهمة لاستراتيجية تحكم فعالة حتى يعمل النظام المختلط بشكل صحيح.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين , نظام شمسي , توربينات هوائية , بطارية , ادارة الطاقة , ماتلاب.

Résumé

Ce mémoire présente une stratégie de commande d'un système hybride de production d'énergie électrique, qui combine deux sources d'énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) avec des batteries de stockage et un moteur à courant continu comme une charge. Le travail montre la modélisation et le dimensionnement d'un système hybride qui proposant une solution pour le contrôle et la gestion d'énergie, à fin d'optimiser l'énergie et protéger les batteries d'une part et assurer le bon fonctionnement de l'installation d'autre part. Le travail a pour but de développer une stratégie de contrôle qui doit gérer le système, cette stratégie permet de déterminer la tension, le courant, l'état de charge de la batterie et la puissance disponible fournie par les sources pour contrôler les dispositifs qui relient entre les différentes sources et la charge. L'étude donnera tous les aspects importants pour une stratégie de contrôle efficace afin que le système hybride fonctionne adéquatement.

Mots-clés : système hybride, système PV, turbine éolienne, batterie, gestion d'énergie, Matlab/Simulink,

Abstract

This thesis presents a control strategy for a hybrid electric power generation system, which combines two renewable energy sources (photovoltaic, wind turbine) with storage batteries and a DC motor as a load. The work shows the modeling and sizing of a hybrid system that offers a solution for the control and management of energy to optimize energy and protect the batteries on the one hand and ensure the proper functioning of the installation on the other hand. The purpose of the work is to develop a control strategy that must manage the system. This strategy determines the voltage, current, state of charge of the battery and the available power provided by the sources to control the devices that connect between different sources and charge. The study will provide all the important aspects for an effective control strategy so that the hybrid system functions properly.

Keywords: hybrid system, PV system, wind turbine, battery, energy management.
Matlab / Simulink,

Liste des Symboles et Abréviation

Symbole	Désignation	Unité
R_s	Résistance série	[Ω]
R_p	Résistance shunt	[Ω]
V_c	Tension de sortie de cellule	[V]
I	Courant fournit par une cellule	[A]
I_{ph}	Courant photo-généré	[A]
I_0	Courant de saturation de la diode	[A]
q	Charge d'électron	[C]
K	Constant de Boltzmann	[JK ⁻¹]
T_c	Température absolue de fonctionnement de la jonction	[K°]
m	Facteur d'idéalité de la diode	-
V_{co}	Tension en circuit ouvert du module PV	[V]
I_{cc}	Courant de court-circuit du module PV	[A]
P_c	Puissance crêt du module PV	[W]
n_s	Nombre des cellules en série	-
n_p	Nombre des cellules en parallèle	-
I_{mp}	Courant maximal du module PV sous conditions standards	[A]
V_{mp}	Tension maximale du module PV sous conditions standards	[V]
P_{mp}	Puissance maximale du module sous condition standards	[W]
P_e	Puissance éolien	[W]
β	Angle de calage	[°]
R	Rayon de turbin éolien	[m]
λ	Rapport de la vitesse linéaire en bout de pales	-
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne	-
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine	[tr/mn]
S	La surface circulaire balayée par la turbine	[m ²]
V_v	Vitesse de vent	[m/s]
ρ	Densité de l'air	[kg/m ³]
C_B	Capacité de batterie	[Ah]
E_L	Demande de charge	[Wh]

S_D	Jours d'autonomie	-
U_{batn}	Tension de fonctionnement de la batterie	[V]
DOD	Profondeur de la décharge	[%]
T_{cf}	Facteur de correction de température	-
η_B	Rendement charge/décharge	-
I_{nm}	Courant nominale de moteur MCC	[A]
U_{nm}	Tension nominale de moteur MCC	[V]
I_{mmax}	Courant max de moteur MCC	[A]
P_{nm}	Puissance nominale de moteur CC	[W]
P_{mmax}	Puissance max de moteur CC	[W]
i_a	Courant d'induit de la machine CC	[A]
e	La force contre électro-motrice du moteur	
K_e	La constante de f.c.e.m du moteur	
R_a	Résistance du circuit d'induit de la machine CC	[Ω]
L_a	Inductance du circuit d'induit dans une machine CC	[H]
C_m	Couple électromagnétique	[Nm/A]
C_r	Couple résistant (charges + frottements)	[Nm/A]
J	Inertie de l'arbre de la machine CC	[Kg.m ²]
f_v	Coefficient de frottement sur l'arbre de la machine CC	-
Ω	Vitesse angulaire mécanique	[Rad/s]
ψ	Flux magnétique	[Wb]
G	Rayonnement global	[kwh/m ²]
D	Rayonnement global	[w/m ²]
DG	Durée d'insolation	[h]
T	Température	[C°]
H	Humidité	[%]
DV	Direction de vent	[deg]
K_v	Le facteur de forme	-
C_v	le facteur d'échelle	[m/s]
E_c	les besoin énergétique journalière	[kwh/j]
C_u	La capacité de système de stockage	[Ah]
N_{Bs}	Le nombre des batteries en série	-
N_{Bp}	Le nombre des batteries en parallèles.	-

N_b	Le nombre total des batteries	-
N_{ss}	le nombre des modules en séries	-
N_{pp}	le nombre des modules en parallèle	-

Liste d'abréviation

SEH : Système Hybride d'Energie renouvelable,

CC : Courant Continue,

CA : Courant Alternatif,

PV : Photovoltaïque,

CdTe: Tellurure De Cadmium,

GSAP : Génératrice Synchrone a Aiment Permanant,

Ni/Cd : Nickel-Cadmium,

Ni/Hm : Nickel-Hydrure métallique,

MCC : Moteur à Courant Continue,

MPPT: maximum power pointe tracking,

SOC: Stat Of Charge,

Liste des figures

Figure I.1	: Architecteur générale des systèmes hybrides.....	4
Figure I.2	: Système hybride à configuration CC.....	5
Figure I.3	: Système hybride à configuration CA.....	6
Figure I.4	: Système hybride a configuration CC-AC.....	7
Figure I.5	: Le système hybride à étudié.....	7
Figure I.6	: Coupe transversale d'une cellule PV	8
Figure I.7	: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.8	: Caractéristique (I-V)	10
Figure I.9	: Association de n_s cellules en série.....	12
Figure I.10	: Association de n_p cellules en parallèle.....	12
Figure I.11	: Caractéristiques $P = f(V)$, $I = f(V)$ a éclairement constant (1000w/m ²).....	13
Figure I.12	: Caractéristiques $P = f(V)$, $I = f(V)$ a température constant (25°C).	14
Figure I.13	: Aérogénérateur à axe horizontal	14
Figure I.14	: Aérogénérateur à axe vertical	15
Figure I.15	: Constitution d'une éolienne	15
Figure I.16	: Turbine éolien.....	16
Figure I.17	: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	17
Figure I.18	: Caractéristique coefficient de puissance/vitesse spécifique de vitesse pour différents angles d'inclinaison des pales.....	19
Figure I.19	: Plage de fonctionnement d'un élément électrochimique.....	21
Figure I.20	: Courbes caractéristiques de décharge.....	21
Figure I.21	: Schéma d'une machine CC.....	25
Figure I.22	: Représentation schématique d'une MCC à aiment permanente....	26
Figure I.23	: Le courant d'induit et la vitesse de rotation de la MCC.....	27
Figure I.24	: les couples de la MCC.....	27
Figure II.1	: Position d'Adrar dans l'Algérie	29

Figure II.2	: Les différents composants du rayonnement solaire.....	31
Figure II.3	: Appareil de mesure des rayons.....	32
Figure II.4	: Représentation de l'irradiation globale et diffus mensuelle.....	32
Figure II.5	: Durée d'insolation.....	33
Figure II.6	: Anémomètres.....	33
Figure II.7	: profile de vitesse de vent pour Adrar.....	34
Figure II.8	: La rose de vent pour le site d'Adrar.....	35
Figure II.9	: Histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar.	36
Figure II.10	: La température mensuelle de site d'Adrar.....	36
Figure III.1	: Transformation de Park: repère a, b, c et repère d, q de Park...	44
Figure III.2	: Redresseur de tension associé avec la GSAP	45
Figure III.3	: Commande vectorielle de la GSAP.....	47
Figure III.4	: Boucles de courant.....	48
Figure III.5	: Boucles de courant simplifiées.....	48
Figure III.6	: Boucles de vitesse.....	49
Figure III.7	: Analyse de la stabilité des boucles de courant i_{sq} et de vitesse.....	50
Figure III.8	: Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.....	51
Figure III.9	: Principe de fonctionnement du MPPT à vitesse variable du vent..	51
Figure III.10	: Représentation de la commande de Vitesse de la GSAP d'un système éolien.....	53
Figure III.11	: Schéma du système complet sous SIMULINK.....	53
Figure III.12	: Vitesse de rotation et puissance de la turbine éolienne pour $V_v = 7\text{m/s}$	54
Figure III.13	: Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $V_v = 7\text{m/s}$	54
Figure III.14	: La vitesse de rotation et la puissance de la turbine éolienne pour $V_v = 13\text{m/s}$	55
Figure III.15	: Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $V_v = 13\text{m/s}$	55
Figure IV.1	: Architecture du système hybride (PV-éolienne-Batterie).....	58

Figure IV.2	: Organigramme de fonctionnement du système.....	60
Figure IV.3	: Schéma du système hybride complet sous Simulink.....	61
Figures IV.4	: Performances du système hybride PV-Eolienne-Batteries pour un SOC ₀ =30%.....	64
Figures IV.5	: Performances du système hybride PV-Eolienne-Batteries pour un SOC ₀ =60%.....	67
Figures IV. 6	: Performances du système hybride PV-Eolienne-Batteries pour un SOC ₀ =96%.	70

Liste des Tableaux

Tableau I.1	: Les cellules photovoltaïques standards	11
Tableau I.2	: Paramètres du module photovoltaïque à 25 °C, 1000W/m ²	13
Tableau I.3	: Paramètres d'éolien <i>de 50 kw</i>	17
Tableau I.4	: caractéristique chaque type de batterie	23
Tableau I.5	: Paramètres de la batterie AGM.....	25
Tableau I.6	: Paramètres de la machine CC à aimant permanent	27
Tableau II.1	: Donnée métrologique d'Adrar.....	30
Tableau II.2	: Caractéristique du moteur MCC.....	37
Tableau III.1	: Paramètres de la GSAP.....	45
Tableau III.2	: Paramètre des contrôleurs PI.....	49

Sommaire

Liste des abréviations explicitées.....	i
Liste des Figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	vii
Introduction Générale.....	1
 Chapitre I : généralité et modélisation sur les systèmes énergétiques hybrides	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition et missions des systèmes hybrides	3
I.3. Les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides	4
I.3.1. Systèmes hybrides à configuration continu	4
I.3.2. Systèmes hybrides à configuration alternatif	5
I.3.3. Systèmes hybrides à configuration Courant Continu-Courant Alternatif.....	6
I.4. Présentation du système hybride étudié.....	7
I.5. Modélisation des sources d'énergies et de stockages et la charge motorisé.....	8
I.5.1. Modèle de la source photovoltaïque.....	8
I.5.1.1.La cellule PV.....	8
I.5.1.1.a. L'effet photovoltaïque et jonction PN.....	8
I.5.1.1.b. Caractéristique électrique de la cellule.....	9
I.5.1.1.c. Les différents types des cellules photovoltaïques.....	11
I.5.1.2. Les modules solaires photovoltaïques.....	12
I.5.1.2.a. Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque.....	13
I.5.2. Modèle de la source éolienne.....	14
I.5.2.2. Types d'aérogénérateurs.....	14

I.5.2.2.a. Eoliennes à axe horizontal	14
I.5.2.2.b.Eoliennes à axe vertical.....	15
I.5.2.3. Eléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal	15
I.5.2.4. Modélisation de la turbine.....	16
I.5.2.4.a. La puissance aérodynamique.....	17
I.5.2.4.b. Le coefficient de puissance.....	18
I.5.2.5. Choix de la génératrice.....	19
I.5.3. Modèle des batteries de stockage	20
I.5.3.1. Les caractéristiques des batteries	20
I.5.3.2. les type des batteries	22
I.5.3.2.a. Les batterie au Plomb.....	22
I.5.3.2.b. les batteries alcalines (Ni/Cd et Ni/MH)	23
I.5.3.2.c. Les batteries au lithium.....	23
I.5.4. Modèle de la charge (MCC).....	25
I.5.4.1. Avantages et inconvénients.....	26
I.5.4.2. Machine à aimant permanent	26
I.5.4.3. Simulation de la machine à aimant permanent	27
I.6.Conclusion.....	28

Chapitre II : Dimensionnement du système hybride (PV-Eolienne-Batteries)

II.1. introduction	29
II.2. Présentation de site d'Adrar	29
II.3. donnée métrologique de la ville d'Adrar.....	30
II.4. estimation des ressources solaires	31

II.4.1. composant de rayonnement solaire	31
II.4.2. La durée d'insolation (DG)	33
II.4. estimation des ressources éoliennes	33
II.4.1. les donner de vent	33
II.4.2. Les caractéristiques du vent.....	34
II.4.2.1. la rose de vents	34
II.4.2.2. distribution de Weibull.....	35
II.5. les donner de la température.....	36
II.6. Dimensionnement du système.....	36
II.6.1. Evaluation de la puissance à produire E_c pour satisfaire la demande.....	37
II.6.2. Détermination des nombres de batteries de stockage	37
II.6.2.a. Le nombre des batteries en série	38
II.6.2.b. Le nombre des batteries en parallèle	38
II.6.2.c. Le nombre totale des batteries	38
II.6.3. Détermination du nombre des modules photovoltaïques à installés.....	39
II.6.3.a. calcule des nombres des modules en série	39
II.6.3.b. calcule des nombres des modules en série.....	39
II.6.4. Dimensionnement de l'éolien.....	40
II.6.4.a. calcule la correction de la vitesse.....	40
II.6.4.b. calcule le rayon de la turbine	40
II.7. Conclusion	42

Chapitre III : Commande en MPPT de la GSAP de l'éolienne	
III.1. Introduction	43
III.2. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents	43
III.3. Modélisation de convertisseur pour la GSAP	45
III.4. La stratégie de commande vectorielle de la GSAP	46
III.4.1. Principe et structure de la commande.....	46
III.5. Architectures de puissance et gestion d'énergie.....	50
III.5.1. Technique de la maximisation de la puissance produite.....	52
III.5.2. Optimisation électronique de la conversion énergétique.....	52
III.6. Résultat de simulation et interprétation	53
III.6.1. Simulation du système éolienne avec MPPT pour $V_{\text{égal}}$ à 7 m/s	54
III.6.2. Simulation du système éolienne avec MPPT pour $V_{\text{égal}}$ à 13 m/s	55
III.7. Conclusion	57
Chapitre IV : Gestion d'énergie du système hybride (PV-éolienne-batteries)	
IV.1. introduction.....	58
IV.2. Architecture du système hybride (Eolienne-PV-Batterie).....	58
IV.2.1. Modes de fonctionnement	59
IV.2.2. Organigramme de système de contrôle et de gestion d'énergie des sources....	60
IV.3. Simulation du fonctionnement du système hybride (PV-Eolienne):.....	61
IV.4. Résultats de simulation.....	62
IV.4.1. Scénario N°1 batterie complètement déchargé	62
IV.4.2. Scénario N°2 batterie chargé à une valeur nominale	65
IV.4.3. Scénario N°3 batterie chargé à une valeur nominale	68

IV.5. Conclusion	71
Conclusion Générale	72
Annexe	74
Bibliographie	75

Introduction

Générale



Introduction générale

D'après les statistiques du ministère national de l'énergie, plus de 59.6 M Tep l'énergie nationale consommée en 2017 étaient d'origine fossile (pétrole, gaz naturel) [1], ces sources sont aujourd'hui également avérées être cause de pollution et d'augmentation de l'effet de serre, et d'être des sources épuisables.

Dans le cadre de la production de l'électricité, les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ces besoins électriques. Ces sources d'énergies présentent l'avantage de la disponibilité dans tout le monde, et une source propre et inépuisable dans la planète.

En ce qui concerne notre site d'Adrar, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural.

Tandis que l'apport énergétique éolien et solaire représente un potentiel important à la région d'Adrar et donne une autre extension pour notre pays pour se diversifier au point de production d'électricité d'origine renouvelable. A cet effet, le système de production d'électricité à base des énergies renouvelables sélectionnées pour notre étude est appliqué dans ce site.

A cause de l'intermittence des sources à base des énergies renouvelables, ces dernières ne constituent pas une solution universelle aux problèmes d'approvisionnement en électricité. Pour les éoliennes, les variations de puissance sont dues à la variabilité de la vitesse du vent parce que la puissance du vent, convertie par la turbine éolienne en puissance mécanique, possède un caractère variable, car elle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Pour l'énergie solaire les variations sont causées par l'alternance des jours et des nuits, par la couverture nuageuse du ciel et par la variation de la durée des jours et la position du soleil pour les différentes saisons. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergies, qui gère d'une manière optimale la production de l'électricité en profitant de la complémentarité entre elles avec l'utilisation d'un système de stockage afin d'emmagasiner l'excès de puissance produite par ces sources.

Dans ce contexte, on utilise un système hybride photovoltaïques – éolienne – batteries comme des sources d'énergies primaires et secondaires, un moteur à courant

continue à aiment permanent comme une charge motorisée et un système composé par des interrupteurs et un programme pour une meilleure gestion de l'écoulement d'énergie entres les différentes sources et la charge.

Le but de notre travail est de développer une stratégie de contrôle qui doit gérer le système à fin d'optimiser l'énergie et de protéger les composants du système.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Le premier chapitre présente une structure générale du système hybride, la configuration du notre système choisie, une étude sera aussi consacrée aux les comportements principales intégrés dans l'installation du système (PV-éolienne), Le dispositif de stockage sera également étudié pour la contrôle (des batteries) et la charge de moteur de courant continue à aiment permanente.

Le deuxième chapitre concerne le dimensionnement du notre système. On présente premièrement la position géographique de notre site, les données de profils de charge, l'irradiation solaire et la vitesse du vent, ensuit une évaluation des potentiels énergétiques renouvelables de site d'Adrar et enfin on détermine la taille optimale du système du stockage composé par des batteries, le nombre des modules photovoltaïque et la surface balayé par le générateur éolien, afin de satisfaire la demande électrique.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et la Commande en MPPT de la GSAP de l'éolienne, la modélisation du convertisseur associé, puis un explication de la stratégie à suivre pour commander l'éolienne avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'un régulateur PI permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent et on termine cette partie par une simulation de ces configurations (GSAP et turbine) en fonctionnement générateur.

Le dernier chapitre, (Gestion d'énergie du système hybride (PV-éolienne-batteries)) présente la stratégie de contrôle et le principe de fonctionnement de notre système hybride (PV, éolienne, Batteries, MCC) avec le système de contrôle et de la gestion d'énergie. En outre on effectue des simulations de toute la chaine de notre système hybride et les résultats obtenus pour plusieurs cas d'étude sont satisfaisantes et on conclure que le système étudié est robuste et performant.

Chapitre I



*Généralité et modélisation
sur les systèmes énergétiques
hybrides*



I.1. Introduction

Connaissant les problèmes techniques, et environnementaux et économiques rencontrés pour la production de l'énergie électrique par les sources conventionnelles, l'utilisation des énergies renouvelables est une solution intéressante pour les zones qui ont un gisement riche en énergies appropriés à ces dernières.

Le système hybride de production de l'énergie électrique à base des énergies renouvelables dans sa vue plus général, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles et facilement mobilisables. Le système qui a adopté regroupe deux parties des sources renouvelables pour la production de l'énergie (photovoltaïque-éolien) passant par un stockage électrochimique.

Dans ce chapitre on décrit les différents architecteurs des systèmes hybrides que a trouvé dans la littérature [2], en plus on a modélisé et simulé sous le logiciel Matlab/Simulink des modèles mathématique qui reproduisent le comportement des sources d'énergies renouvelables (Photovoltaïques-éolienne) et du stockage constitué par des batteries plomb acide. En outre et afin de tester la réaction du système avec une charge motorisée on propose un modèle d'un moteur à courant continu à aimant permanent, et on termine ce chapitre par une conclusion.

I.2. Définition et missions des systèmes hybrides

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. [2] Le système hybride peut comprendre aussi un dispositif de stockage.

L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [2].

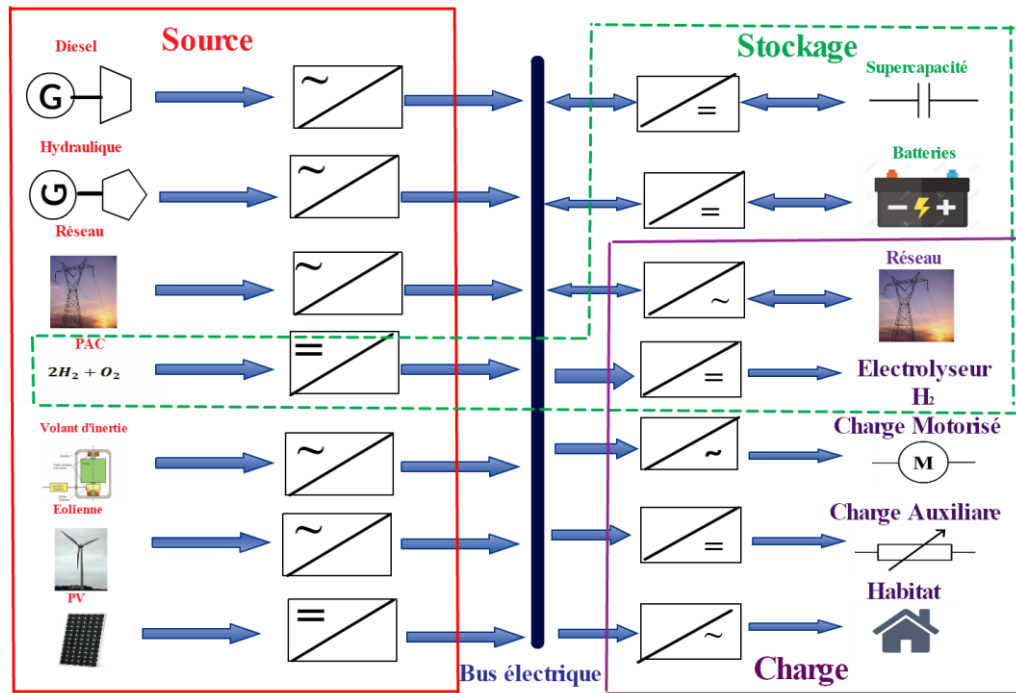


Figure I.1: Architecteur générale des systèmes hybrides

La figure I.1 représente une architecture générale des systèmes hybrides d'énergies. Les générateurs classiques ou renouvelables (groupe électrogène diesel, éolien, photovoltaïque ... etc) et les dispositifs de stockages (les super-condensateurs, les batteries, volants d'inerties...) et les éléments de charges (réseau, habitat, charges motorisés...), sont connectés au bus électrique commun par l'intermédiaire des convertisseurs statiques ou dynamiques.

I.3. Les différentes configurations et architectures de systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont souvent classés en trois différentes configurations selon le type de bus :

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

I.3.1. Systèmes hybrides à configuration continu

Les différentes sources du système hybride sont connectés à un bus à CC commun, signifie que la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Les puissances à courant alternatif fournies par les sources d'énergie (générateurs diesels, éoliennes) ou de stockage (volant d'inertie) sont converties en courant continu par un

convertisseur (CA /CC) [3]. Les charges à CC sont alimentées directement par le bus CC et les charges AC sont alimentées par un onduleur.

Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la figure suivante:

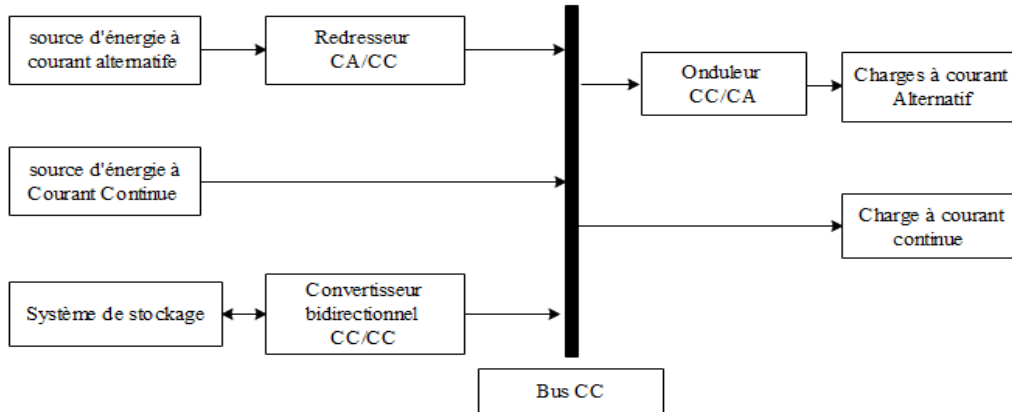


Figure I.2: Système hybride à configuration CC

Les avantages de cette configuration se résument à une simplification du système de commande et le générateur diesel peut être optimisé de telle manière qu'il fonctionne à sa puissance nominale pendant le processus de chargement de batteries, mais le rendement de cette architecture est faible dû à certaines pertes d'énergie à cause des batteries et les convertisseurs.

I.3.2. Systèmes hybrides à configuration alternatif

Dans cette configuration, les sources d'énergies à CA sont interconnectées directement sur le bus de courant alternatif. Les sources sont liées au bus à courant continu à travers un onduleur. Les systèmes de stockage sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel.

Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le bus à courant alternatif couvre la consommation électrique et participe dans le chargement des systèmes de stockage, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les systèmes de stockage.

Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la figure suivante [4]:

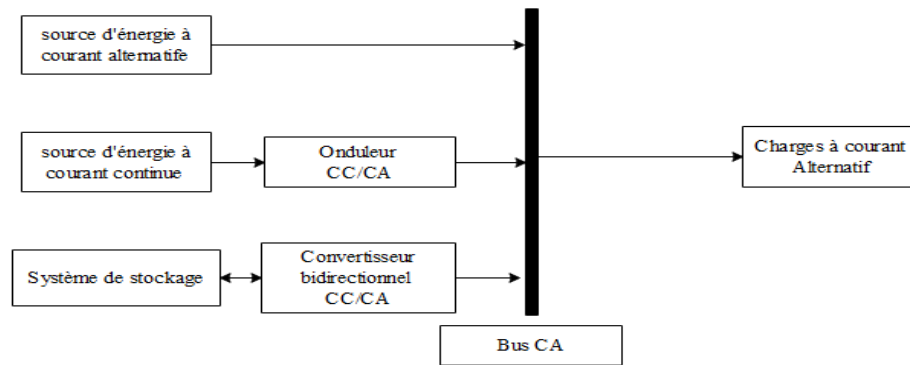


Figure I.3: Système hybride à configuration CA

I.3.3. Systèmes hybrides à configuration Courant Continu-Courant Alternatif

L'architecture mixte, à deux bus CC et CA a des performances plus élevées vis-à-vis la configuration à bus CC [3]. Dans cette configuration la charge peut être alimentée soit par la source alternative, soit par les sources à CC et le système de stockage via l'onduleur. L'alimentation par les deux sources simultanément n'est pas possible [5].

Cette configuration est mise en évidence par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel, qui remplace l'onduleur et le redresseur entre le bus à CC et à CA.

Le convertisseur bidirectionnel a un double fonctionnement, quand il y a un surplus d'énergie de la part des sources à CA le système de stockage récupère l'énergie électrique en passant par un redresseur. S'il y a un surplus d'énergie de la part des sources à CC le système de stockage récupère l'énergie électrique en passant par un convertisseur unidirectionnel à CC. Dans le cas d'un manque en énergies renouvelables à base du CC ou à CA le système de stockage restitue leurs énergies stockées afin de satisfaire les besoins énergétiques de la charge.

La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride [3,5].

Le schéma d'un tel système hybride est représenté dans la figure suivante:

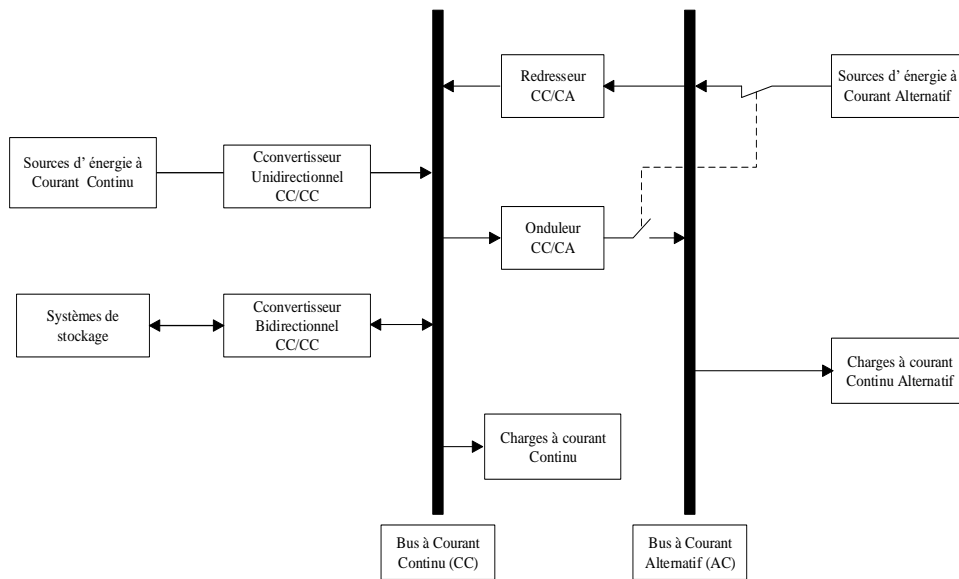


Figure I.4 : Système hybride a configuration CC-AC

I.4. Présentation du système hybride étudié

Dans nos travaux d'étude, on s'intéressons principalement aux systèmes hybrides à configuration de bus à CC qui est formés par deux sources renouvelables de type photovoltaïque et éolien associé avec un système de stockage électrochimique de type batteries plomb acide et un moteur a courant continue à aimant permanent comme une charge motorisé.

En effet, ce système d'énergies renouvelables hybrides est autonome et il est souvent utilisé dans les régions isolées, éloignée du réseau électrique, le système hybride qui a proposé à plusieurs applications comme les systèmes de pompage d'eau, les chariots élévateurs ainsi que l'électrification des habitas.

Le système hybride (PV-éolien-batteries) étudié est représenté dans la figure suivante :

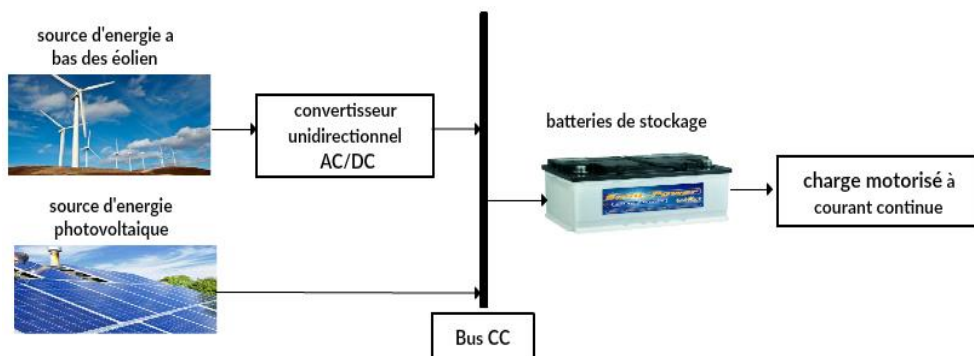


Figure I.5 : Le système hybride à étudié

I.5. Modélisation des sources d'énergies et de stockages et la charge motorisé

I.5.1. Modèle de la source photovoltaïque

I.5.1.1. La cellule PV

La cellule PV est le plus petit composant d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. On a ici présente rapidement le fonctionnement du phénomène photovoltaïque [6] :

I.5.1.1.a. L'effet photovoltaïque et jonction PN

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par le français Antoine-César Becquerel, désigne la capacité que possèdent certains matériaux, notamment les semi-conducteurs, à convertir directement les différentes composantes de la lumière du soleil (et non sa chaleur) en électricité [7]. La figure I.6 présente la coupe d'une cellule PV.

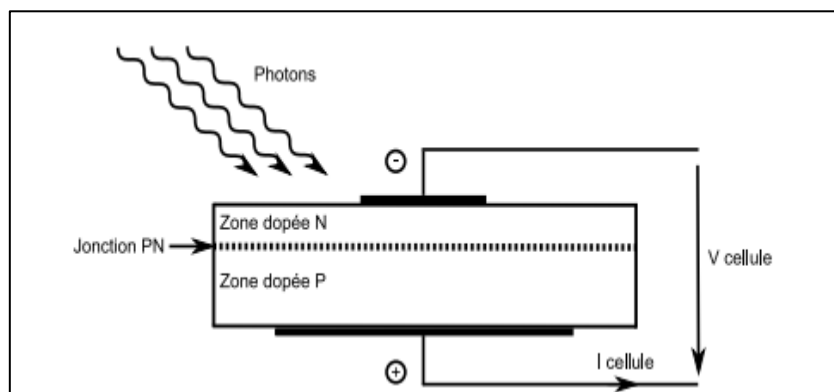


Figure I.6 : Coupe transversale d'une cellule PV [6]

Une cellule PV est réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur (par exemple le silicium). Sa réalisation est comparable à une diode classique. La cellule est composée de deux différentes couches. La couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN. Cette jonction PN crée une barrière de potentiel. Lorsque les grains de lumière (les photons) heurtent la surface de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la matière [6].

Ce gain d'énergie libère des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons. Ceci engendre donc une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des

régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV [6].

I.5.1.1.b. Caractéristique électrique de la cellule

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur la figure I.7 :

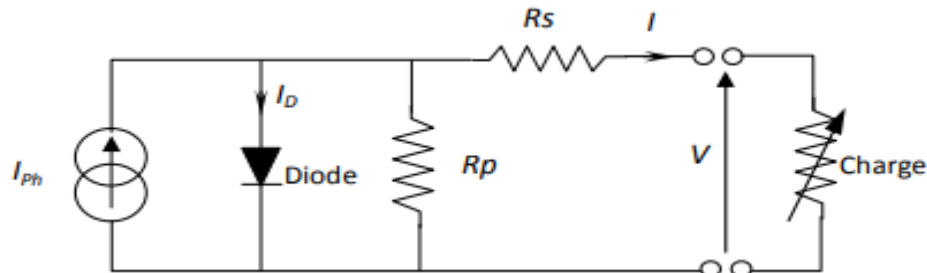


Figure I.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[8]

Comme montre la figure I.7 une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule [8] :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

D'après la figure I.8 le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donné par [8] :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (I.1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) \right] - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (I.2)$$

Où:

V : Tension de sortie de la cellule (V).

I : Courant de sortie de la cellule (A).

I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A).

I_0 : Courant de saturation de la diode (A).

q : Charge d'électron ($q = 1.6 * 10^{-19} c$).

K : Constant de Boltzmann ($k = 1.38 * 10^{-23} JK^{-1}$).

T_c : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°).

m : Facteur d'idéalité de la diode ($m \in [1,2]$), La valeur typique de m est 1.3.

R_s : Résistance série.

R_p : Résistance parallèle.

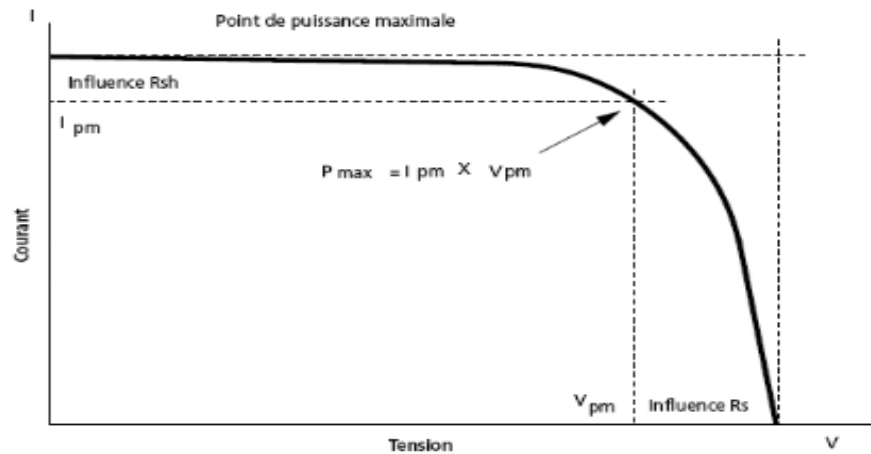


Figure I.8 : Caractéristique (I-V) [9]

D'où, les différents paramètres à prendre en considération dans un module photovoltaïque [10]:

- Tension à vide (V_{co}): Tension aux bornes de la cellule en l'absence de tout courant, pour un éclairage "plein soleil".
- Courant de court-circuit (I_{cc}): Courant débité par la cellule en court-circuit pour un éclairage "plein soleil".
- Puissance crête (P_c): la puissance maximale produite par une cellule photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de 1000 W/m² à l'horizontale, température ambiante de 25°C, masse d'air optique égale à 1,5.

- Point de fonctionnement optimum: Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,

$$P_{max} = V_{pm} \times I_{pm}. \quad (I.3)$$

- Rendement maximal: Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme: Rapport entre la puissance optimale P_{max} et la puissance maximale que peut avoir la cellule : V_{co}, I_{cc} .


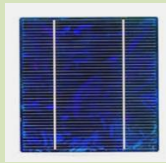

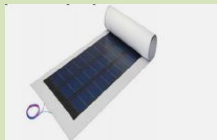
I.5.1.1.c. Les différents types des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium cristallin, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support à bas-coût. [11]

La performance d'une cellule solaire se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité. Les cellules solaires les plus répandues dans le commerce ont un rendement de 15% -20% ce qui signifie qu'environ un sixième de la lumière du soleil frappant une cellule produit de l'électricité. [11]

De nos jours, on distingue plusieurs types de technologies pour les cellules photovoltaïques réparties dans les tableaux suivants :

Tableau I.1 : Les cellules photovoltaïques standards[10]

Type de cellules	Silicium Mono Cristallin	Silicium Poly Cristallin	Silicium Amorphe (couche mince)	Cellule CdTe couche mince
				
Constriction	Fines plaques de silicium		Plusieurs couches de matériaux photosensibles superposés	
Rendement Industriel	12-20%	10-15%	5-10%	8-11%
Part de marché	85%		5%	10%
Garantie de puissance	90% de la puissance initiale 80% pendant 20 ans environ			-
Durée de vie	25-30 ans	25-30 ans	Environ 10 ans	>25 ans
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie connue et maîtrisée • Bon rendement • Durée de vie • Utilisation d'une surface réduite 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie connue et maîtrisée • Bon rendement • Durée de vie • Moins cher que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie connue et maîtrisée • Rendement moins affecté par un faible éclairage • Plus souple • Installation plus 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance à la température • Plus d'absorption de rayonnement diffus que le cristallin

			facile	
			<ul style="list-style-type: none"> • Moins énergivore • Meilleure résistance à la température 	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse • Rendement faible sous un faible éclairement 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible sous un faible éclairement 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement • Durée de vie • Processus industriel pas encore optimale • Moins écologique que le cristallin • Peu présent sur le marché 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement plus faible que le cristallin • Matériau toxique, processus de recyclage complexe • Sensible à l'humidité

I.5.1.2. Les modules solaires photovoltaïques

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque.

Dans un groupement de n_s cellules en série, toutes sont traversées par un même courant. La Figure I.9 montre la caractéristique résultante (I_{scc}, V_{sco}) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour n_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant :

$$V_{sco} = n_s * V_{co} \tag{I.4}$$

Pour un groupement de n_p cellules identiques en parallèle figure I.10 [12] :

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \tag{I.5}$$

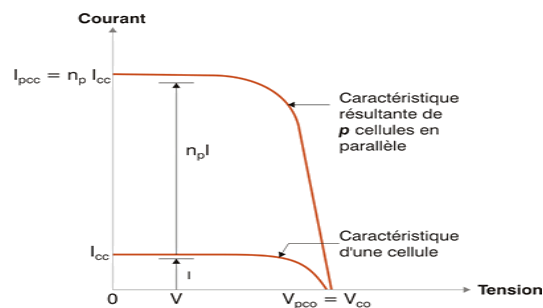
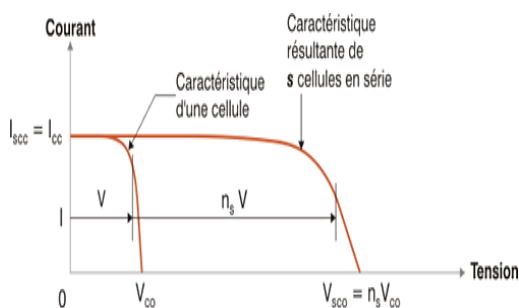


Figure I.9 : Association de n_s cellules en série

Figure I.10 : Association de n_p cellules en parallèle

I.5.1.2.a. Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique $I(V)$ du module solaire. D'où, l'importance de la connaissance de l'influence de l'éclairement et de la température pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques puisqu'ils sont exposés au rayonnement solaire [13].

Les paramètres de notre module photovoltaïques sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.2: Paramètres de notre module photovoltaïque à 25 °C, 1000W/m²

I_{mp}	3,76 A
V_{mp}	34,6 V
P_{mp}	130 W
I_{cc}	4,5 A
V_{co}	43,2 V
I_{pvn}	4,681 A
R_p	240 Ω
R_s	0,97 Ω
n_s	72

La simulation sous Matlab/Simulink d'un module photovoltaïque donne les résultats suivants Figure I.11 et Figure I.12.

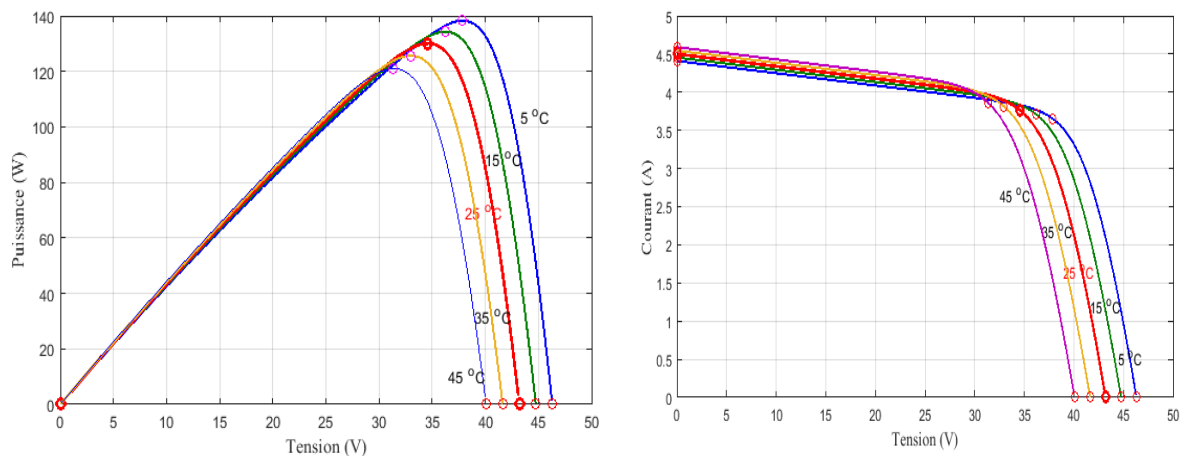


Figure I.11 : Caractéristiques $P = f(V)$, $I = f(V)$ à éclairement constant (1000w/m²)

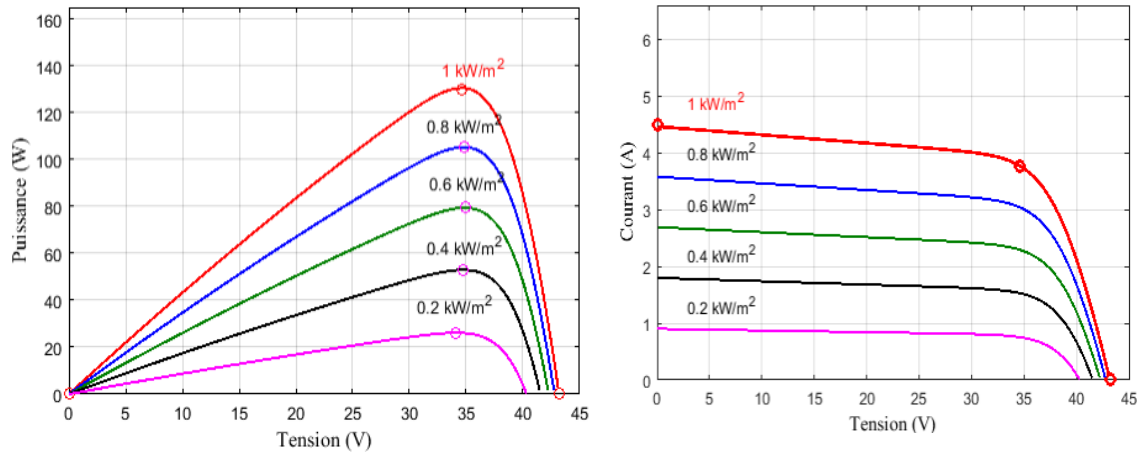


Figure I.12: Caractéristiques $P = f(V)$, $I = f(V)$ a température constant (25°C)

I.5.2. Modèle de la source éolienne

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique. En général, la transmission de puissance entre le moyeu et le générateur électrique est réalisée à travers un multiplicateur de vitesse de rotation [14].

I.5.2.2. Types d'aérogénérateurs

On peut classer les éoliennes en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.5.2.2.a. Eoliennes à axe horizontal

Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et sont souvent constituées de trois pales. Ce sont celles les plus courantes. Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place [15].



Figure I.13 : Aérogénérateur à axe horizontal [17]

I.5.2.2.b. Éoliennes à axe vertical

L'axe du rotor est perpendiculaire au sol. Elles n'ont besoin d'aucun système pour les orienter dans la direction du vent, cependant leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent deux fois moins d'énergies dans le vent [15].



Figure I.14 : Aérogénérateur à axe vertical [17]

I.5.2.3. Éléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne classique est généralement constituée des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la Figure I. 15 [16]:

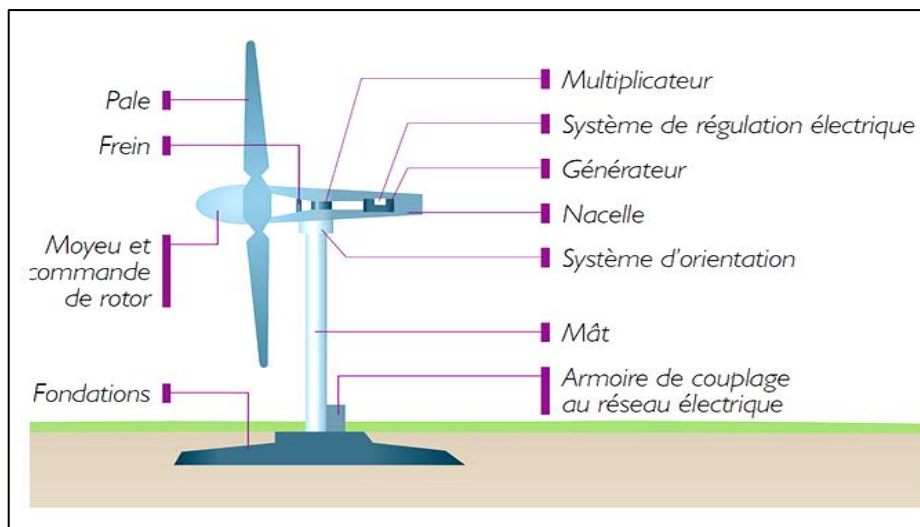


Figure I.15 : Constitution d'une éolienne [18]

- **Le mat ou la tour:** c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.
- **La nacelle:** regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

- **Le multiplicateur:** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **Le système de refroidissement:** se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **Le système de commande:** qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre:** qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le système d'orientation des pâles:** qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).
- **La génératrice électrique:** c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

I.5.2.4. Modélisation de la turbine

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système aérogénérateur. La figure I.15 représente une éolienne avec une génératrice de type synchrone à aimants permanents similaire celle que on a utilisé dans notre travail. Les éoliennes les plus utilisées sont généralement constituées de trois pales qui pivotent sur leur axe avec un angle d'inclinaison β [16].

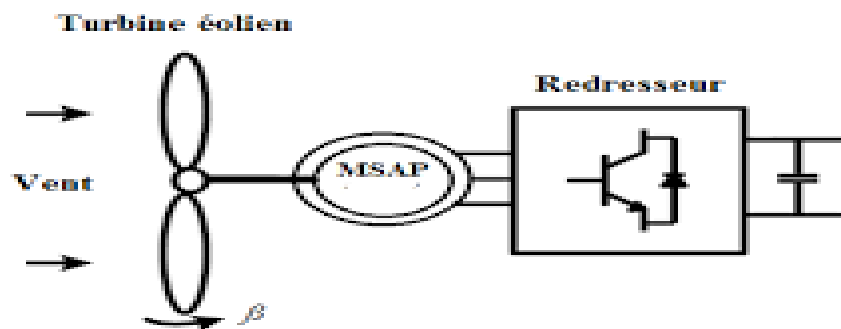


Figure I.16 : Turbine éolien[16]

Les paramètres de notre éolien sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.3: Paramètres d'éolien de 50 kw

P_e	50 KW
R	5 m
$C_{p_{max}}$	0,48
β_{max}	0°
C_1	0,5176
C_2	116
C_3	0,4
C_4	5
C_5	21
C_6	0,0068

I.5.2.4.a. La puissance aérodynamique

La puissance théorique appliquée à la turbine est donnée par l'équation (I.6). Où ρ est la masse volumique de l'air, S est la surface circulaire balayée par la turbine ; β est l'angle de calage des pales, V_v est la vitesse du vent en [m / s], [16].

$$P_e = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S V_v^3 \quad (\text{I.6})$$

Dans notre travail on a simulé une éolienne qui a les caractéristiques suivantes :

- 1- puissance nominales
- 2- vitesse de vent

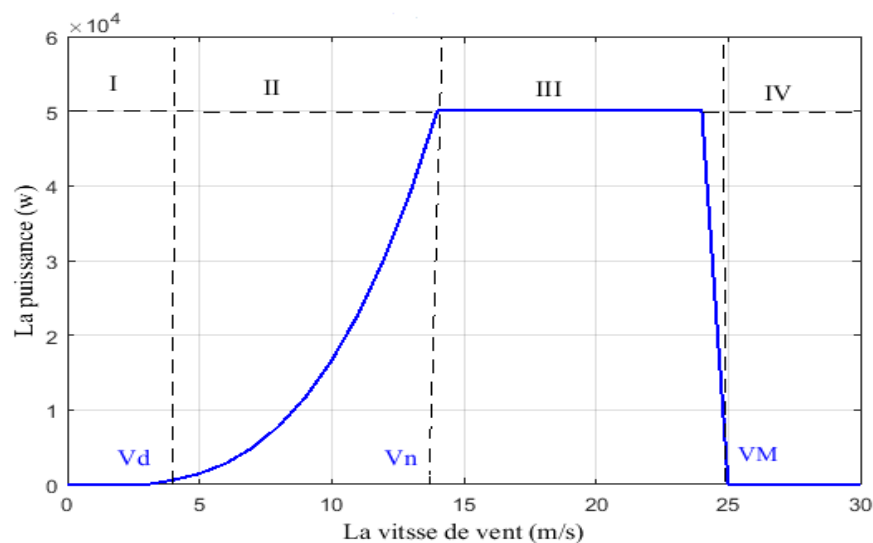


Figure I.17 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

La courbe donnant la puissance aérodynamique de l'aérogénérateur qui on a simulé, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée par la figure I.17.

A partir de la figure I.17 on a tiré les points remarquables qui caractérisent notre éolienne:

v_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, v_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

v_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, v_n varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

v_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, v_M vaut 25m/s.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [19] :

- la zone (I) où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance).
- la zone (II) dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v .
- la zone (III) où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n .
- la zone (IV) dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

I.5.2.4.b. Le coefficient de puissance

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine $\Omega_t R$ et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit [19] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{I.7})$$

Dans la littérature, des expressions approchées du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes sont proposées [2] :

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right) 0.0068\lambda_i \quad (\text{I.8})$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.003\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}} \right) \quad (\text{I.9})$$

La figure I.18 montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs de β . On a obtenu un coefficient de puissance maximum de 0.48 pour un ratio de vitesse λ qui vaut 8.1 (λ_{opt}). En fixant β et λ respectivement à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale.

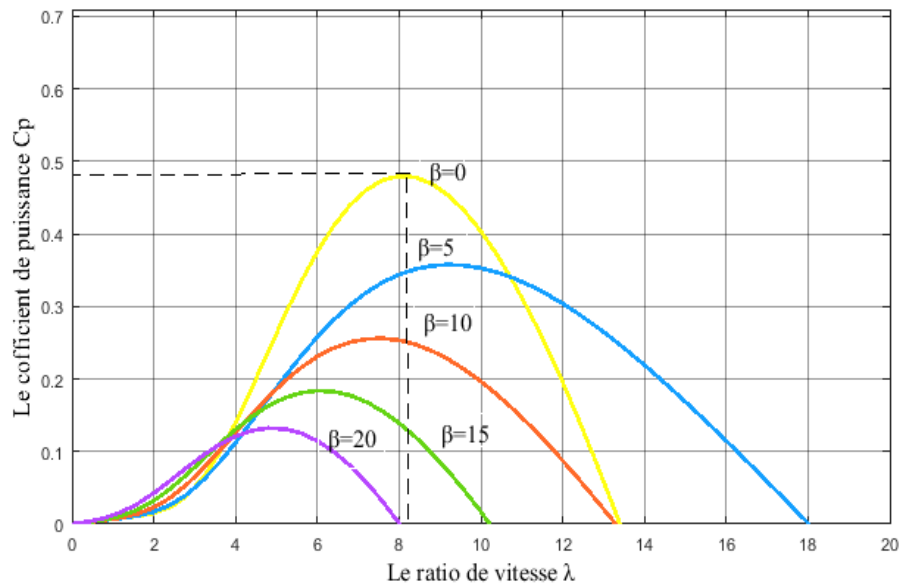


Figure I.18 : Caractéristique coefficient de puissance/vitesse spécifique de vitesse pour différents angles d'inclinaison des pales

I.5.2.5. Choix de la génératrice

Une fois le choix de la turbine effectuée, il faut déterminer la génératrice à utiliser. Elle pourra ensuite être dimensionnée de façon à couvrir la gamme de vitesse prévue selon la distribution des vitesses de vent du site et la caractéristique de la turbine. Différentes technologies sont possibles, avec pour critères principaux, le faible besoin d'entretien surtout pour une application en site isolé, et un fort couple disponible pour pouvoir gérer celui généré par le vent.

Les machines à courant continu sont une technologie à exclure. Elles possèdent en effet une puissance massique et un couple massique faibles, et demandent beaucoup d'entretien pour maintenir leurs bagues et balais en état. Jusqu'il y a peu, les machines asynchrones à double alimentation étaient la solution à privilégier, car elles sont bon

marché et permettent de contrôler une vitesse variable à travers leur rotor bobiné, contrairement par exemple à celles à cage d'écureuil [17].

Cependant, la présence du rotor bobiné nécessite le même entretien que les MCC, et la génération du champ tournant nécessite une connexion au réseau ou un banc de condensateurs dédiés à la production de puissance réactive ; ce n'est donc pas une solution idéale en site isolé. Elles ont également un faible couple massique, ce qui rend nécessaire l'ajout d'un multiplicateur de vitesse à la chaîne mécanique. Enfin, les machines synchrones étaient des solutions jusque-là intéressantes mais chères. Elles sont cependant de plus en plus compétitives, et peuvent être désormais considérées comme économiquement viables. Les machines synchrones à aimants permanents sont plus faciles à fabriquer des machines un nombre de pôles important, ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse. Celles possédant un rotor bobiné rencontre les mêmes problématiques que les machines à courant continu par la présence de balais [17].

En revanche, les MSAP (machines synchrones à aimants permanents) s'affranchissent de ce problème : demandant peu d'entretien et ne nécessitant aucune excitation du rotor, elles représentent une solution idéale pour des systèmes de petites puissances en site isolé [17].

I.5.3. Modèle des batteries de stockage

Le stockage d'énergie est un facteur clé dans un système d'énergie hybride surtout dans un site isolé caractérisé par un gisement d'énergies renouvelables intermittent.

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière. Ces accumulateurs restituent, sous forme d'énergie électrique l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques internes réversibles [21].

I.5.3.1. Les caractéristiques des batteries

Les caractéristiques de la batterie, jouent un rôle important dans la conception d'un système d'énergie renouvelable. Ces caractéristiques sont résumées dans les points suivants [10] :

- **Capacité:** Les constructeurs spécifient la capacité des batteries (Ampère-heure Ah) qui désigne la quantité d'énergie que peut fournir une batterie à pleine charge caractérisée par une tension en circuit ouvert jusqu'à la tension de fin de décharge Figure I.19.

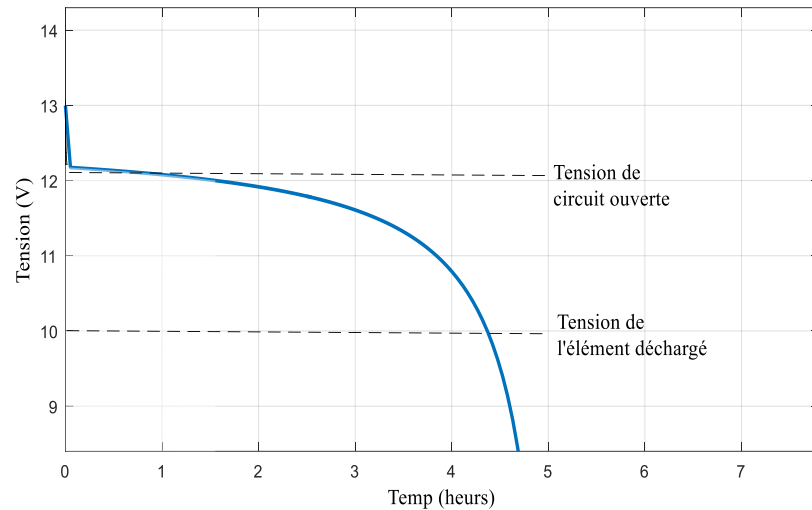


Figure I.19: Plage de fonctionnement d'un élément électrochimique

La capacité de la batterie est estimée par l'équation suivante :

$$C_B = \frac{E_L \cdot S_D}{U_B \cdot DOD_{max} \cdot T_{cf} \cdot \eta_B} \quad (I.10)$$

C_B : La capacité de la batterie

E_L : Demande de charge

S_D : Jours d'autonomie

U_B : Tension de fonctionnement de la batterie

DOD_{max} : Profondeur de la décharge

T_{cf} : Facteur de correction de température

η_B : Rendement charge/décharge

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie à savoir :

- **Rapports de chargement et déchargement:** Si la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent que celui spécifié par le constructeur, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Pour une même batterie, sa capacité varie en fonction du régime de décharge qu'on lui applique (Figure I.20). Généralement, plus le régime de décharge est important, plus la capacité diminue (pour la décharge en cours).

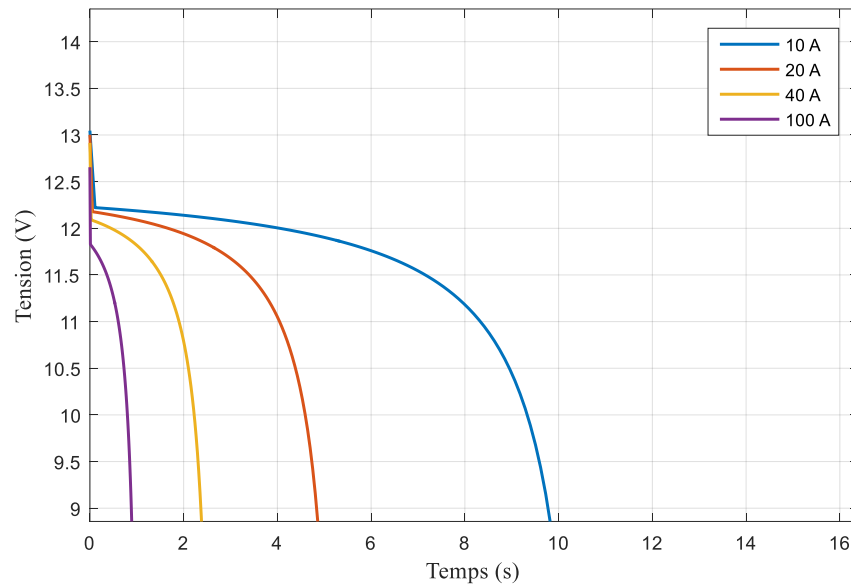


Figure I.20: Courbes caractéristiques de décharge

En outre, une batterie peut avoir une capacité C de 100 Ah à un régime de C10 (décharge complète de la batterie en 10 heures avec un courant de 10 A) et la même batterie aura une capacité C de 100 Ah à un régime de C5 (décharge complète de la batterie en 5 heures avec un courant de 20 A).

- **Température (T_{cf}):** Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27°C. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut engendrer la perte d'eau et diminuer la durée de vie de cette batterie.
- **Profondeur de décharge:** La profondeur de décharge (DOD) est les ampères-heures retirés d'une batterie complètement chargée. Elle est définie par le rapport en pourcentage de la capacité nominale de la batterie à la vitesse de décharge. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications à énergie renouvelable sont conçues pour des décharges allant jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Cependant, plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.
- **Autodécharge:** L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (Sans charge) pendant un temps donné. Il s'agit d'une limitation technologique au stockage de l'énergie électrique sur accumulateur.
- **Rendement (η_B):** Est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

- **Durée de vie (Vieillessement et usure):** La durée de vie d'une batterie n'est pas standard. En effet, celle-ci peut varier de 3 à 10 ans selon la technologie, le mode et les conditions d'utilisation de cette dernière. Le vieillissement et l'usure entraînent une perte progressive de la capacité des batteries avec le temps (sur plusieurs années) et l'usage (Plusieurs cycles de charge et de décharge).

I.5.3.2. Les type des batteries

Les principaux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans les systèmes énergétiques sont [21]:

I.5.3.2.a. Batterie au Plomb

Constituent l'investissement le plus économique pour un système multi-sources et présentent l'avantage d'être recyclable à plus de 90%. Cependant, ces batteries sont sensibles aux mauvais usages et leur durée de vie est souvent bien inférieure à celle du dispositif générateur d'électricité. En effet, les batteries au plomb dans leur technologie actuelle acceptent assez mal les décharges profondes. La profondeur de décharge est en effet responsable de la dégradation de ces batteries, conduisant à une réduction notable de leur durée de vie lorsqu'elles sont utilisées dans des conditions extrêmes [21].

I.5.3.2.b. Les batteries alcalines (Ni/Cd et Ni/MH)

Sont beaucoup plus robustes mais aussi plus coûteuses. Elles sont mieux adaptées aux basses températures. Par contre, leur recyclage est compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant [21].

I.5.3.2.c. Les batteries au lithium

Présentent « techniquement » les meilleures performances. L'autodécharge des accumulateurs Li-ion est en effet faible alors que leur énergie massique stockée est relativement bien supérieure. Ceux-ci permettent par ailleurs un cyclage à grande profondeur de décharge avec un impact moindre sur les performances comparativement à l'accumulateur au plomb surtout, mais aussi au nickel-cadmium. Les récentes améliorations de la technologie Li-ion ont confirmé son potentiel pour les applications stationnaires compte tenu de ses caractéristiques spécifiques : fort rendement énergétique, durée de vie élevée, absence de maintenance, fiabilité et prédictibilité du comportement [21].

Tableau I.4: Caractéristiques chaque type de batterie [22]

Type de batteries	au Plomb	(Ni/Cd et Ni/MH)	lithium
Tension à vide	2 - 2,1V	1,26V - 1,3V	3,3V
Capacité spécifique théorique	120Ah.kg ⁻¹	180Ah.kg ⁻¹	370Ah.kg ⁻¹
Capacité spécifique pratique	7 à 20Ah.kg ⁻¹	30 à 50Ah.kg ⁻¹	35Ah.kg ⁻¹
Densité énergétique massique	15 – 40Wh.kg ⁻¹	30 – 60Wh.kg ⁻¹	110Wh.kg ⁻¹
Densité énergétique volumique	40 – 100Wh.dm ⁻³	80 – 160Wh.dm ⁻³	250Wh.dm ⁻³
Durée de vie	nombre de cycles = 200 – 400 en version étanche, 600 – 1000 en version tubulaire	nombre de cycles = entre 500 et 1000 quand la profondeur de décharge (DOD) est de 100% à chaque cycle ; entre 5000 et 10000 quand DOD est de 25% à chaque cycle	nombre de cycles > 2000 cycles à DOD 100%
Températures d'utilisation	de -20°C à +60°C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ stockage : de -30°C à +50°C ▪ charge : de 0°C à +45°C ▪ décharge : de -20°C à +60°C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ stockage : de -20°C à +50°C ▪ charge : de 0°C à +45°C ▪ décharge : de -20°C à +60°C
Rendement faradique global	entre 85 et 90%	entre 75 et 80%	entre 90 et 95%
Autodécharge	de l'ordre de 0,5% par jour	de l'ordre de 2% par jour	0,15% par jour

Dans notre étude, on a choisi des batteries plomb acide avec la dernière technologie AGM (Absorbant Glass Mat) de type VARTA (Vertrieb Aufladung Reparatur Transportabler Accumulatoren) car elle procure d'énormes réserves d'énergie afin d'alimenter de nombreux

appareils électriques pendant toute sa longue durée de vie. Avec une autodécharge minimale, elle se prête parfaitement à une utilisation saisonnière et ne nécessite aucun entretien.

Les paramètres de notre batterie sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.5: Paramètres de la batterie AGM

Type	Plomb acide
Tension nominal	12 V
Capacité	105 Ah
<i>SOC</i>	90%
Temps de réponse	30 s
La tension Max	13.06 V

I.5.4. Modèle de la charge (MCC)

Les machines CC sont les premières à apparaître parmi les machines électriques. Leur principe de fonctionnement est le suivant : le stator (inducteur) fournit un champ magnétique de direction et sens constants dans l'entrefer (via un électro-aimant ou un aimant permanent).

Le rotor (induit) est équipé d'un certain nombre d'électro-aimants (spires) dont la polarité est inversible par un système mécanique de balais-collecteurs figure I.21 ; la polarité de chaque spire est inversée une fois par demi-tour de façon à créer un champ magnétique induit en quadrature avec le champ inducteur pour produire un couple électromagnétique [23].

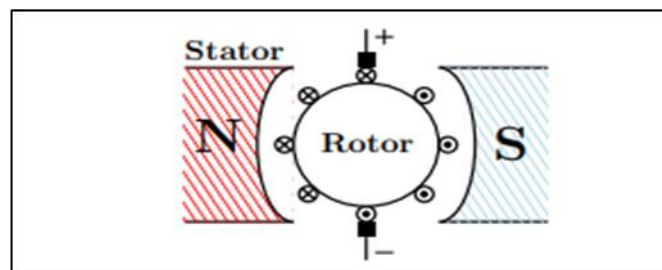


Figure I.21 : Schéma d'une machine CC

Suivant la configuration des bobinages statorique et rotorique, il existe 5 sous-catégories de machines CC [23]:

- **machine à excitation séparée** : le stator et le rotor sont séparément alimentés.
- **machine série** : les enroulements statorique et rotorique sont montés en série.

- **machine shunt ou à excitation parallèle** : les enroulements inducteur et induit sont montés en parallèle.
- **machine à excitation composée** : une partie du stator est montée en série avec le rotor et un autre est de type shunt.
- **machine à aimant permanent** : l'inducteur est un aimant permanent.

I.5.4.1. Avantages et inconvénients

Les machines CC sont plus faciles à commander que les machines AC. En revanche, elles ont un rapport puissance/volume inférieur à celui des machines AC, et la présence d'une commutation mécanique raccourcit la durée de vie de ces machines (entretien nécessaire) et limite leur utilisation dans certains lieux vulnérables aux étincelles générées par le système de commutation [23].

I.5.4.2. Machine à aimant permanent

En effet on s'intéresse à la machine CC à aimant permanent, dont le bobinage inducteur est remplacé par un aimant de flux ψ .

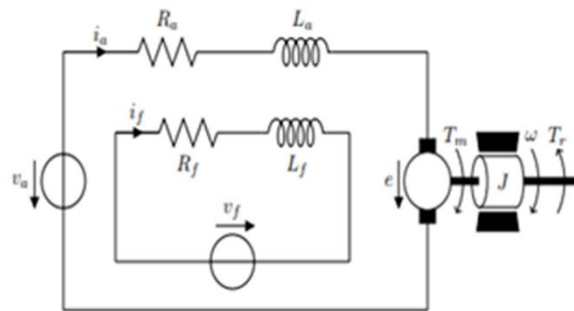


Figure I.22 : Représentation schématique d'une MCC à aimant permanente

Les équations mécanique et électrique de cette machine s'écrivent [23]:

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (\text{I.11})$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - f_v \Omega \quad (\text{I.12})$$

Avec

$$e = K_e \Omega \quad (\text{I.13})$$

$$C_m = K_e i_a \quad (\text{I.14})$$

$$K_e = K \psi \quad (\text{I.15})$$

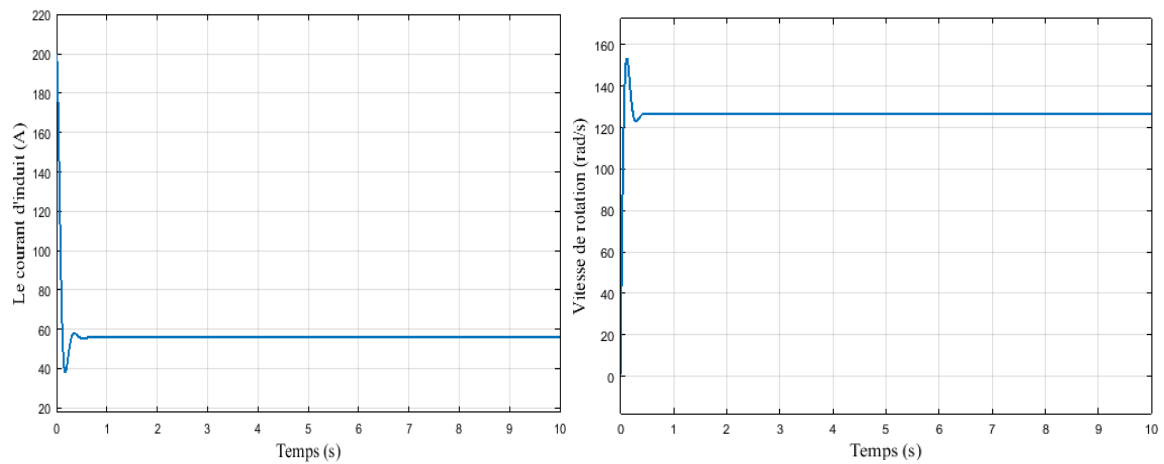
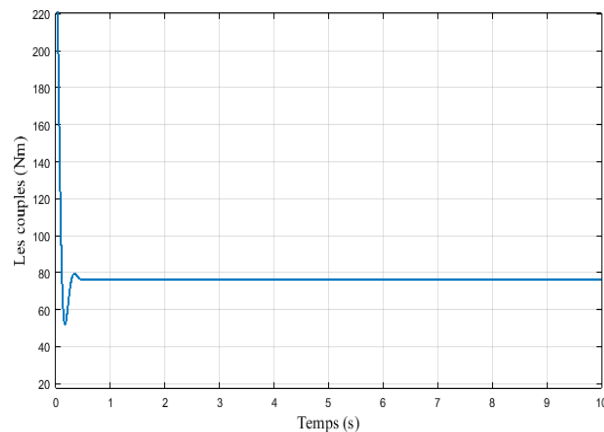
Les paramètres de notre machine sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.6: Paramètres de la machine CC à aimant permanent

I_{nm}	50 A
U_{nm}	240 V
R_a	1.2 Ω
L_a	0.05 H
C_m	1.3694 N.m/A
J	0.08 Kg.m ²

I.5.4.3. Simulation de la machine à aimant permanent

Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation de notre moteur à courant continu à aimant permanent sous MATLAB/SIMULINK pour une tension nominale égale 240 V et un couple résistant égale à 73. N.m.

**Figure I.23 :** Le courant d'induit et la vitesse de rotation de la MCC**Figure I.24 :** les couples de la MCC

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la structure générale d'un système hybride (PV-éolienne) avec des batteries plomb acide de type AGM, associé avec une charge motorisée de type MCC à aimant permanent.

Ensuite, on modélise et donnée des résultats de simulation des différentes sources hybrides, les résultats montrent que les modèles proposés reproduisent avec une très bonne précision le comportement réel de ces sources et peut être utilisé afin d'étudier le transfert d'énergie dans les systèmes hybrides qui est l'objectif final de cette étude.

Finalement la dernière partie de ce chapitre est consacré à la modélisation d'un moteur à courant continu à aimant permanent comme un élément de charge et qui peut être dans une application réel une pompe d'eau ou un chariot élévateur.

Chapitre II



*Dimensionnement du
système hybride
(PV-Eolienne-Batteries)*



II.1. Introduction

Les systèmes hybrides à énergie renouvelables dépendent évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que la charge. Ceci requiert une campagne de mesure est une analyse préalable des spécificités du site.

L'étude du dimensionnement permet de trouve un équilibre entre l'apport énergétique et la demande qui est en fonction du temps (jour, saison, année) [24].

Les deux sources produisent de l'électricité selon les données locales du vent et de l'irradiation solaire, pour assurer l'énergie demandée par la charge, les batteries peuvent contrôler et stocker l'énergie.

Ce chapitre est donc consacré à la problématique du dimensionnement. Il est organisé de la manière suivante : dans une première partie, on présente la situation de la wilaya Adrar et ses données métrologiques. Puis, on a fait une évaluation énergétique des sources solaires et éoliennes. En plus on a dimensionné notre système à partir l'énergie demandée et la capacité des batteries.

II.2. Présentation de site d'Adrar

Adrar, est une ville saharienne située dans le Sud-Ouest Algérien. Elle se trouve à 1500 km d'Alger. Elle est bordée au Nord par les wilayas de El Bayadh et de Ghardaïa, à l'Ouest par les wilayas de Béchar et de Tindouf, à l'Est par la wilaya de Tamanrasset, et au Sud par la Mauritanie et le Mali. La wilaya d'Adrar s'étend sur une superficie totale de 427 698 km^2 [25].

Longitude: -0.183 [°E], altitude: 279m, Latitude: 27.817 [°N]

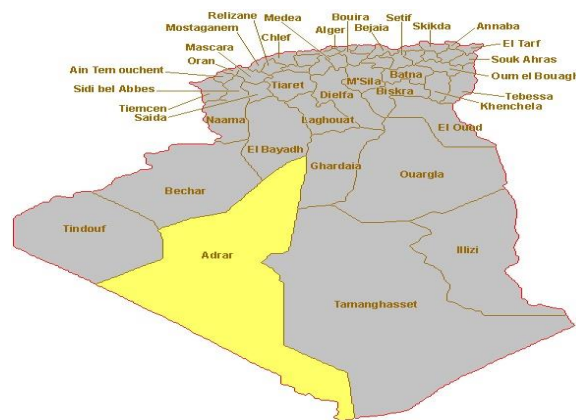


Figure II.1 : Position d'Adrar dans l'Algérie [25]

II.3. Données métrologique de la ville d'Adrar

Le choix de ce site s'est fait du fait qu'Adrar est une ville très riche en énergie solaire et éolien comme celle présenté dans le tableau II.1. Pour créer une base de référence pour notre étude on a choisi d'adopter des données pertinentes des mesures techniques faites pendant une année, on utilise le logiciel Meteonorm.

- L'irradiation moyenne journalière sur plan horizontal est importante sur la période mars - août, comparativement aux autres mois de l'année, elle dépasse les 240 kWh/m² durant les mois de juin et juillet.
- on peut constater que le site d'Adrar est doté aussi d'un gisement éolien considérable avec une vitesse moyenne annuelle du vent de l'ordre de 5.1 m/s pour une hauteur de 10 mètres et une vitesse moyenne mensuelle généralement élevée pendant la période estivale mai - Août dépassant les 5.3 m/s par rapport aux autres mois de l'année. Ceci prouve clairement que le site d'Adrar est bien adapté pour une production de l'énergie éolienne.

Tableau II.1: Données métrologique d'Adrar

	G [kwh/m ²]	D [w/m ²]	DG [h]	V _v [m/s]	T [C°]	H [%]	DV[deg]
Janvier	141	25	253	4.8	12.9	38	90
Février	142	47	246	5.2	16.2	30	90
Mars	202	50	298	5.2	21.4	22	135
Avril	221	65	316	5.8	25.3	18	0
Mai	241	79	334	6.1	30.5	16	90
Juin	240	83	336	5.6	35.2	12	90
Juillet	245	106	319	5.5	38.2	11	45
Août	225	95	294	5.3	37.2	12	90
Septembre	192	76	267	5.0	33.1	20	90
Octobre	161	68	272	4.5	27.5	26	90
Novembre	136	37	244	4.1	19.0	34	135
Décembre	124	33	249	3.9	14.4	41	135
Année	2266	64	3428	5.1	25.9	23	90

II.4. Estimation des ressources solaires

II.4.1. Composant de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus, une fois arrivé au sol une partie du rayonnement est réfléchi comme représentés dans la figure suivante [26]:

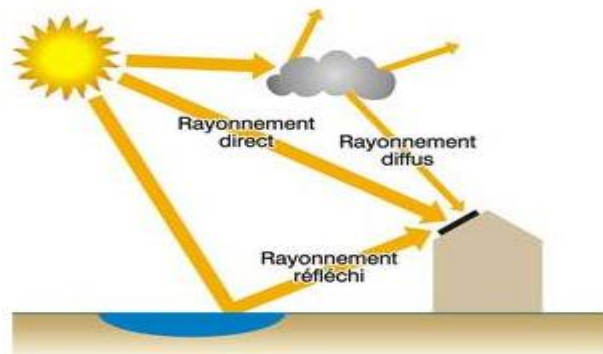


Figure II.2: Les différents composants du rayonnement solaire [26]

- **Rayonnement direct (D)** : qui est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres pouvant être concentrés par les miroirs. Il peut être mesuré par un Pyrhéliomètre [27].
- **Rayonnement diffus (I)** : est le rayonnement reçu sur une surface horizontale parvenant de toute la voûte céleste à l'exception du disque solaire. Il s'agit du rayonnement diffusé par les aérosols, les gouttelettes d'eau, la vapeur d'eau vers le sol. Il peut être mesuré par un Pyranomètre avec un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le Pyranomètre du rayonnement solaire direct [27].
- **Rayonnement réfléchi (R)** : c'est le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface à l'énergie solaire incidente Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace. Il peut être mesuré par un Albédo-mètre [27].

- **Rayonnement global (G) :** On mesure la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale grâce à un Pyranomètre qui comprend une double coupelle de verre, un thermophile (série de thermocouples) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par ce thermophile sous l'action d'un rayonnement. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température est créée entre les secteurs noirs et les secteurs blancs. Cette différence de température est détectée par la thermophile qui convertie l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de millivolt est converti par un facteur de calibrage en un flux en watt par mètre carré [27].

Le rayonnement globale reçue sur un plan horizontal est donnée par :

$$G = I + D + R \quad (\text{II.1})$$



Figure II.3 : Appareil de mesure des rayons (Pyranomètre, Pyrhéliomètre, albédo-mètre) [27]

On donne par la figure II.4, le rayonnement mensuel global et diffuse, sur un plan horizontal de site d'Adrar :

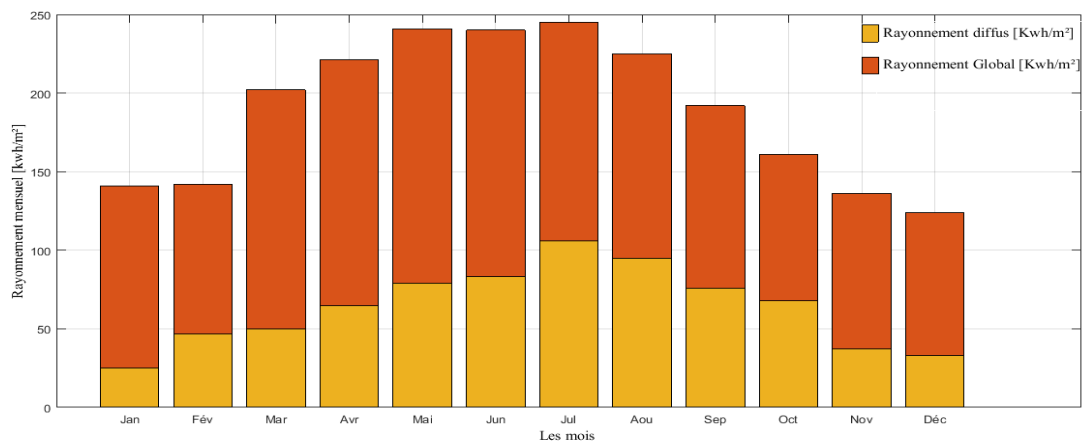


Figure II.4 : Représentation de l'irradiation globale et diffus mensuelle horizontal

II.4.2. Durée d'insolation (DG)

La durée d'insolation ou d'ensoleillement exprime la longueur cumulée des périodes d'exposition directe au soleil entre le lever et le coucher du soleil pour un endroit donné du globe terrestre. Elle est mesurée à l'aide de L'héliographe [27].

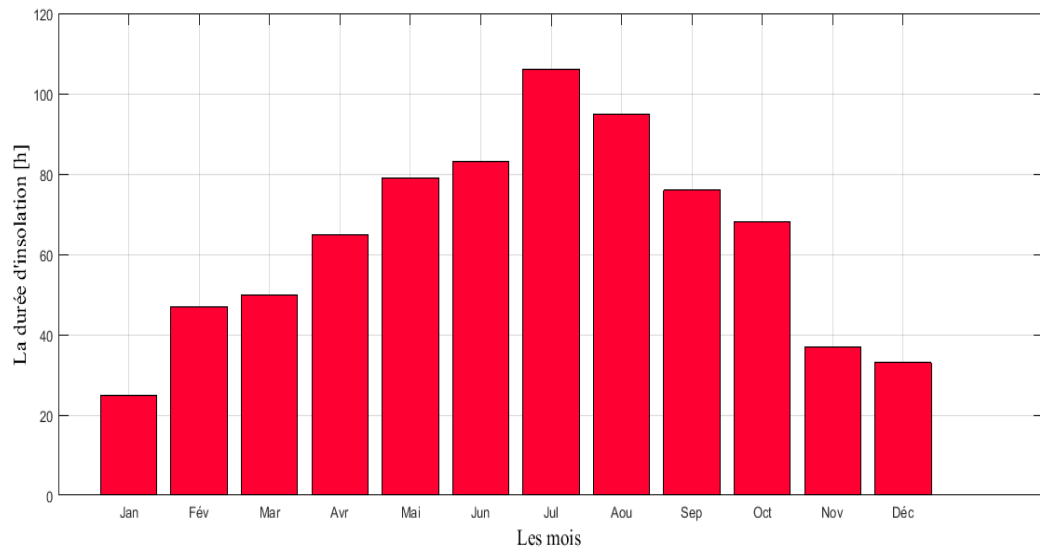


Figure II.5: Durée d'insolation.

II.5. Estimation des ressources éoliennes

II.5.1. Données de vent

Le vent n'est autre que de l'air en mouvement. Il est produit par les variations de pressions atmosphériques sur la surface de la terre. Ces variations sont engendrées par les gradients de température, dus à une distribution inégale de l'énergie solaire et aux différences de propriétés thermiques entre les surfaces des continents et des océans. Il peut être mesuré par une girouette, d'anémomètres, de thermomètre et/ou de baromètre et/ou d'hygromètre [21].



Figure II.6 : Anémomètres [20]

II.5.2. Caractéristiques du vent

Pour caractériser le vent, il s'agit de connaître [21] :

- **Son profil directionnel** : c'est-à-dire les tendances probabilistes de la direction du vent.
- **Son profil de vitesse** : c'est-à-dire les tendances probabilistes de vitesse, ainsi que sa répartition, la vitesse la plus fréquente, les vitesses extrêmes et les vitesses de rafale etc.
- **Ses variations annuelles** : mensuelles et journalières (voire horaires).
- **Son profil énergétique** : qui dépend de tous les points décrits ci-dessus, de la hauteur par rapport au sol, du relief environnant et des autres données climatiques (température, pression atmosphérique, hygrométrie).

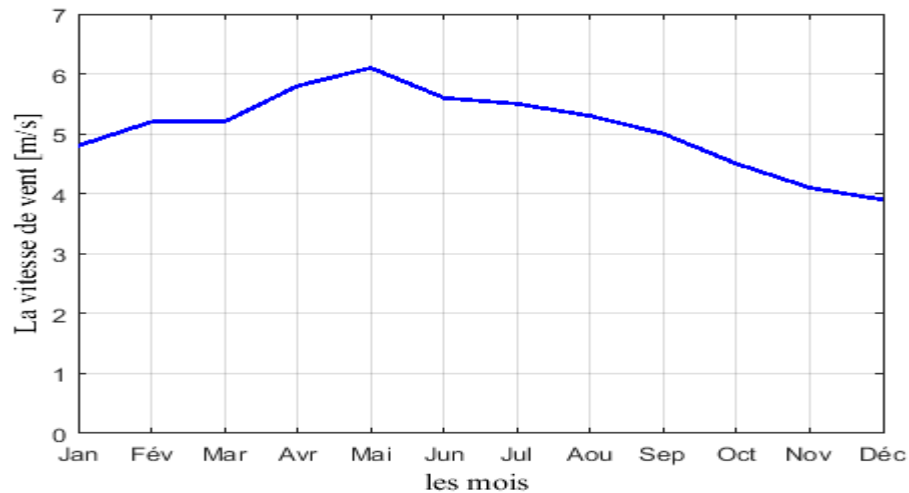


Figure II.7 : profile de vitesse de vent pour Adrar

II.5.2.1. la rose de vents

Chaque site éolien est caractérisé par une direction de la vitesse de vent dominante. Cependant, elle est variable comme la valeur de la vitesse du vent. Pour décrire ces propriétés spatiotemporelles le diagramme appelé rose des vents peut être élaboré. Il se présente comme un diagramme polaire, lequel répertorie l'énergie du vent disponible dans chaque direction en pourcent (parfois c'est la vitesse) et le temps de l'occurrence de chaque direction du vent en pourcent [28]. L'exemple d'Adrar est donné par la figure II.8.

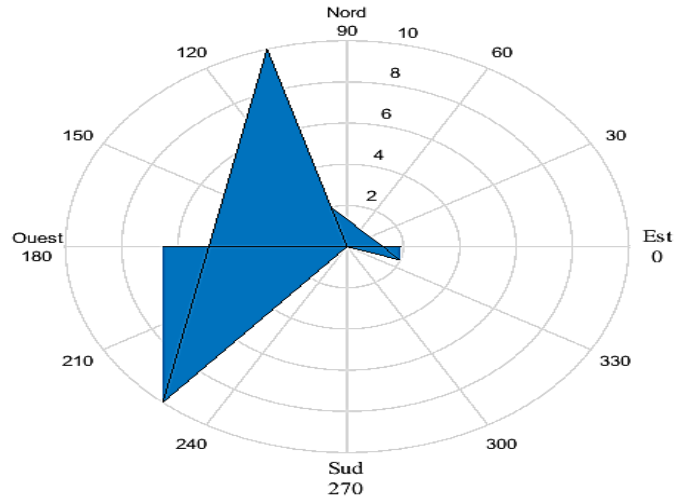


Figure II.8 : La rose de vent pour le site d'Adrar.

II.5.2.2. Distribution de Weibull

La caractéristique la plus importante est la distribution statistique de Weibull (figure II.9). Elle s'est révélée la plus adéquate pour l'emploi dans l'éolien. Elle modélise avec succès la probabilité de l'occurrence des vitesses de vent du gisement éolien [28].

L'expression (II.2) présente la fonction de distribution statistique de Weibull. Les paramètres k_v et C_v sont respectivement le facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en [m/s] [30].

$$F(v) = \frac{K_v}{C_v} \left(\frac{K_v}{C_v}\right)^{K_v-1} e^{-\left(\frac{v}{C_v}\right)^{K_v}} \quad (\text{II.2})$$

A partir des données mesurées, dans la station météorologique d'Adrar, les résultats de l'ajustement par la distribution de Weibull et les valeurs des paramètres de Weibull ont été calculés dans MATLAB par l'application de distribution fitting à 10 m du sol avec une vitesse moyenne du vent $V_v=6.83\text{m/s}$ ($K_v=2.15$ et $C_v=7.2\text{m/s}$).

La représentation de cette distribution sous MATLAB permet d'obtenir le graphe suivant :

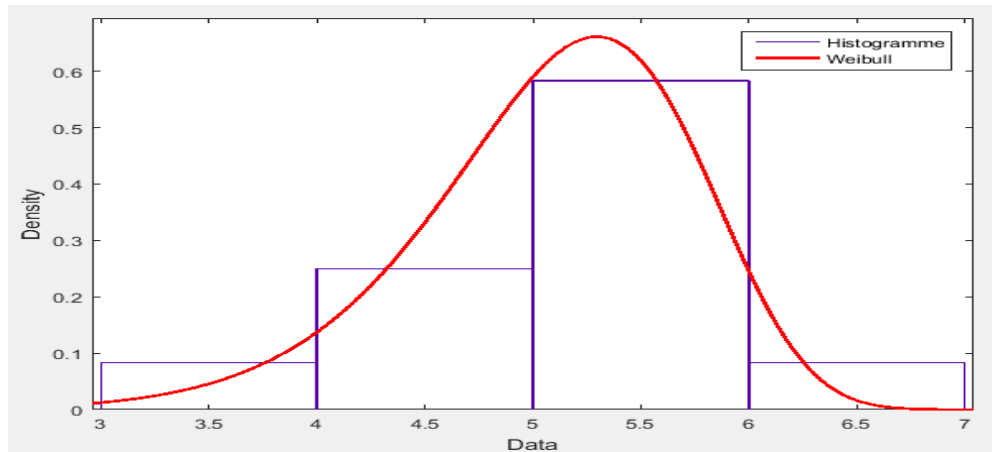


Figure II.9 : Histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar

II.6. Les données de la température

La wilaya d'Adrar enregistre des écarts de températures considérables. En été les températures sont maximales jusqu'à 40°C (juin-juillet – août). En hiver les températures peuvent atteindre parfois les 12°C en décembre et janvier.

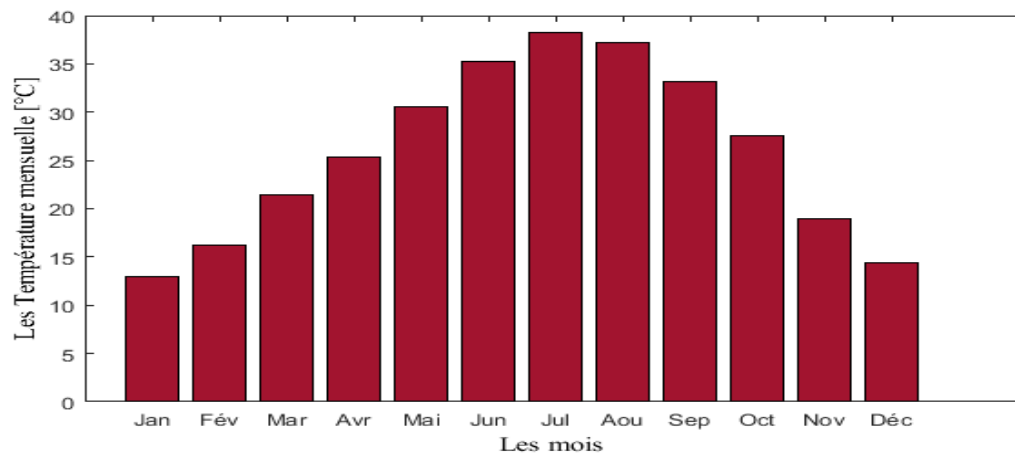


Figure II.10 : La température mensuelle de site d'Adrar.

II.7. Dimensionnement du système

Connue aussi sous le nom de méthode « Ampère-heure », cette méthode consiste à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire pour satisfaire la demande, puis peu à peu à réduire ce nombre, tout en calculant le pourcentage des besoins énergétiques annuels

fournis par le générateur PV et ainsi à compléter le reste par l'énergie fournie par un générateur complémentaire. En règle générale, ce dernier est un générateur diesel mais on pu adapter la méthode pour une génératrice éolienne qui présente un impact écologique réduit [21]. La démarche proposée est la suivante [29]:

II.7.1. Evaluation de la puissance à produire E_c pour satisfaire la demande

Comme vu dans le premier chapitre notre charge est un moteur à courant continu à aimant permanent, capable de fonctionner pendant une longue durée sans arrêt et qui a les caractéristiques résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Caractéristique du moteur MCC

Le courant nominal	$I_{nm} = 50 A$
La tension nominale	$U_{nm} = 240V$
Le courant max	$I_{mmax} = 4 * I_{nm} = 4 * 50 = 200A$
La puissance nominale	$P_{nm} = I_{nm} * U_{nm} = 50 * 240 = 12000w$
La puissance max	$P_{mmax} = 4 * I_{nm} * U_{nm} = 4 * 50 * 240 = 48000w$

Si on considère notre charge comme une pompe par exemple qui fonctionne pendant 15 heures par jours on trouve que les besoin énergétique journalière de notre charge sont égaux à $15 * P_{nm}$, le résultat trouvé est suivant :

$$E_c = 180kwh/j .$$

II.7.2. Détermination des nombres de batteries de stockage

Comme vue dans le chapitre précédent les batteries de stockage utilisées sont de type Plomb Acide à Agel avec une tension nominale de 12 V et une capacité de 105Ah.

Pour atteindre une tension de Bus continu égale à 240 V on a mis plusieurs batteries en série et afin d'augmenter la capacité de stockage du notre système hybride plusieurs batteries ont été connectées en parallèles. Les qui suivent montres comment calculer le nombre de batteries à mettre en séries et en parallèles [29].

II.7.2.a. Le nombre des batteries en série

$$N_{Bs} = \frac{U_{nm}}{U_{bat}} = \frac{240}{12} = 20 \text{ batteries} \quad (\text{II.3})$$

Où :

N_{Bs} : Nombre de batteries en série.

U_{nm} : La tension nominale de bus continu qui correspond à la tension nominale du moteur (V).

U_{batn} : La tension nominale d'une batterie (V).

II.7.2.b. Le nombre des batteries en parallèle pour une autonomie de 24 heures

Pour dimensionner la capacité de stockage de notre système pour une autonomie de 24 heures et un courant nominale du MCC de 50A on a utilisé l'équation suivante :

$$C_u = I_{nm} * 24\text{heurs} = 50 * 24 = 1200\text{Ah} \quad (\text{II.4})$$

Ensuite on a vérifié que le courant de décharge des batteries ne dépasse pas dans tous les régimes de travail (démarrage de notre charge MCC) une valeur égale à .

Si on divise $\frac{1200}{5}$ on trouve 240A donc la condition précédente a été vérifiée parce que $C_u/5 = 240 >$ est supérieur au courant de démarrage $I_{max} = 200\text{A}$.

$$N_{Bp} = \frac{C_u}{C_B} = \frac{1200}{105} = 11.84 \approx 12 \text{ branches} \quad (\text{II.5})$$

Où :

N_{Bp} : Le nombre des batteries en parallèles.

C_u : La capacité nominale de tout le système de stockage (Ah).

C_B : La capacité nominale de chaque batterie (A).

II.7.2.c. Le nombre total des batteries :

$$N_b = N_{Bs} * N_{Bp} = 12 * 20 = 240 \quad (\text{II.6})$$

N_b : Le nombre total des batteries.

II.7.3. Détermination du nombre des modules photovoltaïques à installés

Le dimensionnement d'un champ photovoltaïque a pour but de déterminer la puissance crête du générateur solaire, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part, et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part [29].

Il faut, en premier lieu, estimer les besoins en électricité et établir la durée de la période d'ensoleillement minimal de la région d'Adrar où le système sera installé; une fois le gisement du site est effectué, il reste à choisir le nombre des modules [29].

On a déjà vu que la puissance des module est égale à 130.096 Watt, la tension maximale est égale à 34.6 V et le courant max égale à 3.76 A.

II.7.3.a. Calcule le nombre des modules photovoltaïques à mettre en série :

Pour calculer les nombres des modules photovoltaïques en série on a opté à la méthode suivante:

Puisque les batteries sont connectées directement aux modules photovoltaïques on a obligé à respecter la tension de charge maximale de la batterie qui est égale à 13.06V.

Comme on a 20 batteries misent en série, donc la tension maximale des batteries est égale à $20 * 13.06 = 261.2$ V pour faciliter le calcule on a pris une tension égale à 262V.

$$N_{ss} = \frac{U_{BatMax}}{U_{mp}} = \frac{262}{34.6} \approx 8 \quad (II.7)$$

Où : N_{ss} : le nombre des modules en séries.

U_{mp} : La tension maximale d'un module.

II.7.3.b. Calcule le nombre des modules photovoltaïques à mettre en parallèle :

Pour calculer les nombres des modules photovoltaïques en parallèle on a opté à la méthode suivante:

Puisque les batteries sont connectées directement aux modules photovoltaïques on est obligé de respecter le courant maximum de charge de la batterie qui est égale à :

$$\frac{C}{5} = \frac{1200}{5} = 240Ah \quad (II.8)$$

Le courant max qui peut être fournit par nos modules photovoltaïques utilisés est de 3.76 A donc le nombre totale à mettre en parallèle est calculé par la méthode suivante:

$$N_{pp} = \frac{C / 5}{I_{PV \max}} = \frac{240}{3.76} \approx 64 \quad (\text{II.9})$$

Le nombre totale des modules photovoltaïques est égale à :

$$64 * 8 = 512 \text{ modules} \quad (\text{II.10})$$

II.7.4. Dimensionnement de l'éolien

II.7.4.a. Calcule la correction de la vitesse

Pour des applications en génie énergétique éolien, l'estimation de la puissance moyenne produite par un aérogénérateur, passe nécessairement par la connaissance de la vitesse du vent à la hauteur de son moyeu. Pour obtenir des données de vitesses du vent à une hauteur désirée, on doit procéder à une extrapolation verticale des vitesses du vent mesurées généralement à la hauteur normalisée de 10 mètres du sol, au moyen du modèle de puissance (Justus et Mikhaïl 1976), souvent utilisé dans la littérature existante [30].

$$\frac{V_{50}}{V_{10}} = \left(\frac{Z_{10}}{Z_{50}} \right)^\alpha \quad (\text{II.11})$$

$$V_{50} = \left(\frac{Z_{50}}{Z_{10}} \right)^\alpha V_{10} = \left(\frac{10}{50} \right)^{0.2} * 5.1 = 7.04 \text{ m / s} \quad (\text{II.12})$$

D'où :

α : Le coefficient de rugosité (0.2 zone désertique et libre de tout obstacle)

V_{50} : La vitesse moyenne de vent a l'attitude de 50m (m/s)

V_{10} : La vitesse moyenne mesurée à 10 m (m/s)

Z_{50} : La hauteur (m)

II.7.4.b. Calcule du rayon de la turbine

Les caractéristiques celle définie dans le chapitre précédent a reprenons pour définir le comportement de la turbine éolien souhaité, le coefficient optimale (C_p) est égal à 0.48 pour un ratio de vitesse λ qui vaut 7.2 et d'angle de calage égal à 0° . Le dimensionnement du générateur éolien permet de déterminé la surface balayé par l'aérogénérateur et leur diamètre [21], Notre

éolienne a été dimensionnée à 50 (kWatt) pour que démarrer notre moteur MCC qui absorbe une puissance de (48 kWatt) si la vitesse du vent est nominale est égale à 13m/s:

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p \rho S V_{nom}^3 \quad (\text{II.13})$$

$$S = \frac{2P_{eol}}{C_p \rho V_v^3} = \frac{2 * 50 * 10^3}{0.48 * 1.25 * 13^3} = 75.86 m^2 \quad (\text{II.14})$$

$$S = \pi * R^2 \quad (\text{II.15})$$

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{75.86}{\pi}} = 4.91 \approx 5m \quad (\text{II.16})$$

Où :

P_{eol} : La puissance nominale de l'éolien (W)

C_p : Le coefficient de puissance.

ρ : La masse volumique de l'air (1.25 Kg/m^3).

S : La surface de l'aérogénérateur (m^2)

V_{nom} : La vitesse de vent nominale (m/s)

R : Le rayon du l'aérogénérateur (m).

II.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré premièrement au recueil et au traitement des données de la vitesse du vent, de l'irradiation soleil et de la consommation électrique au site d'Adrar. Ces données sont nécessaires pour évaluer les potentiels énergétiques renouvelables du site et pour estimer la consommation énergétique. Dans un premier temps, on a vu que le potentiel énergétique récupérable au site Adrar est très important (Irradiation annuelle = 2266 kWh/m^2 et vitesse moyenne annuelle = 5.1 m/s à 10 m de la hauteur).

Après, dans la deuxième étape de ce chapitre on a déterminé la taille optimale du système du stockage composé par des batteries, le nombre des modules photovoltaïque et la surface balayé par le générateur éolien, afin de satisfaire la demande électrique.

Chapitre III

Commande en MPPT de la GSAP de l'éolienne



III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la commande vectorielle en vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) en tenant compte des spécificités du l'éolien l'objectif principal de cette commande est d'assurer un bon rendement de la puissance électrique générée.

On a commencé par la présentation d'un modèle détaillé des différents sous-systèmes qui décrivent le comportement électrique et mécanique de la génératrice synchrone à aimant permanente ainsi que son convertisseur de puissance représenté par un redresseur triphasé commandé par des IGBT.

Ensuite on a expliqué la stratégie à suivre pour commander l'éolienne avec une boucle d'asservissement de vitesse munie d'un régulateur PI permettant d'optimiser l'extraction maximale de l'énergie du vent à travers l'ajustement électronique continu de la vitesse spécifique de la turbine qui conduit à un point optimal à chaque fois que la vitesse de vent varie.

A la fin du ce chapitre on propose quelques résultats de simulation concernant le réglage de la vitesse et la puissance requise lors du fonctionnement.

III.2. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents

Dans la traction de la production électrique par une turbine éolien, on a utilisé une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) triphasée à distribution sinusoïdale du flux, elle porte ce nom parce que le rotor tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator.

Cette partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une GSAP par des équations électriques et mécaniques en utilisant la transformation de Park (figure III.1). Cette transformation permet de changer les tensions et les courants pour chaque bobine dans le référentiel (a, b, c) en deux composantes dans le référentiel (d, q, O) . De plus, cette représentation est inévitable car les modèles dynamiques des machines à courant alternatif sont relativement lourds et complexes. Afin de les simplifier, on procède à l'aide de cette transformation. Le nouveau référentiel (d, q, O) peut être stationnaire ou lié au champ tournant ; il est généralement choisi lié au champ tournant de telle sorte que les courants statoriques (i_{sd} et i_{sq}) soient constants [31].

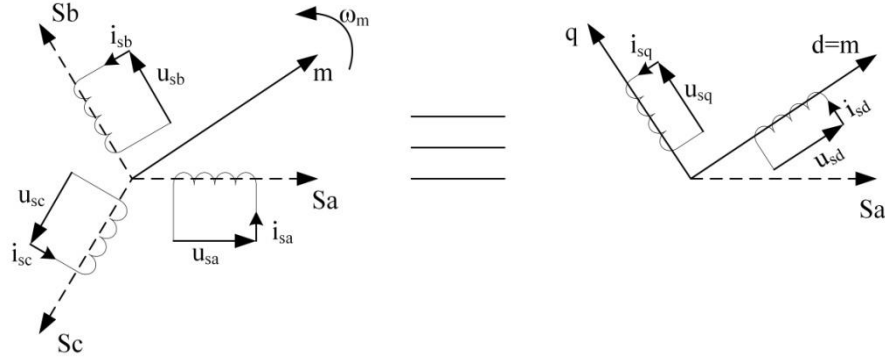


Figure III.1: Transformation de Park: repère a, b, c et repère d, q de Park.

Dans le repère de Park, les équations électriques de la GSAP sont les suivantes [30]:

$$\psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \Psi \quad (\text{III.1})$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \quad (\text{III.2})$$

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_{sq} i_{sq} \quad (\text{III.3})$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r (L_{sd} i_{sd} + \Psi) \quad (\text{III.4})$$

$$T_e = \frac{3}{2} P [\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}] \quad (\text{III.5})$$

Où ψ_{sd} , ψ_{sq} , u_{sd} , u_{sq} , i_{sd} et i_{sq} sont respectivement les flux, les tensions et les courants du moteur dans le repère $d-q$, ω_r est la vitesse angulaire électrique et T_e est le couple électromagnétique. Ψ est le flux des aimants permanents, P est le nombre de paires de pôles, R_s est la résistance du stator. Les inductances du stator peuvent être décomposées en deux composantes différentes L_{sd} et L_{sq} ; si le moteur a un rotor à pôle lisse, Les deux inductances ont des valeurs similaires et peuvent être considérées comme égales comme c'est le cas dans notre travail.

Le modèle est complété par les équations mécaniques définies comme suit [31] :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l - \beta \omega_m \quad (\text{III.6})$$

$$\omega_r = P \omega_m \quad (\text{III.7})$$

Où, J est le moment d'inertie de la génératrice et la charge couplée, T_l le couple résistant, β_M le coefficient de frottement et ω_m la vitesse mécanique angulaire.

Les paramètres de la GSAP correspondent à celle utilisée dans notre travail présentée dans le tableau précédent :

Tableau III.1: Paramètres de la GSAP

R_s	0.005 Ω
L_{ds}	0.00395 H
P	4
ϕ	0.192
J	0.25 (Kg.m ²)
f	0.005 (N.m.s)
T_f	4 (N.m)

III.3. Modélisation de convertisseur pour la GSAP

On peut considérer que la chaîne de conversion électronique est composée d'un redresseur triphasé à deux niveaux qui permet la conversion des courants triphasés alternatifs à des courants continu (figure III.2.a) ce dernier est inséré entre le bus continue et la GSAP. Là encore, l'emploi d'un modèle à valeurs moyennes du redresseur.

Dans le modèle à valeurs moyennes du redresseur à deux niveaux que on a utilisé, on considère que le convertisseur est une source de courant parfaite, (figure III.2.b). Notons que ce modèle est utilisé dans un exemple de Simulink sous la dénomination « Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive » [31].

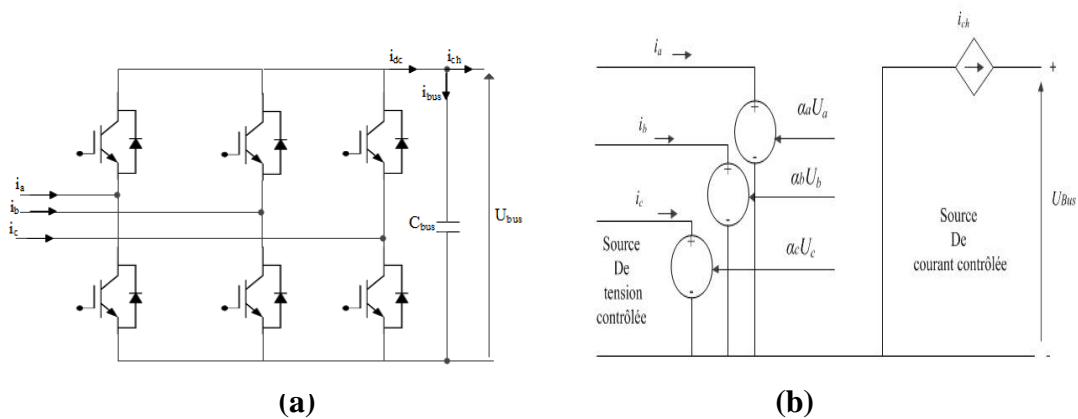


Figure III.2: Redresseur de tension associé avec la GSAP

Il est composé de trois sources de tension contrôlées au côté alternatif de la GSAP et d'une source de courant contrôlée du côté du Bus continu. La source à courant continu permet de représenter le comportement moyen du courant de charge fourni par la GSAP :

$$i_{ch} = \alpha_a i_a + \alpha_b i_b + \alpha_c i_c \quad (\text{III.8})$$

Où $(\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c)$ sont respectivement les rapports cycliques de la MLI des bras du redresseur a, b et c et (i_a, i_b, i_c) sont les courants triphasés correspondants. Les trois sources de tension à courant alternatif représentent les valeurs moyennes des tensions de du redresseur (u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}) en fonction de la tension du Bus continu u_{Bus} , donnée par l'équation suivante:

$$\begin{cases} u_{sa} = \alpha_a u_{Bus} \\ u_{sb} = \alpha_b u_{Bus} \\ u_{sc} = \alpha_c u_{Bus} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

III.4. La stratégie de commande vectorielle de la GSAP

La technique de la commande vectorielle est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la machine synchrone à aimants permanent en une structure équivalente à la machine à courant continu à excitation séparée du point de vue couple, pour permettre un découplage du couple et du flux [31].

III.4.1. Principe et structure de la commande

Le principe de la commande vectorielle avec alimentation en tension et commande en courant permet d'imposer le couple. Or, quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), le contrôle des courants reste cependant nécessaire [31].

Dans le cas des machines à rotor lisse, la commande la plus fréquemment utilisée consiste à simplifier le contrôle en imposant au courant direct une valeur nulle. Dans ces conditions, la composante en quadrature du courant est une image du couple.

A cause du flux constant des aimants permanents, on n'a pas besoin de le générer au moyen du courant i_{sd} , ce dernier peut être maintenu à une valeur égale à zéro, qui à son tour permet d'augmenter l'efficacité de l'entraînement [31].

Le schéma de la commande vectorielle de la GSAP est représenté par la figure III.3 :

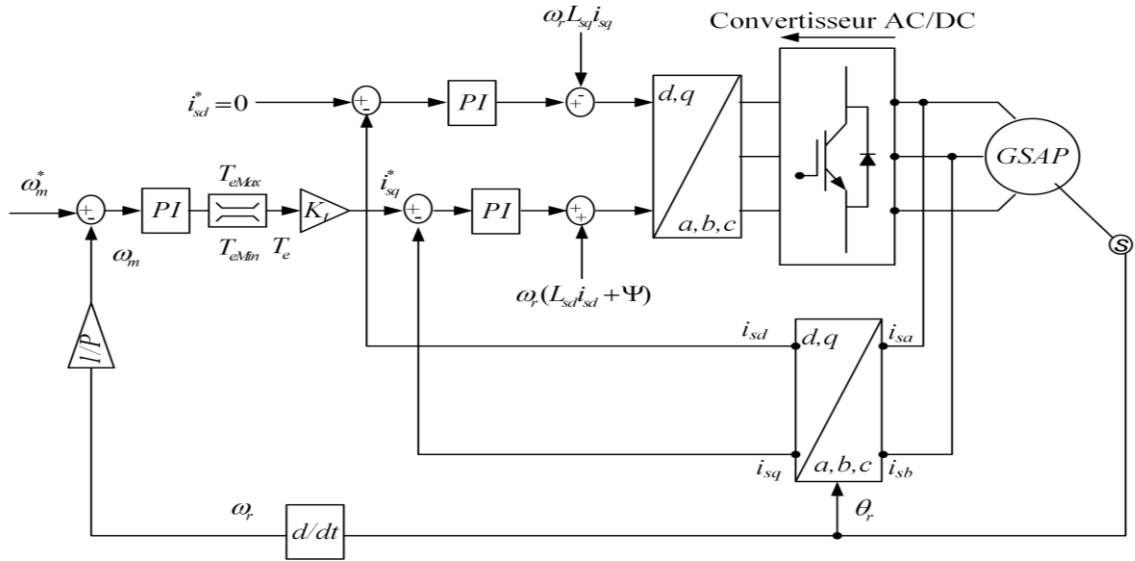


Figure III.3: Commande vectorielle de la GSAP

Le système de commande est divisé en trois boucles différentes qui sont :

- La boucle de courant i_{sd} pour le contrôle du flux.
- La boucle de courant i_{sq} pour le contrôle du couple.
- La boucle de vitesse pour le contrôle de la vitesse de rotation du moteur.

Le fait que le couple peut être commandé par le biais de i_{sq} vient de la simplification des équations III.1 et III.5 lorsque i_{sd}^* est égal à zéro [31].

$$T_e = K_t * i_{sq} \quad (\text{III.10})$$

Où:

$$K_t = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \Psi \quad (\text{III.11})$$

À partir des équations des tensions (III.3 et III.4) de la GSAP, on peut voir que les axes d et q ne sont pas complètement indépendants et qu'il y a un terme de couplage qui dépend des courants des autres axes. Afin d'assurer une régulation complètement indépendante des courants i_{sd} et i_{sq} , il est nécessaire de compenser l'effet du terme de couplage à la sortie des correcteurs PI de ces derniers (équations III.12, III.13) [31].

$$u_{sd} = \left[\overbrace{R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt}}^{\text{terme linéaire}} \right] - \underbrace{\omega_r L_{sq} i_{sq}}_{\text{terme de couplage (à compenser)}} \quad (\text{III.12})$$

$$u_{sq} = \underbrace{\left[R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} \right]}_{\text{terme linéaire}} + \underbrace{\omega_r (L_{sd} i_{sd} + \Psi)}_{\text{terme de couplage (à compenser)}} \quad (III.13)$$

Les figures III.4.a et III.4.b représentent les deux boucles de courant i_{sd} et i_{sq} dans le domaine de Laplace, un terme de découplage est ajouté pour compenser le couplage entre i_{sd} et i_{sq} , les boucles simplifiées obtenues sont données en figure III.5.a et III.5.b, [31].

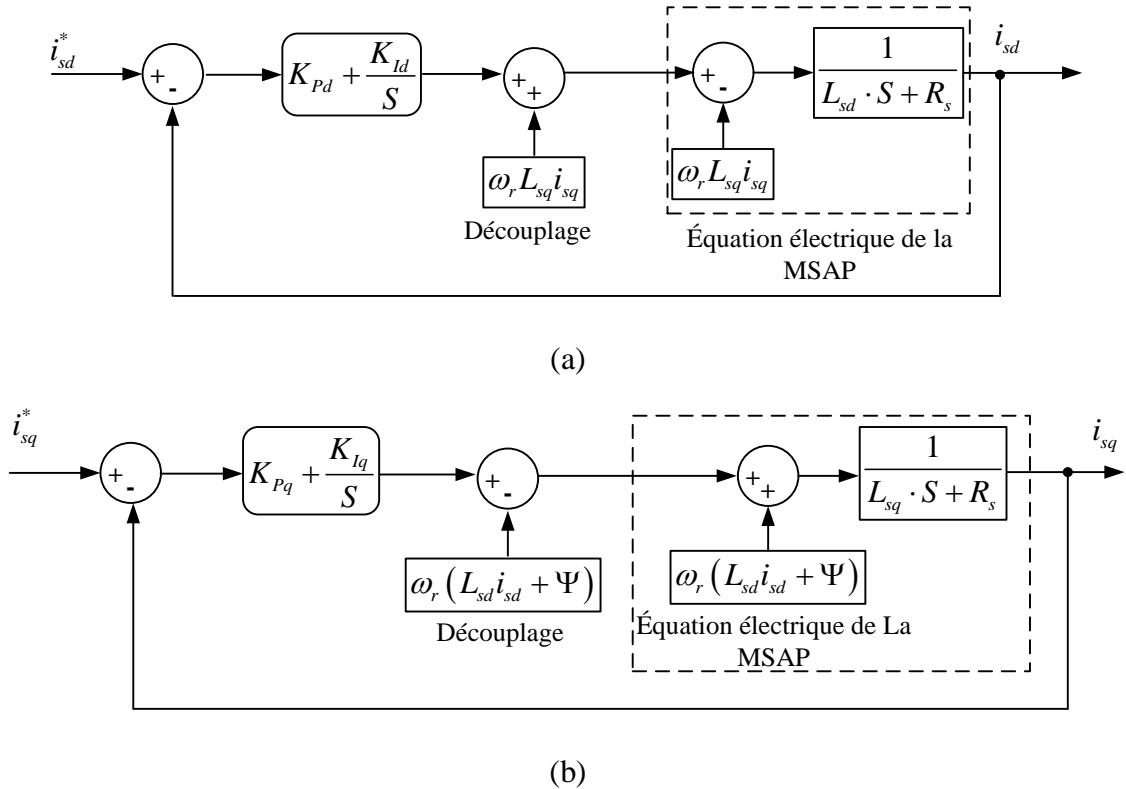


Figure III.4: Boucles de courant

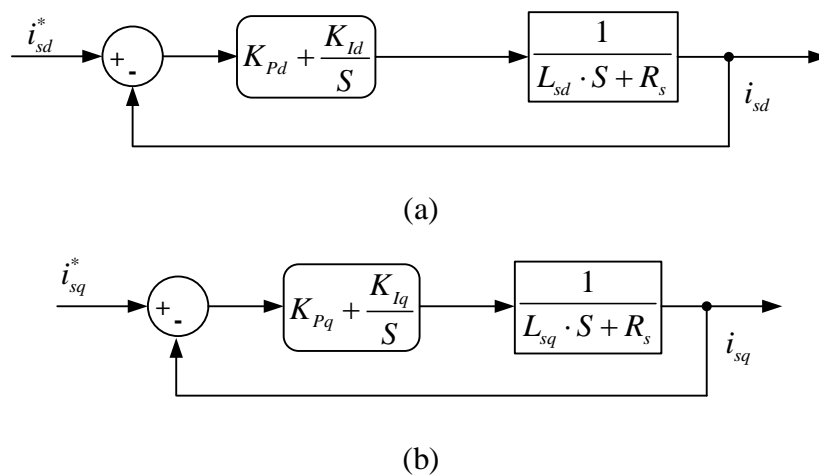
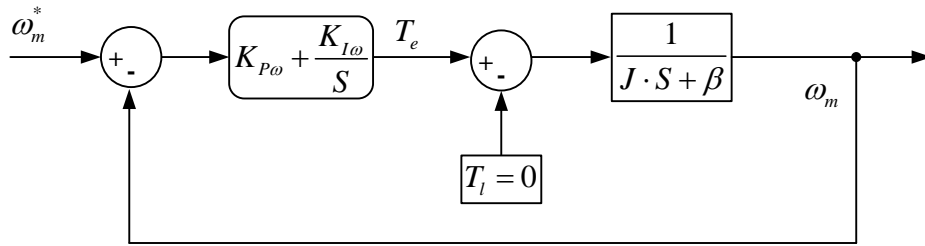
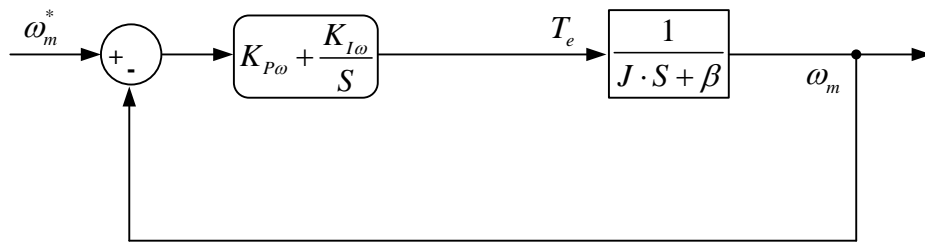


Figure III.5: Boucles de courant simplifiées

En outre, en posant le couple résistant T_l égal à zéro, la boucle de vitesse dans le domaine de Laplace représentée par la figure III.6.a se simplifie pour donner la boucle de la figure III.6.b [31].



(a)



(b)

Figure III.6: Boucles de vitesse

Les contrôleurs PI sont dimensionnés pour achever une bonne dynamique et une grande précision avec une stabilité acceptable. Les paramètres sont préalablement calculés à l'aide de l'utilitaire SISOTOOL de MATLAB, ensuite on a procédé à un ajustement par la méthode dite « essais et erreurs » pour obtenir les performances recherchées; cette méthode est très adaptée pour les systèmes dont les paramètres ne sont pas connus avec une bonne précision. Les paramètres des contrôleurs PI sélectionnés sont donnés dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Paramètre des contrôleurs PI

	Boucle de courant i_{sd}	Boucle de courant i_{sq}	Boucle de vitesse
Proportionnel (K_P)	0,4	0,4	100
Intégral (K_I)	9	9	200

En utilisant les paramètres des régulateurs sélectionnés dans le tableau III.2, on a analysé la stabilité de la boucle de courant i_{sq} (identique à la boucle de courant i_{sd} car $L_{sd} = L_{sq}$) et la boucle de vitesse, à l'aide du diagramme de Bode tracé directement dans

l'utilitaire SISOTOOL de MATLAB (figure III.7.a et figure III.7.b) ; on a trouvé que les deux boucles sont stables, avec des marges de phases acceptables : 90° pour chacune.

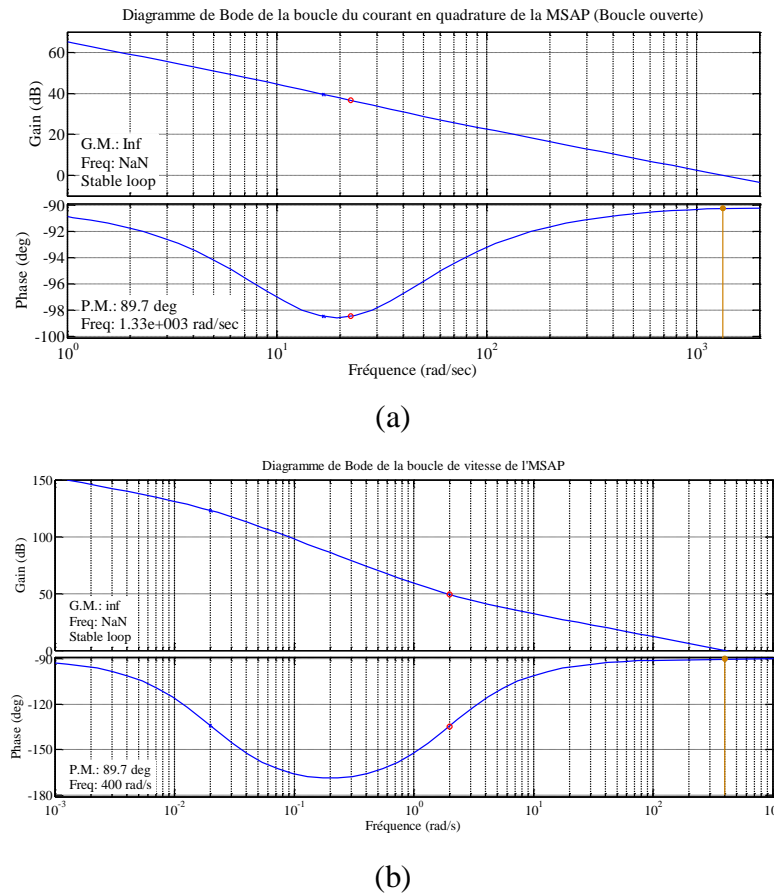


Figure III.7: Analyse de la stabilité des boucles de courant i_{sq} et de vitesse

III.5. Architectures de puissance et gestion d'énergie

On a vu qu'il est indispensable de réguler la puissance éolienne et que les courbes caractéristiques des voilures éoliennes ne sont pas linéaires, En ce qui concerne la puissance éolienne (section (II) de la figure I.17), elle résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent (donc de la vitesse réduite) et de la caractéristique C_p (λ , β).

Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolienne. La figure. III.8, donne l'image de la famille des courbes de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent ainsi que la courbe optimale qui relie leurs sommets selon une fonction cubique de la vitesse (Equation I.6). En suivant cette courbe continuellement, la puissance éolienne recueillie sera toujours maximale. De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris

dans le petit éolien où le surcoût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production [32].

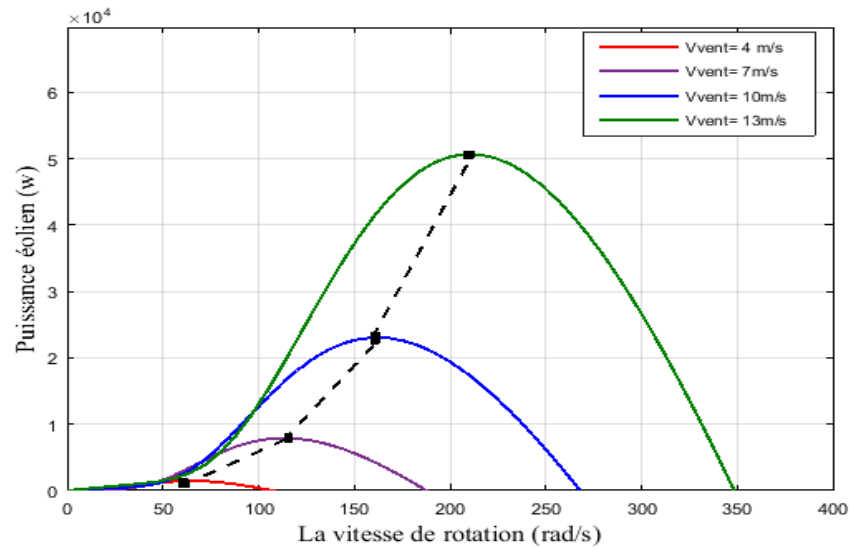


Figure III.8: Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent

La valeur de P peut aussi être petite où au contraire grande. A partir de ce jugement, la valeur de la consigne de vitesse est augmentée, ou diminuée, dans le sens qui permet d'augmenter la puissance [32]. Dans le cas d'un changement de la vitesse du vent, la recherche du point de puissance maximale s'effectue de la manière présentée sur la figure. III.9, on constate que le même type de règles s'applique [32].

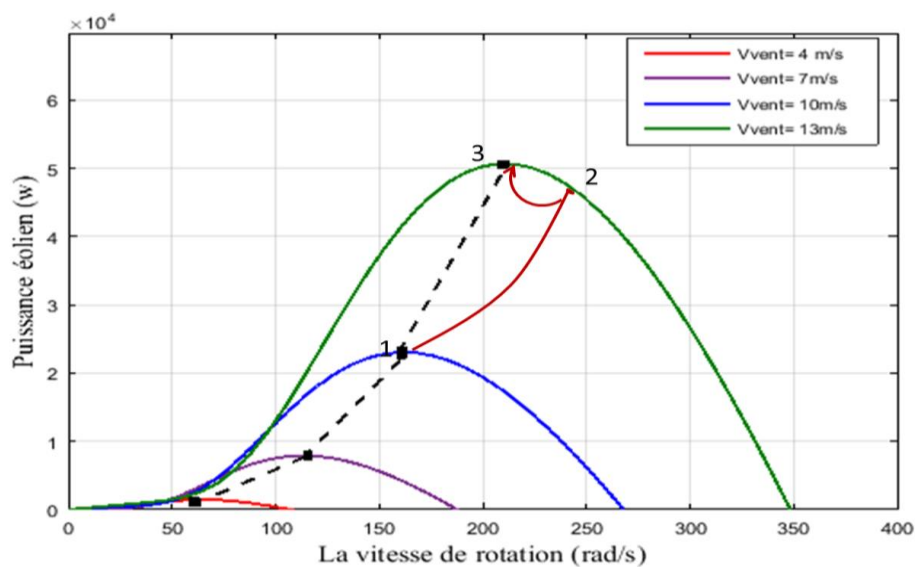


Figure III.9 : Principe de fonctionnement du MPPT à vitesse variable du vent

III.5.1. Technique de la maximisation de la puissance produite

Les sommets de cette courbe sont équivalents à la puissance maximale « extractible » donc au point optimal. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale λ_{opt} égale à 8.1 et le coefficient de puissance maximal $C_{p_{max}}$ (figure. I.18). La valeur de la vitesse de rotation d'après l'équation I.7 est égale à :

$$\Omega_T = \frac{\lambda V}{R} \quad (III.14)$$

Dans cette partie on cherche à maintenir la vitesse spécifique à son optimum notée λ_{opt} . Une boucle de vitesse est alors mise en œuvre et sa vitesse de référence Ω_{ref} est déduite de la relation :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (III.15)$$

Cette boucle est munie d'un régulateur de vitesse afin de l'asservir à chaque fois à sa valeur de référence et d'atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Plusieurs correcteurs de vitesse peuvent être envisagés dans ce but, mais on s'intéresse ici par un correcteur proportionnel intégral PI comme il est présenté dans la figure III.6.

III.5.2. Optimisation électronique de la conversion énergétique

En partant de la boucle de la vitesse présentée dans la figure. III.6, on note que la machine synchrone n'agira dans le système que sous forme d'un couple d'inertie et d'un couple de frottement et ne présente pas une dynamique propre. Or, la GSAP comme toutes les machines électriques à besoin d'un temps de réponse suffisant pour que son système de commande électronique peut la ramener à la vitesse demandée par l'éolienne. Pour cette raison, on doit présenter la boucle de commande avec une manière différente pour montrer la boucle de commande à travers l'alimentation (figure.III.10) [32].

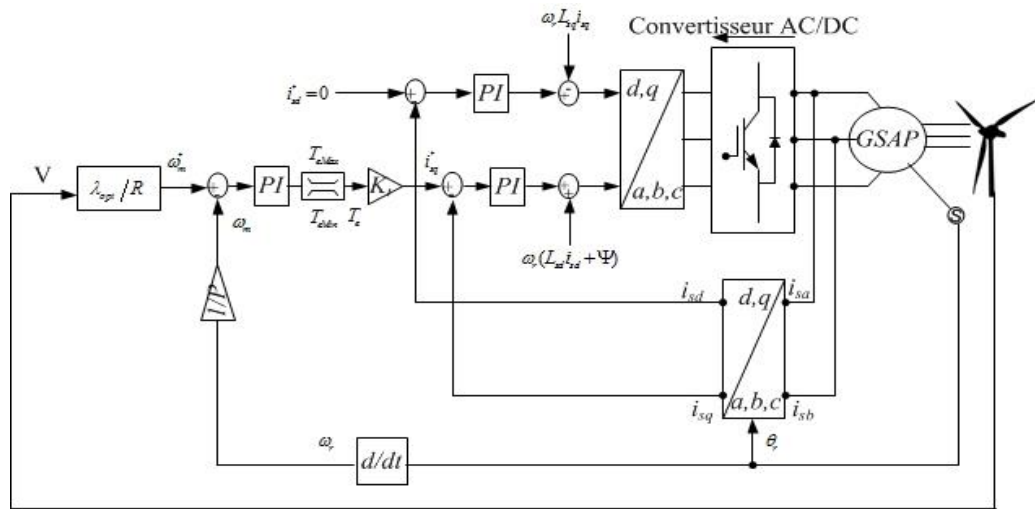


Figure III.10: Représentation de la commande de Vitesse de la GSAP d'un système éolien

III.6. Résultat de simulation et interprétation

La figure III.11 illustre le bloc schématique sous SIMULINK du système éolien contrôlé en MPPT en utilisant la valeur de vitesse spécifique optimale comme référence la boucle de commande vectorielle de la GSAP afin d'alimenter le moteur à courant continue utilisé dans notre cas comme une charge.

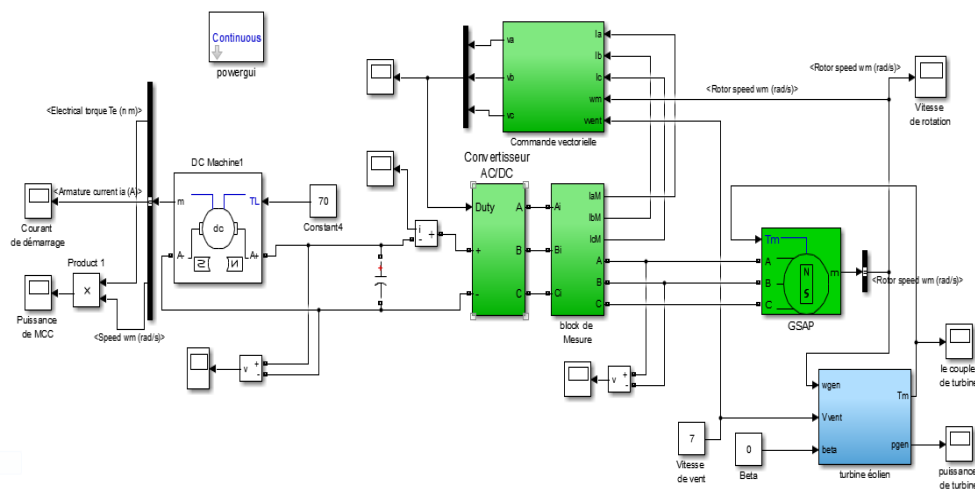


Figure III.11 : Schéma du système complet sous SIMULINK

Les résultats de simulation du système éolien adapté pour la commande MPPT sont représentés par les figures III.12 à III.15. Ces figures représentent la puissance à la sortie du générateur éolien, la vitesse de rotation de la turbine, la puissance du moteur de la charge et les courants de démarrage pour différentes vitesses du vent.

III.6.1. Simulation du système éolienne avec MPPT pour V_v égal à 7 m/s

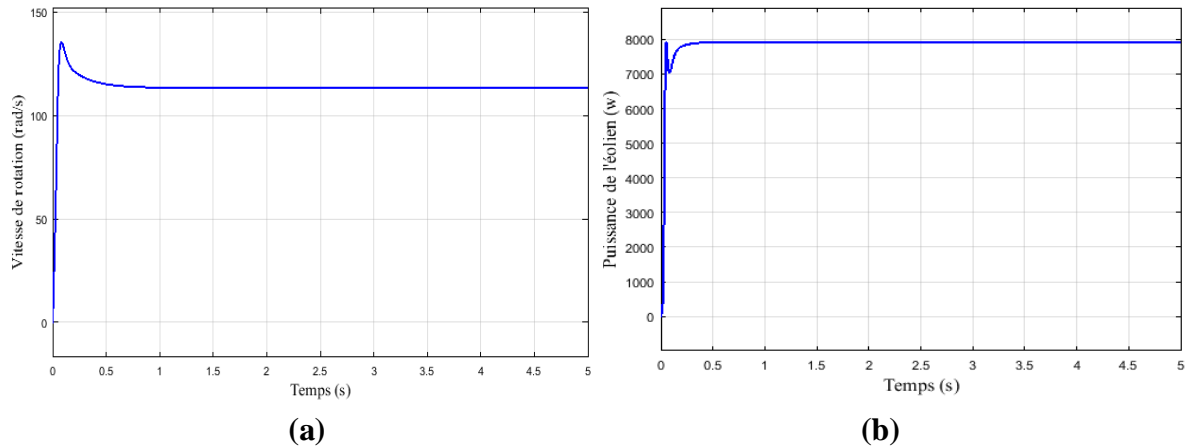


Figure III.12: Vitesse de rotation et puissance de la turbine éolienne pour $V_v = 7\text{m/s}$

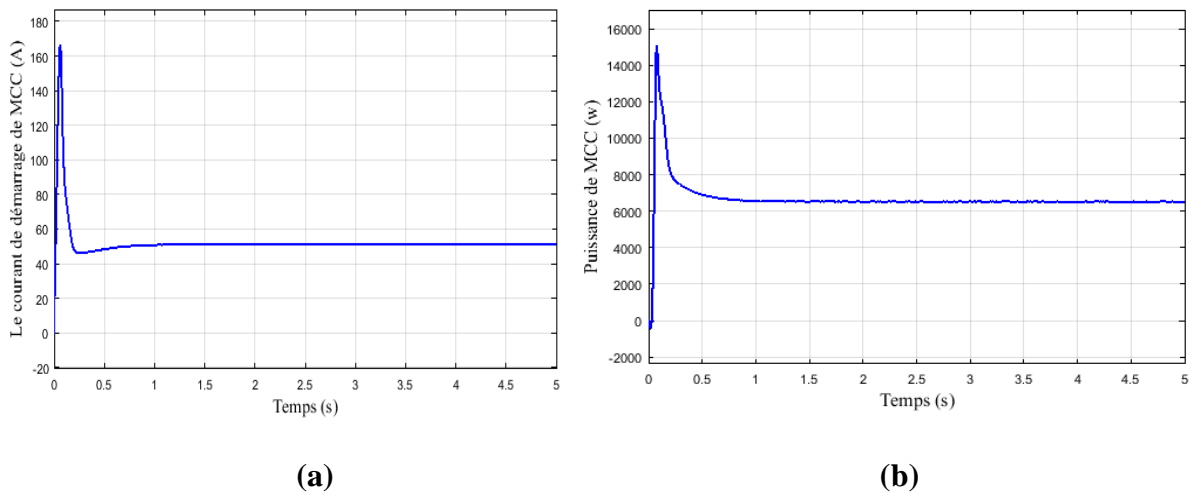


Figure III.13 : Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $V_v = 7\text{m/s}$

Pour une vitesse de vent égal à 7m/s qui représente la vitesse moyenne annuelle de vent de notre site on peut tirer les remarques suivantes:

- On remarque que la vitesse de rotation de la GSAP prend une valeur maximal qui est de l'ordre de 140 rad/s dans le régime transitoire puis elle revient à la vitesse de référence nominale (120rad/s) dans les régimes permanent comme il est montré dans la figure III.12.a.
- La puissance max de l'éolienne capturée par la turbine pour une vitesse de vent 7 m/s est égale à 7900w (figure III.12.b), Qui est presque égal à la puissance théorique calculé, on utilisant la formule (II.14) :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p \rho S V_{nom}^3 = 0.5 * 75.86 * 0.48 * 1.25 * 7^3 = 7850.994w$$

- On remarque que les courants de démarrages de la machine à courants à C.C (la figure III.13.a) sont faibles par rapport au courant max donnés par le tableau II.2.
- On observe que la puissance de démarrage du moteur à C.C dans le régime dynamique est plus grande que sa puissance dans le régime permanent, cette celle-ci est égale à la puissance max fournie par la turbine moins les pertes dans le redresseur et la capacité du Bus continu (la figure III.13.b).

III.6.2. Simulation du système éolienne avec MPPT pour V_v égal à 13 m/s :

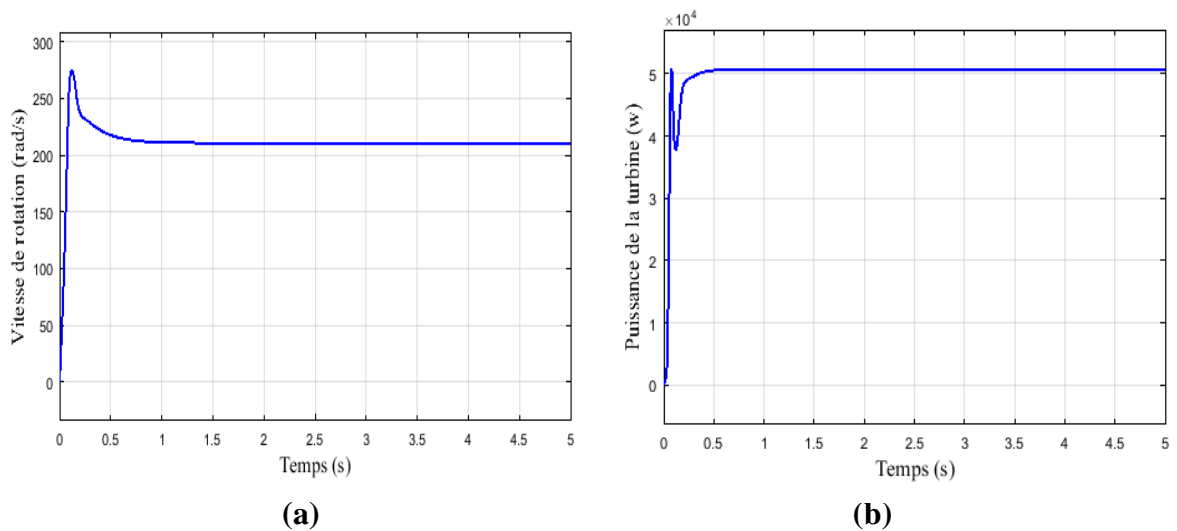


Figure III.14 : La vitesse de rotation et la puissance de la turbine éolienne pour $V_v = 13m/s$

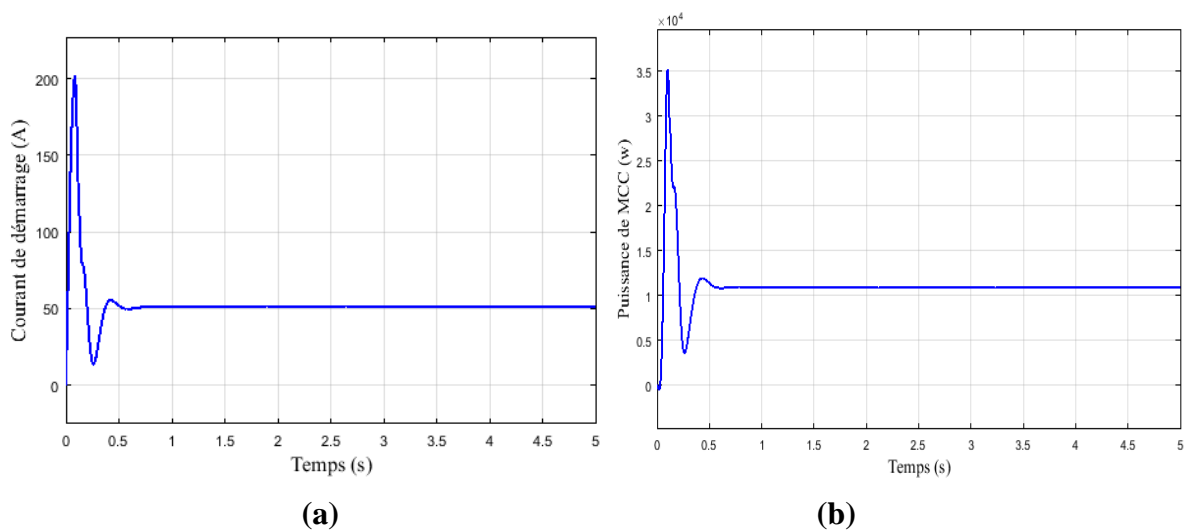


Figure III.15 : Le courant de démarrage et la puissance de la MCC pour $V_v = 13m/s$

Pour une vitesse du vent égal à 13m/s qui représente la vitesse nominale de l'éolienne on peut tirer les remarques suivantes:

- la figure III.14.a, présenter la variation de la rotation de la GSAP pour une vitesse du vent égal a 13m/s, on remarque que la vitesse du vent a une grande influence sur la vitesse du rotation de la GSAP, pour une vitesse du vent égal à 13m/s la vitesse de la GSAP est supérieure de la vitesse de la génératrice à $V= 7\text{m/s}$ qui prendre une valeur maximal qui est égal à 270 rad/s dans le régime transitoire puis elle revient à la vitesse de référence nominale (210 rad/s) dans le régime permanent.
- On remarque que la vitesse de vent a une influence importante sur la puissance mécanique de la turbine pour une vitesse du vent constant la puissance mécanique est constante le système fonction à la puissance maximal qui est égal à 50 kW (figure III.14.b) qui est presque égal à la puissance théorique calculé suivant. on utilisant la formule (II.14) :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p \rho S V_{nom}^3 = 0.5 * 75.86 * 0.48 * 1.25 * 13^3 = 49999.326W$$

- On peut observer l'influence de la vitesse du vent sur les amplitudes de courants. Avec l'augmentation de la vitesse du vent, la valeur de courant de démarrage augmente jusqu'à 200 A, qui est égal au courant max de la MCC (figure III.15.a).
- Comme les courants de démarrages du moteur sont augmentés, sa puissance absorbée augmente aussi jusqu' à 3.5 kW (la figure III.15.a) dans notre cas, donc dans ce cas-là, l'éolienne a pu fournir toute la puissance de démarrage de notre charge et l'excès de la puissance peut être utilisé pour d'autre application.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la commande vectorielle en vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents qui a été présenté en deux parties :

Dans la première partie on a présenté le modèle de la machine ainsi que sa commande vectorielle en utilisant trois boucles de régulation: deux boucles pour les courants et une boucle pour la vitesse. Ensuite on a dimensionné les correcteurs PI utilisés dans les boucles de régulations puis on analyse la stabilité de ces boucles.

Dans la deuxième partie on a illustré la stratégie de maximisation de puissance à la sortie de la turbine éolienne.

L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent.

Chapitre IV



*Gestion de l'énergie du
système hybride(PV-éolienne-
batteries)*



IV.1.Introduction

Notre système hybride autonome étudié est composé de deux sources productrices d'énergie (PV-éolien), d'une source de stockage (pack de batteries plomb acide), des charges motorisées (Moteurs à courant continu) et un système de contrôle et de gestion de ces sources.

Afin de tester les performances de ce système, la simulation a été effectuée sous Matlab/Simulink, différents scénarios qui peuvent se produire dans la réalité en se basant sur les résultats trouvés dans les chapitres précédents.

Ensuite on a illustrés les résultats trouvés avec leurs interprétations et on tire quelques conclusions importantes.

IV.2. Architecture du système hybride (Eolienne-PV-Batterie)

Pour assurer un fonctionnement sans aucun risque sur les différents éléments qui constitue notre système hybride on a proposé l'architecture représentée par la figure suivante. Cette dernière est composée par des Switch commandés à partir d'une unité de contrôle et de gestion d'énergie en tenant en compte le suivit permanent du courant, de la tension (de charge et de décharge) et de l'SOC des batteries, qui représentes le cœur de notre système, ceci afin de les mètres à l'abri d'un fonctionnement sévère qui peut être dangereux sur le système de stockage. En plus on utilise les mesures des courants et de l'SOC des batteries pour démarrer la charge PV et faire varier l'angle d'orientation des pales (β) afin de limiter le courant de charge des batteries par l'intermédiaire de l'état de charge de ces dernières.

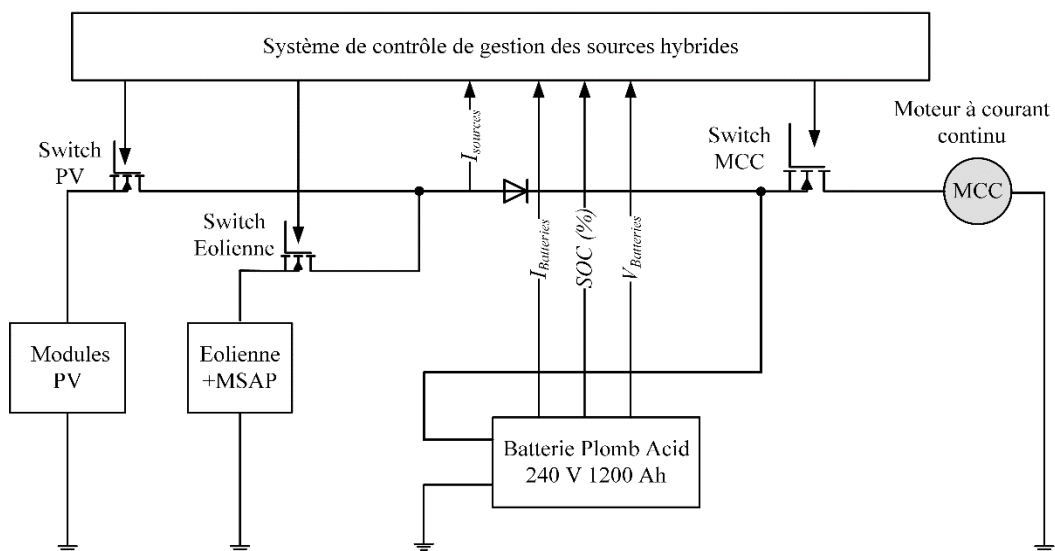


Figure IV.1 : Architecture du système hybride (PV-éolienne-Batterie)

La figure IV.1 Montre que les batteries sont connectées directement à la charge donc c'est elles qui vont imposer la tension au moteurs à contrant continu, pour éviter les décharges profondes de nos batteries, l'utilisation d'un Switch contrôlable entre les batteries et la charge (MCC) est indispensable. En peut constater aussi que nos batteries sont reliées directement à nos sources d'énergie, donc le système a besoin de deux autres Switch contrôlables pour déconnecter les modules photovoltaïques et l'éolienne dans le cas d'une surcharge (SOC élevé) des batteries.

IV.2.1. Modes de fonctionnement

On peut deviser les modes de fonctionnement de notre système en trois modes différents qui sont : Mode de fonctionnent de décharge (SOC Max), de charge-décharge (SOC normale) et de charge (SOC Min).

IV.2.1.a. Mode de fonctionnent décharge

Si l'SOC est $> 95\%$ (les batteries sont pleines) : les diapositives 'Switch_PV' et 'Switch_éolien' sont ouvert (les sources sont déconnectées), et l'interrupteur 'Switch_moteur' est fermé pour alimenter la charge directement par les batteries.

Dans ce mode de fonctionnement lorsque les sources sont déconnectées, elles ne se connectent pas que si l'SOC des batteries devient inférieur à 60%.

IV.2.1.b. Mode de fonctionnement charge-décharge

Si l'SOC est compris entre 30 % et 95 %, les interrupteurs 'Switch_PV' et 'Switch_éolien' et 'Switch_moteur' sont fermée pour charger les batteries et alimenter la charge en même temps, dans ce mode de fonctionnement les batteries peuvent être en état de charge ou de décharge selon les besoins énergétiques de la charge.

IV.2.1.c. Mode de fonctionnement charge

Si l'SOC est inférieur à 30%, les interrupteurs 'Switch_éolien' et 'Switch_PV' sont fermés afin de charger les batteries et l'interrupteur 'Switch_moteur' peut être, soit dans un état ouvert ou fermé, selon la quantité d'énergie disponible dans les sources renouvelable. En effet si les sources renouvelables peuvent satisfaire la demande de la charge donc 'Switch_moteur' est fermé sinon il est ouvert, dans le dernier cas, l'interrupteur ne revient pas à se fermé, que si une des conditions suivantes sont vérifier :

- 1- L'SOC des batteries dépasse les 40 %
- 2- Les sources à énergies renouvelables produisent une énergie suffisante pour alimenter la charge et charger la batterie en même temps, dans ce cas si le courant fournie par les

modules photovoltaïques et l'éolienne est supérieur à 240 A en doit agir sur l'angle d'orientation des pales afin de diminuer le courant fournie par l'éolienne.

IV.2.2. Organigramme de système de contrôle et de gestion d'énergie des sources

Les modes de fonctionnement et les conditions imposés pour contrôler la mise en ou hors service les différentes sources d'énergies ou de stockages sont résumés dans l'organigramme suivant :

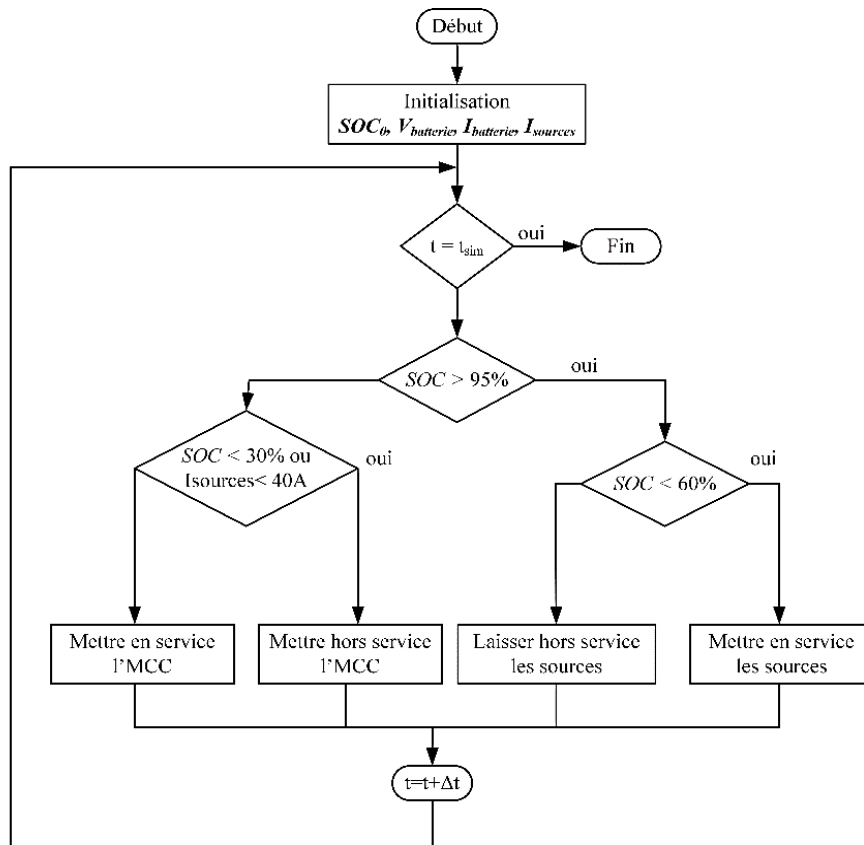


Figure IV.2 : Organigramme de fonctionnement du système

Avec:

t_{sim} : Temps de simulation du programme ;

Δt : Pas de simulation ;

$I_{sources}$: Sommes des courants fournies par l'éolienne et les modules photovoltaïques ;

$I_{batteries}$: Courant des batteries ;

SOC_0 : Etat de charge initiale des batteries ;

$V_{batteries}$: Tension des batteries ;

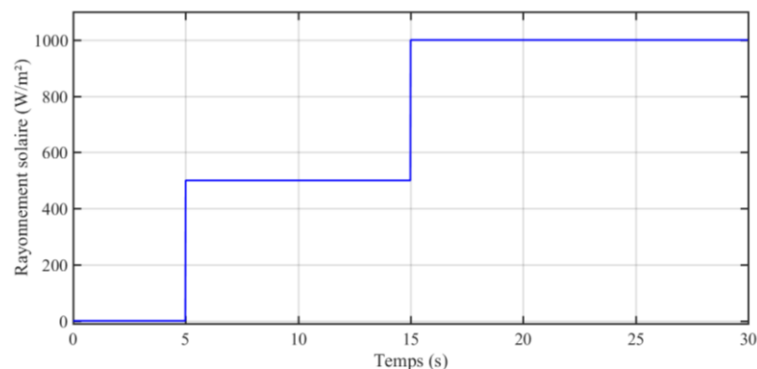
3. La charge : on a utilisé le modèle d'une MCC à aimant permanent de la bibliothèque Simulink.
4. Le système de contrôle et de gestion de l'énergie qui se compose de:
 - ❖ Trois Switch: on a utilisé trois interrupteurs contrôlables pour que la mettre en services ou hors services les sources hybrides et la charge.
 - ✓ Le système de contrôle des Switch à base des relais à hystérésis.
 - ✓ Le système de contrôle de l'angle d'orientation des pales β , qui se génère à partir d'un tableau qui donne différentes valeurs de β pour plusieurs valeurs du courant de charge des batteries, donc si le courant de charge dépasse les 240 A on va augmenter l'angle β qui va diminuer à leur tours le courant fournie par l'éolienne, par conséquence on a une diminution de courant de charge de la batterie.

IV.4.Résultats de simulation

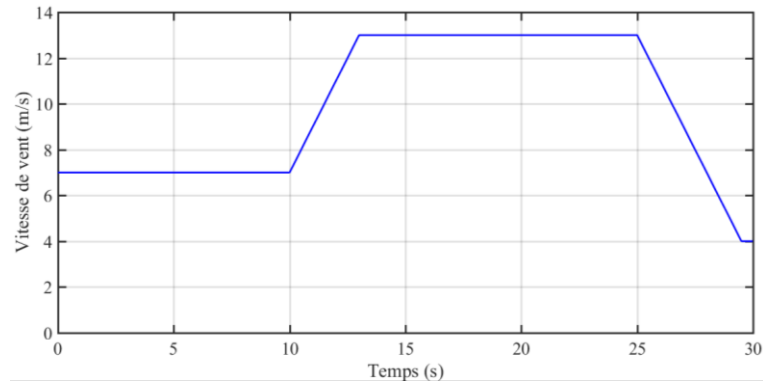
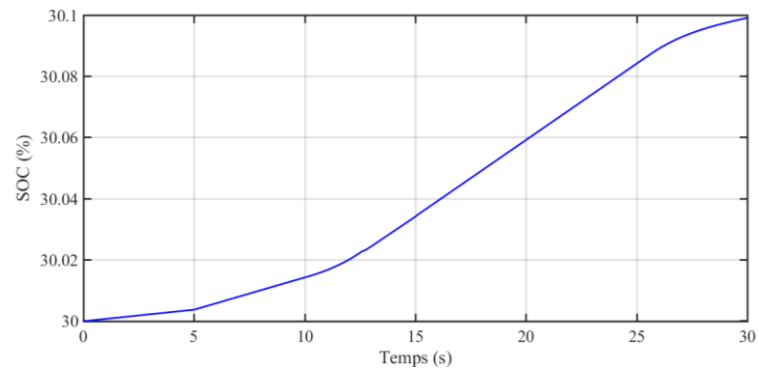
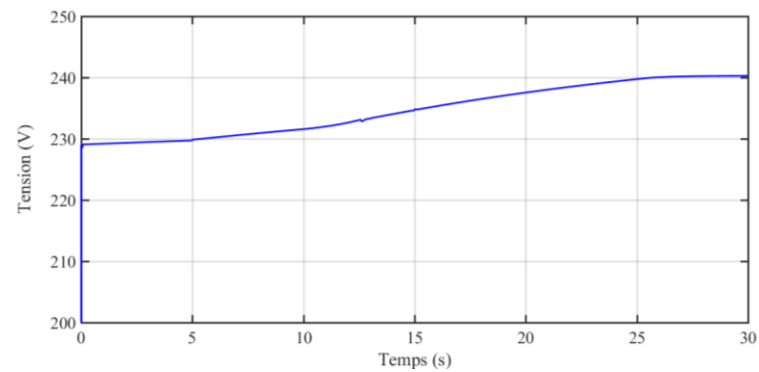
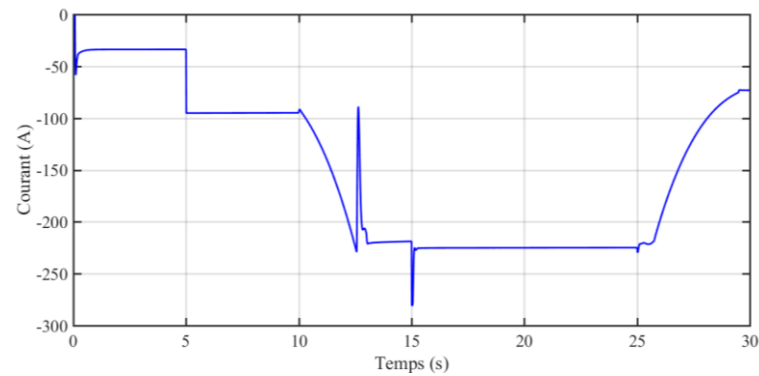
Afin de tester les performances du notre système hybride et vérifier le bon fonctionnement des Switch, les contraintes à respecter pour les batteries (tension, courant et SOC max et min), et l'extraction de la puissance max de l'éolienne. On a effectué des simulations : pour différent valeurs de vitesse de vent (faible, moyenne et forte vitesse), de rayonnement solaire (nul, moyen et intense) et pour trois cas différente de l'état de charge de batterie (complètement déchargées, complètement chargées et chargées à une valeur nominale).

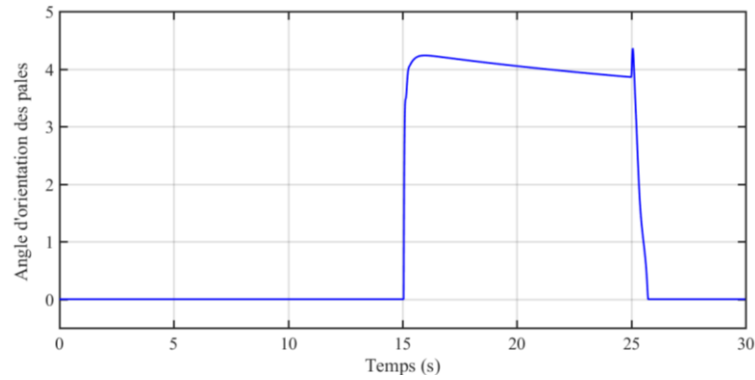
IV.4.1.Scénario N°1 batterie complètement déchargées

Dans ce cas on a supposé que l'état de charge des batteries est initialement chargé à 30% et on a effectué une simulation durant 30s pour des variations en rampe de la vitesse de vent et des variations en échelon de l'éclairement solaire et on a obtenu les résultats suivants :

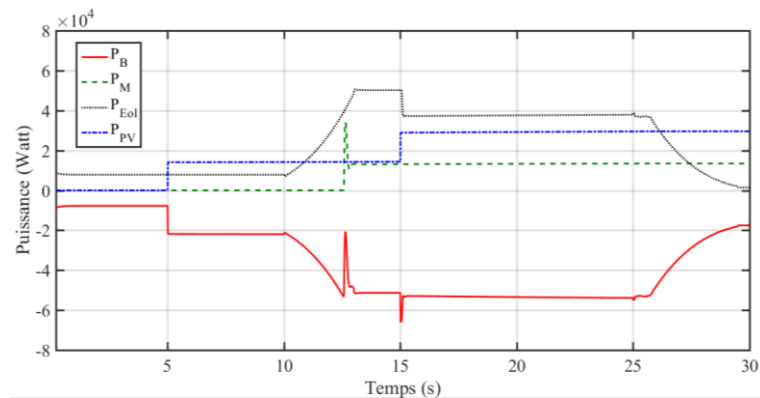


(a) Variation du rayonnement solaire (W/m^2)

**(b)** Variation des vitesses de vent m/s**(c)** Etat de charge des batteries (SOC)**(d)** Tension des batteries**(e)** Courant des batteries



(f) Variation de l'angle d'inclinaison des pales



(g) Puissance des sources et de la charge

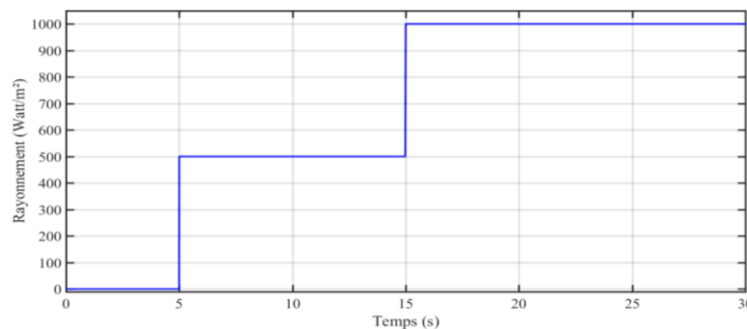
Figures IV.4 : Performances du système hybride PV-Eolienne-Batteries pour un $SOC_0 = 30\%$.

- ✓ Les figures IV.4 montre les performances du système hybride (PV-Eolienne-Batteries) pour un état de charge des batteries initiale égale à 30 %.
- ✓ La figure IV.4.a représenté la variation du rayonnement solaire (W/m^2) qui a volontairement générer pour tester notre système hybride, on a commençant par rayonnement nul ($0 W/m^2$) puis on augmente le rayonnement moyen à ($500 W/m^2$) et on termine par un rayonnement maximal égal à ($1000 W/m^2$).
- ✓ La figure IV.4.b donne la variation des vitesses de vent (m/s) que on a volontairement imposé au système, en utilisant trois niveaux de vitesses : moyenne ($7/s$), nominale ($13m/s$) et faible ($4 m/s$), avec des variations intermédiaires en rampe.
- ✓ La figure IV.4.c illustre la variation de l'Etat de charge des batteries (SOC %), puisque les batteries sont complètement déchargés donc elle se charge pour attendre un état de charge acceptable afin de l'utilisé dans les conditions défavorables rayonnement solaire et vitesse de vent insuffisants pour alimenter la charge.

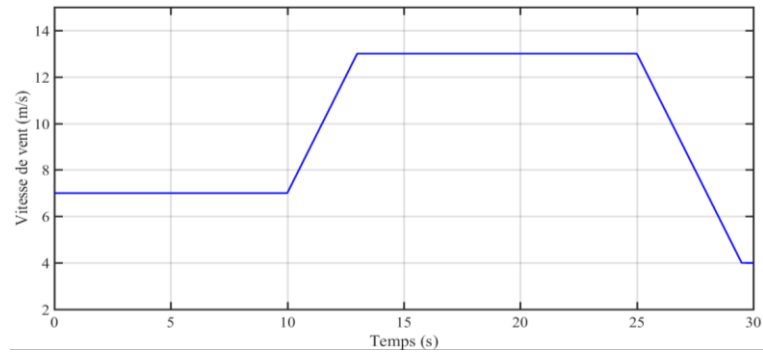
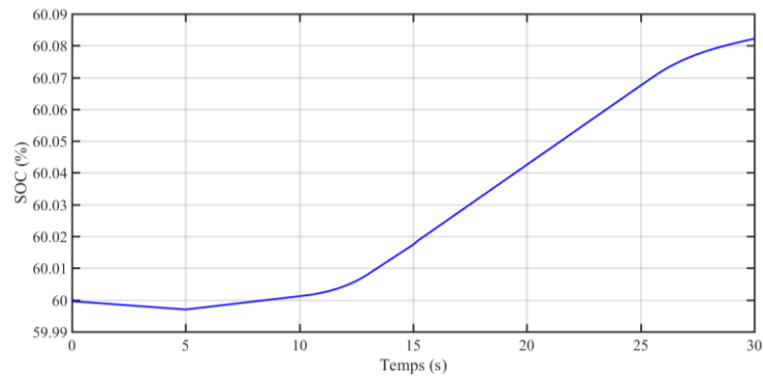
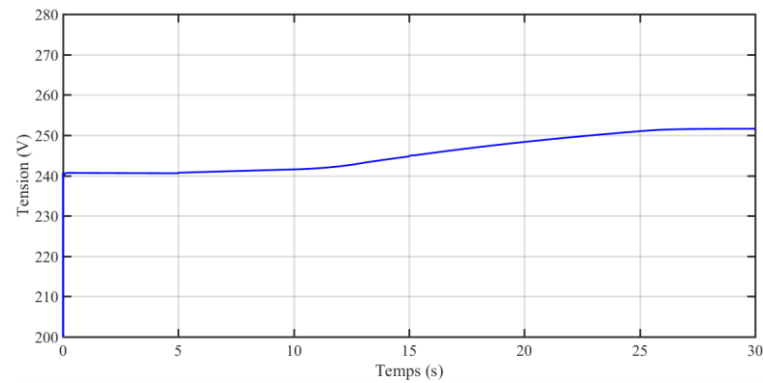
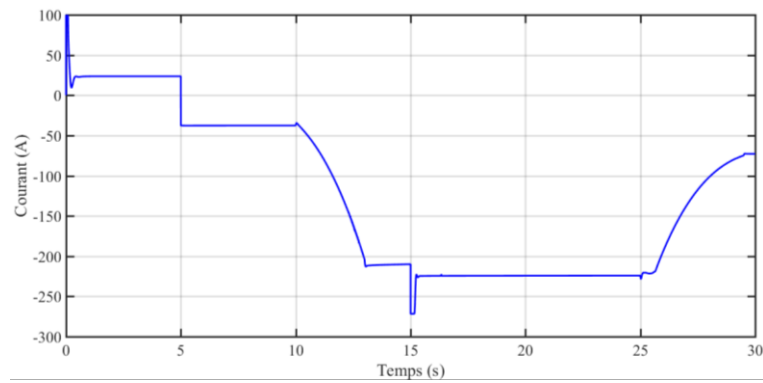
- ✓ La figure IV.4.d représente la variation de la tension des batteries, puisque les batteries se chargent la tension des batteries augmentent, on voit bien quelles sont dans leurs intervalles de fonctionnement nominale.
- ✓ La figure IV.4.e illustre la variation du courant dans les batteries puisque les batteries se chargent le courant est négatif, son amplitude de variation change en fonction de la puissance disponible par les sources renouvelable et la mise en service ou non de la charge, on voit bien que sa plage de variation est à l'intérieur de son intervalle de fonctionnement nominal sauf quelques pics qui sont causés par les brusques variations du profil de rayonnement solaire qui n'est pas le cas dans la pratique.
- ✓ La figure IV.4.f montre la variation de l'angle d'inclinaison des pales de l'éolienne on voit bien que sa valeur est 0 dans un premier temps puis elle varie jusqu'à presque 4.1, afin de diminuer la puissance fournie par l'éolienne et comme conséquence la régulation du courant de charge des batteries pour qu'il ne dépasse pas sa valeur maximale égale à 240 A, vue précédemment dans le chapitre II.
- ✓ La figure IV.4.g montre la variation de la puissance des modules PVs, de l'éolienne, des batteries et du moteur à courant continu on voit bien que lorsque l'énergie fournie par les sources renouvelables est insuffisante le moteur MCC est à l'arrêt et les batteries se chargent toutes seules puisque l'état de charge est inférieur à l'état de charge maximale. Lorsque l'énergie fournie par les sources devient suffisante pour charger la batterie et démarrer le moteur MCC en même temps, ce dernier rentre en service.

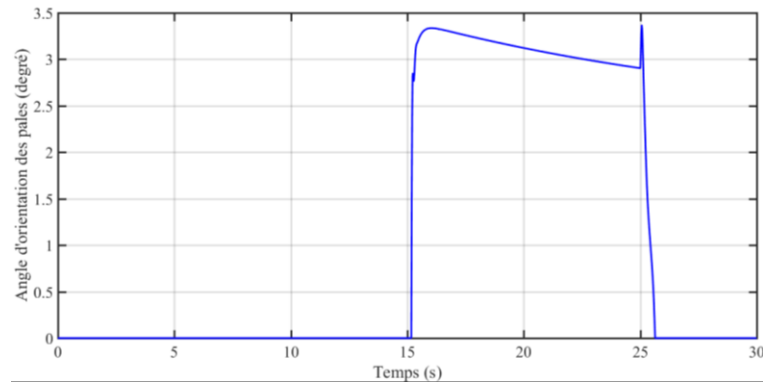
IV.4.2.Scénario N°2 batterie chargé à une valeur nominale

Dans ce cas on a supposé que l'état de charge des batteries est initialement chargé à 60% et on effectue une simulation durant 30s pour des variations en rampe de la vitesse de vent et des variations en échelon de l'éclairement solaire et on obtient les résultats suivants :

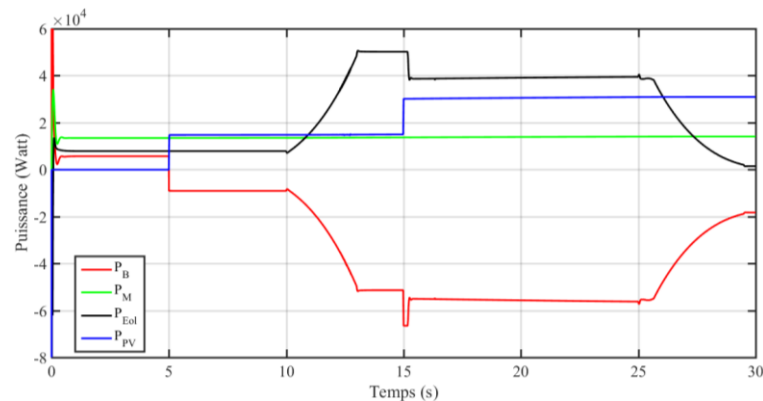


(a) Variation du rayonnement solaire (W/m²)

**(b)** Variation des vitesses de vent m/s**(c)** Etat de charge des batteries (SOC)**(d)** Tension des batteries**(e)** Courant des batteries



(f) Variation de l'angle d'inclinaison des pales



(g) Puissance des sources et de la charge

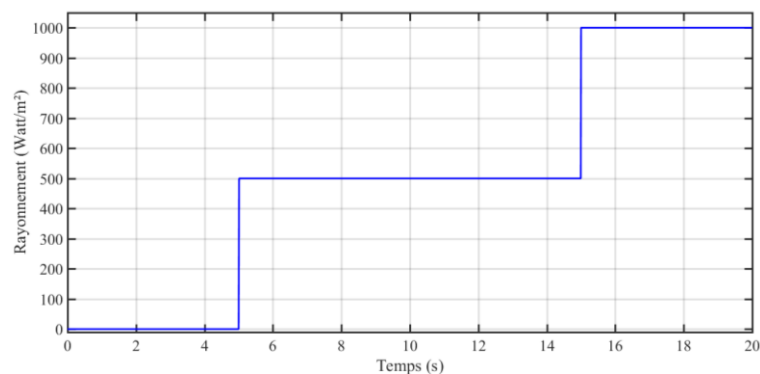
Figures IV.5 : Performances du système hybride PV-Eolienne-Batteries pour un $SOC_0 = 60\%$

- ✓ Les figures IV.5 montre les performances du système hybride (PV-Eolienne-Batteries) pour un état de charge des batteries initiale égale à 60 %.
- ✓ La figure IV.5.a représenté la variation du rayonnement solaire (W/m^2) que on a volontairement générer pour tester notre système hybride on commence par un rayonnement nul ($0 W/m^2$) puis on augmente à un rayonnement moyen de ($500 W/m^2$) et on termine par un rayonnement maximal ($1000 W/m^2$).
- ✓ La figure IV.5.b donne la variation des vitesses de vent (m/s) qu'on a volontairement imposé au système, en utilisant trois niveaux de vitesses : moyenne ($7m/s$), nominale ($13m/s$) et faible ($4 m/s$), avec des variations intermédiaire en rampe.
- ✓ La figure IV.5.c illustre la variation de l'Etat de charge des batteries (SOC %), puisque les batteries sont chargées à une valeur intermédiaire donc elles se déchargent dans un 1er temps lorsque la puissance fournie par les énergies renouvelables est insuffisantes puis elle se charge jusqu'à son état de charge maximal fixé à 95 % dans notre étude.

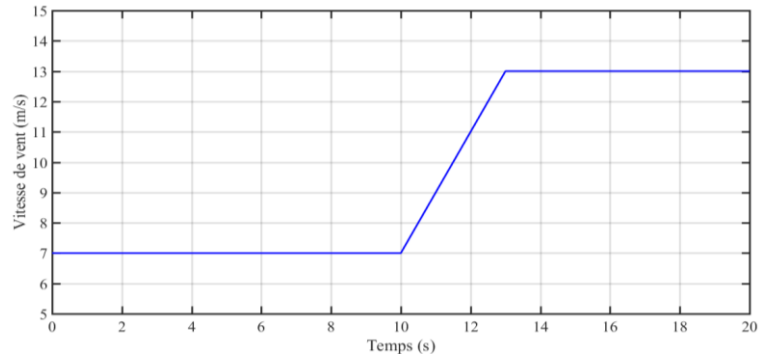
- ✓ La figure IV.5.d représente la variation de la tension des batteries, puisque les batteries se déchargent puis elles se chargent la tension des batteries diminue puis elle augmente, on voit bien qu'elle est dans son intervalle de fonctionnement nominal.
- ✓ La figure IV.5.e illustre la variation du courant dans les batteries puisque les batteries se déchargent puis elles se chargent le courant est positif dans un premier temps après il est négatif dans un deuxième temps. Son amplitude de variation change en fonction de la puissance disponible par les sources renouvelables et la mise en service ou non de la charge, on voit bien que sa plage de variation est à l'intérieur de son intervalle de fonctionnement nominal sauf quelques pics qui sont causés par les brusques variations des profils des rayonnements solaires qui n'est pas le cas dans la pratique.
- ✓ La figure IV.5.f montre la variation de l'angle d'inclinaison des pales de l'éolienne on voit bien que sa valeur est 0 dans un premier temps puis elle varie jusqu'à presque 3.5 afin de diminuer la puissance fournie par l'éolienne et comme conséquence la régulation du courant de charge des batteries pour qu'il ne dépasse pas sa valeur maximale égale à 240 A, vue précédemment dans le chapitre II.
- ✓ La figure IV.5.g montre la variation de la puissance des modules PVs, de l'éolienne, des batteries et du moteur à courant continu on voit bien que lorsque l'énergie fournie par les sources renouvelables est insuffisante et l'état de charge des batteries est supérieur à 40 % le moteur MCC est en service et les batteries se déchargent. Lorsque l'énergie fournie par les sources devient suffisante pour charger la batterie et démarrer le moteur MCC en même temps, les batteries se chargent.

IV.4.3.Scénario N°3 batterie chargée à une valeur maximale

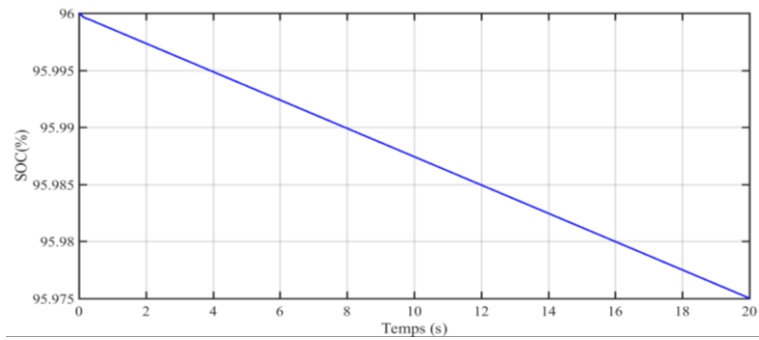
Dans ce cas on a supposé que l'état de charge des batteries est initialement chargé à 96% et on a effectué une simulation durant 20s pour des variations en rampe de la vitesse de vent et des variations en échelon de l'éclairement solaire et on obtient les résultats suivants :



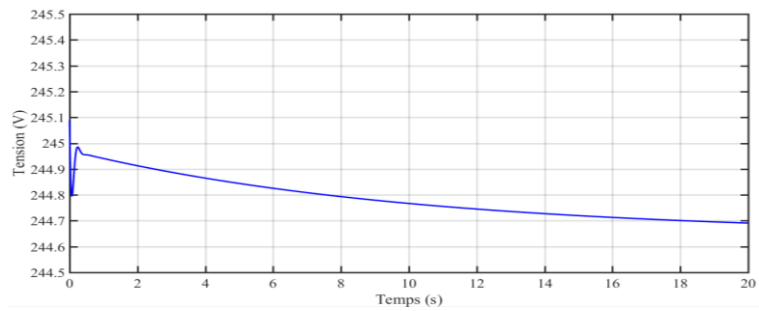
(a) Variation du rayonnement solaire (W/m^2)



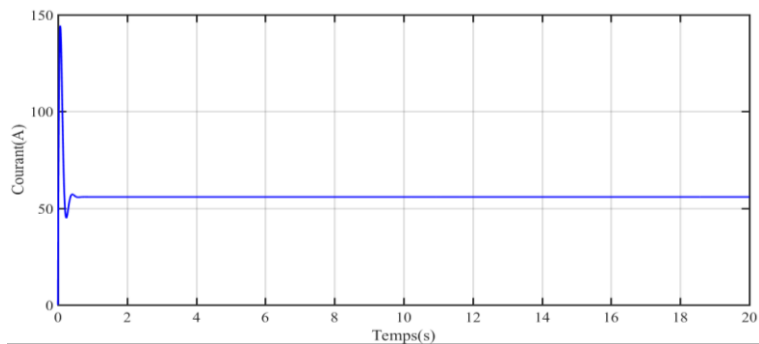
(b) Variation des vitesses de vent m/s



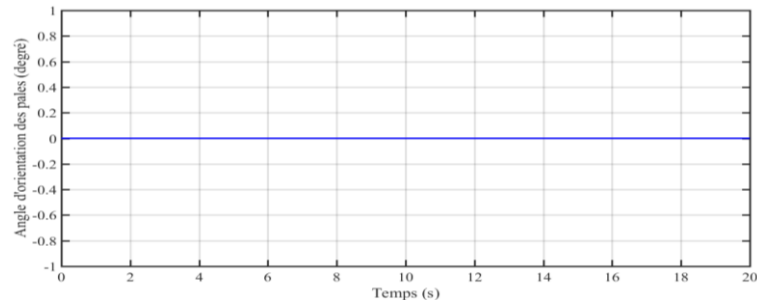
(c) Etat de charge des batteries (SOC)



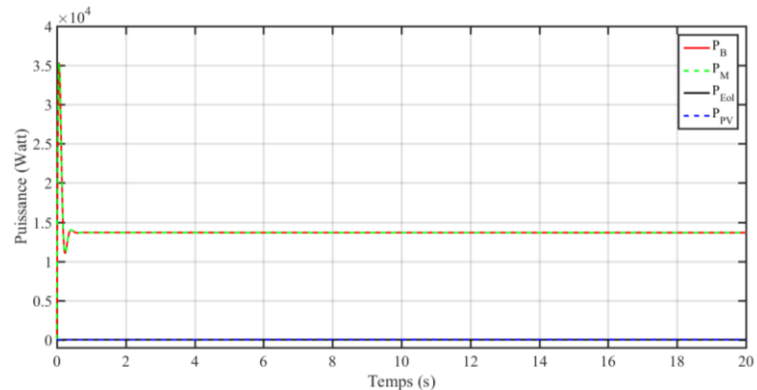
(d) Tension des batteries



(e) Courant des batteries



(f) Variation de l'angle d'inclinaison des pales



(g) Puissance des sources et de la charge

Figures IV. 6 : Performances du système hybride PV-Eolienne-Batteries pour un $SOC_0 = 96\%$

- ✓ Les figures IV.6 montre les performances du système hybride (PV-Eolienne-Batteries) pour un état de charge des batteries initiale égale à 96 % :
- ✓ La figure IV.6.a représenté la variation du rayonnement solaire (W/m^2) que on a volontairement générer pour tester notre système hybride on commence par un rayonnement nul ($0 W/m^2$) puis on a augmenté à un rayonnement moyen ($500 W/m^2$) et en termine par un rayonnement maximal ($1000 W/m^2$).
- ✓ La figure IV.6.b donne la variation des vitesses de vent (m/s) que on a volontairement imposé au système, en utilisant deux niveaux de vitesses : moyenne ($7m/s$)et nominale ($13m/s$), avec des variations intermédiaire en rampe.
- ✓ La figure IV.6.c illustre la variation de l'Etat de charge des batteries (SOC %), puisque les batteries sont complètement chargées, donc elles se déchargent jusqu'à qu'elle attendre un état de charge nominal fixé dans notre cas à 60 % pour qu'elle puisse se charger de nouveau.
- ✓ La figure IV.6.d représente la variation de la tension des batteries, puisque les batteries se déchargent la tension des batteries diminue, on voie bien quelle est dans son intervalle de fonctionnement nominale.

- ✓ La figure IV.6.e illustre la variation du courant dans les batteries puisque les batteries se déchargent le courant est positif son amplitude de variation change en fonction de la puissance demandée par le moteur MCC.
- ✓ La figure IV.6.f montre la variation de l'angle d'inclinaison des pales de l'éolienne on voit bien que sa valeur est 0 puisque l'éolienne est à l'arrêt.
- ✓ La figure IV.6.f montre la variation de la puissance des modules PVs, de l'éolienne, des batteries et du moteur à courant continu, on voit bien que la totalité de la puissance de la charge MCC est fournie par les batteries, les autres puissances des sources à énergies renouvelables sont nulles car les batteries sont complètement chargées.

IV.5. Conclusion

Pour une gestion rigoureuse de l'énergie une stratégie de contrôle et de supervision du système hybride (photovoltaïque/éolien) a été établie. Le gestionnaire détermine la tension et le courant et l'état de charge de la batterie et la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque et la turbine éolienne pour faire commander les dispositifs de contrôles. Le gestionnaire développé fournit un cadre souple pour contrôler et coordonner le fonctionnement des sous-systèmes qui constituent le système hybride pour déterminer ainsi le mode de fonctionnement adéquat.

Conclusion Générale



Conclusion générale

A travers cette mémoire, on propose une stratégie de contrôle et de commande assurant l'autonomie énergétique et la gestion des échanges de puissance dans un système de production d'électricité hybride dans la région d'Adrar, composé d'une éolien, d'un générateur photovoltaïque, d'un banc de batteries et d'une charge MCC.

Afin d'atteindre cet objectif, on fixe des objectifs auxiliaires qui ont été accomplis avec succès. En effet, on commence ce travail de recherche par une introduction générale, où on identifie les problématiques trouvées dans un SEH à base des énergies renouvelables. Un état de l'art d'une manière générale sur les systèmes multi-sources a été effectué, ensuite on expose d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre SEH composé par : le sous-système photovoltaïque, le sous-système éolien, les batteries et la charge. On a aussi établi les modèles mathématiques qui décrivent le comportement des différentes parties de notre système d'énergie hybride autonome pour constituer le modèle complet du SEH. Le logiciel Matlab/Simulink, a été utilisé pour la simulation afin de tester les performances de système proposé.

Dans un deuxième temps, on effectue un dimensionnement de notre système hybride autonome en se basant sur les données du gisement solaire et éolien de la région d'Adrar (Algérie) qui représente un potentiel solaire et éolien très élevés.

Afin d'optimiser l'énergie produite par la turbine, on adopte une stratégie de commande de la puissance maximale (MPPT) à la Machine Synchrone à Aimants Permanents de l'éolienne.

Finalement, on développe une stratégie de gestion d'énergie, qui on a permis de :

- Protéger les batteries contre les surcharges excessives et les décharges profondes.
- Brancher et débrancher automatiquement les sources selon les besoins énergétiques.
- Brancher et débrancher automatiquement la charge selon l'état de charge des batteries.
- Commander l'orientation des pales de la turbine éolienne en fonction du courant de charge de la batterie.
- Protéger les composants du système donc prolonger leur durée de vie.

Les résultats de simulation et de perfectionnement montrer l'efficacité du système de contrôle et de gestion d'énergie proposé, ce dernier permet un fonctionnement meilleur et optimale du notre système hybride (PV_Eolienne_Batteries).

Comme perspective, notre travail reste, comme toute œuvre humaine, perfectible, on tirer les recommandations suivant :

- Une amélioration de l'architecture du système hybride a énergie renouvelable.
- Développé d'autres algorithmes de contrôles et de gestion d'énergie.
- Faire un banc d'essai pour la validation expérimentale de la stratégie de gestion proposée avant de procéder à son implémentation sur une installation réelle.
- Tester les performances du système hybride autonome (PV_Eolienne_Batteries) proposé dans le cas où le réseau électrique est disponible.
- Tester d'autres sources d'énergie (Pile à combustibles,) et d'autres systèmes de stockage (Super condensateurs,).



Annexe



Annexe A.1

Les données métrologiques de site d'Adrar par le logiciel Meteonorm V7.3.1.20860 :

Adrar

Nom du site

606200

WMO

27.817

Latitude [°N]

279

Altitude [m a.s.l.]

-0.183

Longitude [°E]

IV, 5

Climat de la région

Standard

Modèle rayonnement

2000–2009

Période de température

Standard

Modèle température

1991–2010

Période de rayonnement

Perez

Modèle rayonn. incl.

Information supplémentaire

Incertitude des valeurs annuelles: Gh = 5%, Bn = 10%, Ta = 0,3 °C

Tendance de Gh / décennie: 3,8%

Variabilité de Gh / an 3,1%

Sites d'interpolation du rayonnement Données par satellite (Part des données par satellite: 100%)

Stations de l'interpolation de température: Timimoun (166 km), IN SALAH NORTH (273 km), In Salah (270 km), Tindouf (782 km), El Golea (425 km)

Valeur P90 et P10 de radiation globale, relative au moyen: 96,3%, 103,5%

charge de neige (DE/AT/CH/FR): -999.00 [kN/m²], Jours de neige: 0 [jours]

charge de vent (DE/CH): -999.00 [kN/m²]

Données approximatives de neige et de vent charge les données fondées sur la législation nationale

Mois	Ta	Ta min	Ta dmin	Ta dmax	Ta max	RH	H_Gh	SDm
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[kWh/m ²]	[h]
Janvier	12.9	1.1	5.9	20.3	25.5	38	141	253
Février	16.2	3.7	9.2	23.6	30.5	30	142	246
Mars	21.4	7.4	14.4	29.1	37.5	22	202	298
Avril	25.3	11.4	17.9	32.6	39.1	18	221	316
Mai	30.5	17.0	23.4	38.1	43.5	16	241	334
Juin	35.2	22.9	27.5	42.2	47.0	12	240	336
Juillet	38.2	26.9	31.2	45.6	48.6	11	245	319
Août	37.2	26.2	30.7	44.6	47.3	12	225	294
Septembre	33.1	21.1	26.3	40.1	44.3	20	192	267
Octobre	27.5	16.5	21.4	34.8	40.3	26	161	272
Novembre	19.0	5.8	12.2	26.1	34.0	34	136	244
Décembre	14.4	2.1	7.7	21.8	28.9	41	124	249
Année	25.9					23	2266	3428



Meteonorm V7.3.1.20860 - Demo mode

1/4

Annexe A.2

Mois	SDd	SD astr.	RR	RD	FF	DD
	[h]	[h]	[mm]	[d]	[m/s]	[deg]
Janvier	8.2	10.4	1	0.2	4.8	90
Février	8.8	11.1	2	0.4	5.2	90
Mars	9.6	11.9	2	0.5	5.2	135
Avril	10.5	12.7	2	0.3	5.8	0
Mai	10.8	13.4	0	0.1	6.1	90
Juin	11.2	13.8	1	0.4	5.6	90
Juillet	10.3	13.6	1	0.2	5.5	45
Août	9.5	13.0	1	0.5	5.3	90
Septembre	8.9	12.2	1	0.3	5.0	90
Octobre	8.8	11.4	3	0.3	4.5	90
Novembre	8.1	10.6	7	0.3	4.1	135
Décembre	8.0	10.2	0	0.1	3.9	135
Année	9.4		22	3.6	5.1	90

Ta: Temperature de l'air
 RH: Humidite relative
 Ta min: 10 a. minimum (approx.)
 Ta max: 10 a. maximum (approx.)
 Ta dmin: Moyenne minimum journ. Ta
 Ta dmax: Moyenne maximum journ. Ta
 SD: Duree d'insolation
 RR: Precipitations
 RD: Jours avec precipitation
 FF: Vitesse du vent
 SD astr.: Duree d'insolation, astronomique
 DD: Direction du vent
 H_Gh: Irradiation du rayonnement global horizontal





*Références
bibliographiques*



Références bibliographies

- [1] <http://www.energy.gov.dz> (Bilan Energétique National, 2018).
- [2] Baghdadi Fazia, « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Génie Mécanique, Thermo fluides, Mémoire Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [3] Bencherif Mohamed, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension », Physique Energétique Et Matériaux, Thèse Doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [4] B. Wichert, « PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 1, No. 3, pp. 209–228, Elsevier Science 1997.
- [5] M.Ashari, C. V. Nayar, « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system », Renewable Energy, vol. 66, No. 1, pp. 1–9, Elsevier Science 1999.
- [6] Stéphane VIGHETTI, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Génie Electrique, Thèse Doctorat, Université de Grenoble 2010.
- [7] <https://www.photovoltaique.info/fr>
- [8] Sahli Abdeslem, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Electronique, Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas - Sétif 2012
- [9] Yassine LASMI, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes », Electrotechnique, Réseaux Electriques, Mémoire Magister, Université Sétif -1, Algérie 2013.
- [10] Adouane mabrouk, « Etude de la fiabilité des systèmes solaires hybrides dans le Sahara », électronique, Electricité Solaire, Thèse Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique-Algérie, 2014.

- [11] <https://fr.scribd.com/document/332447847/1-Energie-Solaire>.
- [12] B. Flèche, D. Delagnes, «Energie solaire photovoltaïque», STI ELT Approche générale, juin 2007.
- [13] Salaheddine Bensalem, «Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires», Energétique et Mécanique des Fluides, Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif 2011.
- [14] Ionel Vechiu, «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Electronique, Electrotechnique et Automatique, Génie Electrique, Thèse Doctorat, Université du Havre-France, 2005.
- [15] <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/pages/l-energie-eolienne/les-differents-types-d-eoliennes.html>.
- [16] Tarak Ghennam, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», Génie Electrique, Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [17] Lila CROCI, «gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs», Automatique, Thèse Doctorat, Université de Poitiers 2013.
- [18] <https://slideplayer.fr/slide/11809199>
- [19] Morlaye Sekou CAMARA, «Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau», Article Conference: Journées De La Section Electrotechnique Du Club Eea 20-21 Mars, Le Havre, Université de Caen, France 2014.
- [20] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, «État de l'art dans les aérogénérateurs électriques», Extrait du rapport de synthèse ECRIN «L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.

- [21] Dhaker Abbes, « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome», Génie électrique, Thèse Doctorat, l'Université De Poitiers 2012.
- [22] Nathalie Devillers, « caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique», Thèse Doctorat, Université de Franche-Comté 2012.
- [23] Mohamad Koteich, «Modélisation et observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique», Génie Electrique, Thèse Doctorat, L'Université Paris-Saclay 2016.
- [24] M. Belhamel, «Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien-Photovoltaïque -Diesel) », Rev. Energ. Ren.: Zones Arides 49-54, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah Alger, 2002.
- [25] A. Oudrane, «Etude et calcul de bilan de la densité du flux solaire pour un simple habitat dans la région d'Adrar», Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°1 51 – 60 Centre de Développement des Energies Renouvelables, Reggan, Adrar, Algérie 2017.
- [26] Djelloul Benatiallah, «Estimation du rayonnement solaire en utilisant le modèle Bird et Capderou dans la région d'Adrar », Article, le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Alegria 24 - 25 Octobre 2016.
- [27] Naim Houcine, «Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique», Physique Energétique, Thèse Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016.
- [28] Adnane Zaimi, «Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents», Energie électrique, Mémoire d'Ingénieur, CNAM, Center de Maroc 2014.
- [29] Dhaker Abbes, «Etude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage : dimensionnement et analyse du cycle de vie», Article Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique, LAII- ESIP Bât de Mécanique, Toulouse France 2016.

- [30] Rachid Maouedj, «Etude des performances d'un système éolien. Application pour des sites algériens», Article le 13èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France du 28 au 30 Août 2007.
- [31] REZZK Daoud, « Application d'une pile à combustible de type PEM (*Proton Exchange Membrane*) dans la traction électrique automobile», Sciences Spécialité Electrotechnique, Thèse Doctorat, université de Jijel, 2017.
- [32] LATRECHE Mohammed Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Électrotechnique Commande Electrique, Mémoire Magistère, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.