République Algérienne Démocratique et Populaire

PFE N° : 69

Ministère de l'Enseignement superieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

PROJET DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique et Electromécanique

Thème

Contribution à l'optimisation et la gestion d'une source d'énergie hybride photovoltaïque-éolien

Réalisé par :

BOUNAB Adel
ARAR Idris

Encadré par :

BABOURI Rabah

Soutenue le : 06 Octobre 2020

Devant le Jury composé de :

Mme Zahra MOKRANNI	présidente	Dr	Univ. Bejaia
Mme Sofia BELAID	Examinatrice	MCA	Univ. Bejaïa

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

*Avant tout, Nous tenons a remercié **ALLAH** le Tout-puissant pour le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.*

*Nous tenons à remercie vivement en premier lieu Monsieur **: R. BABOURI**, docteur à l'université de Bejaia, et mon directeur de mémoire de master, qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.*

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail

Enfin les remerciements les plus évidents étant les plus importants nous adressant toute notre affectation aux membres de nous famille, en particulier à nous parents pour leur patience et leur soutien.

Merci mon Dieu

Adel&Idris

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chère parents Bounab Saddek et NADIA symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie ;

A mes chères sœurs, Nadjet, Rima, Salsabil ;

A ma future femme, Lamissa ;

A toute la famille BOUNAB, et à tous mes amis ;

Mes enseignants depuis mon enfance ;

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser de près ou de loin ce mémoire ;

AdeL

Dédicace

.

Je dédie ce modeste travail a

Mes parents,

À ma précieuse maman DJOHRA qui a été toujours à mes cotes avec son encouragement et sa perrière au dieu pour ma réussite dans ma carrière universitaire,

A mon cher papa MOHAMED que sont âme repose en paix,

A mon cher frère bien aimé RABAH et sa femme et ses enfants ZAKI et FARAH,

A ma très chère sœur,

A toute ma famille ARAR et a tous mes amis et personnes qu'ont m'aiment.

Idris

SOMMAIRE

Introduction générale……1

Chapitre I

Etat de L'art Sur Le système hybride Eolien-Photovoltaïque

I.1. Introduction 3

I.2. Définition du système d'énergie hybride (S.E.H) 3

I.3. Configuration du bus dans les systèmes hybrides 4

I.4. Présentation du (S.E.H) étudie avec stockage.....6

I.5. Avantages et limites des systèmes hybrides (PV-éoliens) avec stockage 6

I.6. Description de la chaine de production photovoltaïque.....7

I.6.1. Rayonnement solaire sur un plan incline 7

I.6.2. La cellule photovoltaïque 8

I.6.2.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 8

I.6.2.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque 8

I.6.3. Générateur photovoltaïque 9

I.6.3.1. Mise en série/parallèle.....9

I.6.3.2. Protection du générateur photovoltaïque.....10

I.7. Les convertisseurs statique 11

I.7.1. Les convertisseur DC/DC (hacheur).....11

I.7.2. Les convertisseur DC/AC (onduleur) 12

I.7.3. Les convertisseur AC/DC (redresseur) 12

I.8. Description de la chaine de production éolienne 12

I.8.1. Origine de vent.....12

I.8.2. Type d'aérogénérateur 13

I.8.3. Fonctionnement d'une éolienne 14

I.8.4. Caractéristique de turbine éolienne 15

I.8.5. Machine électrique dans les aérogénérateurs 15

I.8.5.1. Machine asynchrone double alimentation (MADA) 16

I.8.5.2. Avantages et inconvénients de MADA 16

I.9. Le dispositif de stockage 17

I.9.1. Moyenne de stockage 17

I.9.2. Les accumulateurs électrochimique (batterie) 18

I.10. Conclusion 18

Chapitre II

Modélisation et commande système hybride Eolien-Photovoltaïque

II.1. Introduction 19

II.2. Modélisation de la chaine de la conversion photovoltaïque 19

II.2.1. Modélisation du rayonnement solaire 19

II.2.2. Modélisation du générateur photovoltaïque 21

II.2.3. Modélisation du convertisseur (BOOST) 24

II.2.4. Commande MPPT appliquée au système photovoltaïque 25

II.2.4.1. MPPT par perturbation et d'observation (P&O) 26

II.2.4.2. MPPT par incrémentation de conductance (CI) 28

II.3. Modélisation de la chaine de conversion éolienne 30

II.3.1. Modélisation du vent 30

II.3.2. Modélisation de la turbine 31

II.3.3. Multiplicateur de vitesse 31

II.3.4. Modélisation de l'arbre de la machine 32

II.3.4. Contrôle et limitation de la puissance des turbines 33

II.3.5. Modélisation la génératrice asynchrone a double alimentation 34

II.3.5.1. Modèle naturel triphasé de la MADA.....34

II.3.5.2. Modèle de Park biphasé de la MADA 37

II.4. Commande vectorielle de la MADA.....39

II.4.1. Principe de la commande vectorielle 39

II.4.2 commande vectorielle par orientation du flux statorique 40

II.5. Modélisation des convertisseurs 42

II.5.1. Construction du convertisseur 42

II.5.2. Modèle du convertisseur.....42

II.5.3. Commande MLI du convertisseur 44

II.6. Modélisation du bus continu.....45

II.7. Modélisation du dispositif de stockage.....46

II.8. Conclusion 47

Chapitre III

Gestion du système hybride Eolien-Photovoltaïque

III.1. Introduction 48

III.2. Les différentes possibilités.....48

III.3. Organigramme de gestion d'énergie 49

III.4. Simulation d'un système global 50

III.4.1. Explication du déroulement du programme de gestion.....51

III.4.2. Résultat de simulation et discussion.....51

III.5. Conclusion.....58

N° Figure	CHAPITRE I	N° Page
Figure I.1	schéma d'un système de puissance avec bus alternatif	**04**
Figure I.2	schéma d'un système de puissance avec bus continu	**05**
Figure I.3	schéma d'un système de puissance en couplage mixte, avec un bus continu et un bus alternatif	**05**
Figure I.4	Schéma de système hybride étudie	**06**
Figure I.5	Radiation solaire globale sur un plan incliné	**07**
Figure I.6	Coupe transversale d'une cellule PV typique.	**08**
Figure I.7	Caractéristique $I_c(V_c)$ d'une cellule photovoltaïque	**09**
Figure I.8	De cellule au module au générateur photovoltaïque	**09**
Figure I.9	Mise en série/parallèle d'une cellule photovoltaïque	**10**
Figure I.10	Panneau photovoltaïque	**11**
Figure I.11	schema de principe d'un hacheur	**11**
Figure I.12	schema de principe d un onduleur	**12**
Figure I.13	schema de principe d un redresseur	**12**
Figure I.14	Convection naturelle responsable des déférences de densités	**13**
Figure I.15	Eoliennes a axe verticale : Darrieus type 1, Darrieus type 2, Savonius	**14**
Figure I.16	Eolienne à axe horizontal, Mono-pale, Bipales, Tripales, Multi-pales.	**14**
Figure I.17	Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ	**15**
Figure I.18	Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné.	**16**
Figure I.19	Classification des dispositifs de stockage.	**18**

Liste Des Figures

	CHAPITRE II	
Figure II.1	Chaine de conversion photovoltaïque.	**19**
Figure II.2	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	**27**
Figure II.3	Convertisseur DC-DC élévateur de type Boost.	**30**
Figure II.4	Caractéristique du point de puissance maximale *PPM.*	**31**
Figure II.5	Organigramme de la méthode perturbation et observation (P§O).	**33**
Figure II.6	Organigramme de la méthode (CI).	**35**
Figure II.7	Chaine de conversion éolienne	**36**
Figure II.8	Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance	**39**
Figure II.9	Représentation schématique de la MADA	**40**
Figure II.10	Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.	**43**
Figure II.11	Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la Machine.	**46**
Figure II.12	Vecteur flux dans le système d'axes choisi	**47**
Figure II.13	Schéma d'un onduleur de tension triphasé	**48**
Figure II.14	Principe de la commande MLI "sinus-triangle"	**50**
Figure II.15	Schéma électrique du filtre	**51**
Figure II.16	schéma équivalant de nb élément en série	**52**
	CHAPITRE III	
Figure III.1	Organigramme d'algorithme de la gestion.	**55**
Figure III.2	Schéma bloc du système global	**56**
Figure III.3	la vitesse d'entrainement de la génératrice	**57**
Figure III.4	la puissance fournie par le système éolien	**57**

Figure.III.5	profile de l'ensoleillement	**58**
Figure III.6	La puissance générée Par le système photovoltaïque	**58**
Figure III.7	Puissance demandée par la charge	**58**
Figure III.8	Tension du bus continu	**59**
Figure III.9	Allure des Puissances du système	**59**
Figure III.10	La puissance de charge de la batterie.	**60**
Figure III.11	La puissance injectée au réseau.	**60**
Figure III.12	La puissance de décharge de la batterie	**61**
Figure III.13	La puissance fournie par le réseau	**61**
Figure III.14	La puissance de chargement des batteries et injecté au réseau	**62**
Figure III.15	Eta de charge de la batterie (EDC).	**62**

Photovoltaïque :

$G(i,\gamma)$	:	Rayonnement globale sur un plan incliné	**[W/m2].**
P_{opt}	:	La puissance optimale de la cellule	$[W]$.
V_{co}	:	Tension de circuit ouvert	**[V]**
I_{cc}	:	Courant de court-circuit	**[A]**
V_{mpp}	:	Tension de point de puissance maximal	**[V]**
I_{mpp}	:	Courant de point de puissance maximal	**[A]**
E_s	:	L'ensoleillement	$[W/m2]$.
T_j	:	La température de jonction de la cellule	**[°C].**
R_s	:	La résistance série de la cellule	$[\Omega]$.
R_p	:	La résistance parallèle de la cellule	$[\Omega]$.
I_{ph}	:	Le photo-courant	$[A]$.
$P\&O$	:	Perturbation et d'observation	
$MPPT$	:	Maximum Power Point Tracking.	

Hacheur :

V_{pv}	:	La tension d'entrée	$[V]$
V_{out}	:	La tension de sortie	$[V]$
I_L	:	Le courant traversant l'inductance L $[A]$	$[V]$
α	:	Le rapport cyclique	

Batterie :

E_b	:	La force électromotrice	
V_{bat}	:	La tension aux bornes de la batterie	$[V]$.
I_{bat}	:	Le courant traversant la batterie	$[A]$.
R_b	:	La résistance interne de la batterie	$[\Omega]$.
C_{bat}	:	La capacité nominale de la batterie	$[Ah]$.
EDC	:	Etat de charge de la batterie	

Eolienne :

V_{vent}	:	La vitesse du vent	$[m/s]$.
P_v	:	La puissance du vent	$[W]$.
P_t	:	La puissance de la turbine éolienne	$[W]$.
ρ	:	La densité d'air	$[Kg.m-3]$.
$S = \pi R^2$	:	La surface balayée par la turbine	$[m2]$.
C_p	:	Le coefficient de puissance de l'éolienne.	
λ	:	La vitesse relative de la turbine éolienne	$[m/s]$.
T_t	:	Le couple aérodynamique	$[N/m]$.
$T_{ém}$	:	Le couple électromagnétique développé par la génératrice	
$[N/m]$.			
T_v	:	Le couple visqueux	$[N/m]$.
G	:	Le gain du multiplicateur.	
Ω	:	La vitesse mécanique de la génératrice	$[r/s]$.
Ω_t	:	La vitesse de la turbine éolienne	$[r/s]$.
J	:	L'inertie totale de l'arbre de transmission.	
f	:	Coefficient de frottement visqueux.	

Machine :

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	:	Les tensions des phases statoriques	$[V]$.
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	:	Les courants statoriques	$[A]$.
R_s	:	La résistance des phases statoriques	$[\Omega]$.
$\emptyset_{sa}\emptyset_{sb}\emptyset_{sc}$	:	Les flux totaux à travers les bobines statoriques.	
$I_{sd}I_{sq}$	:	Courants statoriques dans le repère de Park	$[A]$.
$V_{sd}V_{sq}$	:	Tensions statoriques dans le repère de Park	$[V]$.
L_s	:	Inductance cyclique statorique	$[H]$.
P	:	Nombre de paires de pôles.	
GADA	:	Génératrices asynchrones à double alimentation.	

Bus continu :

i_{pv}	:	Courant fourni par le générateur photovoltaïque	$[A]$.
$i_{éol}$	:	Courant fourni par le système éolien	$[A]$.
i_c	:	Courant qui traverse la capacité	$[A]$.
i_{hyb}	:	Courant produit par le système hybride éolien-PV	$[A]$.
i_{bat}	:	Courant de la batterie	$[A]$.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Aujourd'hui, il est évident que les besoins mondiaux en énergie sont comblés en grande partie par des énergies fossiles. Or, il a été prouvé que la consommation massive de ces types d'énergies a un effet néfaste sur la planète (le réchauffement climatique). Un des inconvénients du réchauffement climatique se remarque par la désertification de plusieurs régions dans le monde. Une des meilleures idées pour contrer la désertification est l'utilisation de sources d'énergies renouvelables (SER) **[1]**.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles et fissiles : le gaz à effet de serre.

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont des ressources naturelles accessibles et exploitées pour générer de l'énergie électrique. Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies **[2]**.

Cependant, la production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie citées ci-dessus, (du vent ou du rayonnement solaire). Les variations de la production d'énergie sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables (l'inconstance de vent et de soleil). C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles, ainsi cette complémentarité d'énergie est accompagnée par un système de stockage assuré par des batteries au plomb. Par cette étude, nous voulons apporter notre contribution à l'optimisation de la gestion d'énergie d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage.

Le but de ce travail est d'optimiser un système hybride photovoltaïque/éolien avec des batteries de stockage. Pour cela, notre travail, sera structuré comme suit :

- ✓ **Dans le premier chapitre**, nous présenterons une structure du système hybride. Ensuite, nous rappellerons le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque et celui du convertisseur DC-DC à pilotage MPPT. Une étude sera aussi consacrée au fonctionnement de la turbine, de la génératrice asynchrone double alimentation et du l'onduleur deux niveaux. Le dispositif de stockage, batterie au plomb et le bus à CC seront aussi présentés.

- ✓ **Dans le deuxième chapitre,** des modèles mathématiques seront utilisés pour différent composants du système hybride. Ensuit nous présenterons des méthodes d'extraire le maximum de puissance photovoltaïque, et son algorithme, MPPT.

- ✓ **Dans le troisième chapitre,** nous avons présenté et simulé un algorithme de gestion de l'énergie du système hybride, et nous avons montré le bon déroulement de cette algorithme. Enfin**,** nous conclurons ce modeste travail par une conclusion générale.

,

CHAPITRE I

Etat de l'art sur le système hybride photovoltaïque-éolien

I.1. Introduction

La solution des énergies dites renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement en électricité, largement disponible, tout en respectant l'environnement. C'est le cas du solaire photovoltaïque, de l'éolien, de la géothermie, de la biomasse …etc.

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- La géothermie est l'utilisation directe des températures terrestre ou de sources chaudes.

Cependant le caractère aléatoire de ces sources (solaire et éolienne), l'inconstance de vent et de soleil nous impose d'utiliser un système pour les exploiter au mieux, on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Dans ce chapitre, il sera exposé la description et le principe de fonctionnement de différents composants du système hybride éolien-photovoltaïque avec stockage. Le générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et les convertisseurs de puissance seront présentés. Le système de stockage sera présenté aussi à la fin du chapitre.

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

De façon générale, un système hybride d'énergie est un système qui combine différents systèmes de production. D'après **[1]**, de nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux sources d'énergie, ils peuvent être connecté au réseau ou fonctionner en régime isolé (mode autonome). On rencontre différentes sources d'énergie telles que : l'éolien, le solaire PV, la micro hydroélectricité, les générateurs Diesel, le réseau électrique, différents systèmes de stockage comme les volants d'inertie, le super condensateur, les batteries d'accumulateurs. Par exemple, la combinaison éolien-photovoltaïque est un système hybride d'énergie.

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge.

I.3. Configuration du bus dans les systèmes hybrides

Différentes classifications des configurations de systèmes hybrides sont rencontrées dans la littérature**.** Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides contiennent deux bus : un bus à CA pour les générateurs a CA et le système de distribution, un bus a CC pour les sources, les charges à CC et les batteries.

A. Le couplage CA

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (CA). Les générateurs éoliens et les autres sources de production alternative peuvent être directement connectés sur le bus CA, ou avoir besoin d'un convertisseur CA/CA. Cette configuration offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge **[2]**.

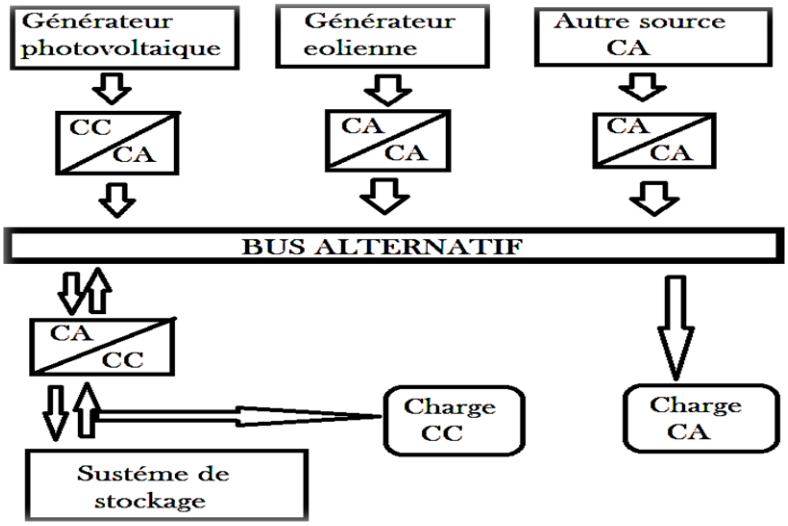

Figure I.1 : Schéma d'un système de puissance avec bus alternatif

B. Le couplage CC

La puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Le système de stockage est connecté au bus CC, l'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu. L'avantage de cette combinaison et sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande.

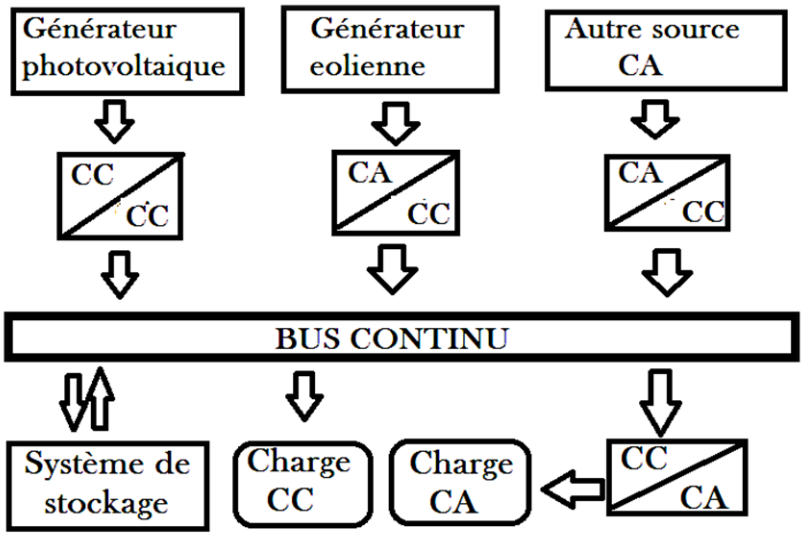

Figure I.2 : Schéma d'un système de puissance avec bus continu

C. Le couplage mixte CC/CA

Dans la configuration à deux bus, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge en CA et l'autre partie en CC. Les deux bus doivent être reliés par un convertisseur bidirectionnel.

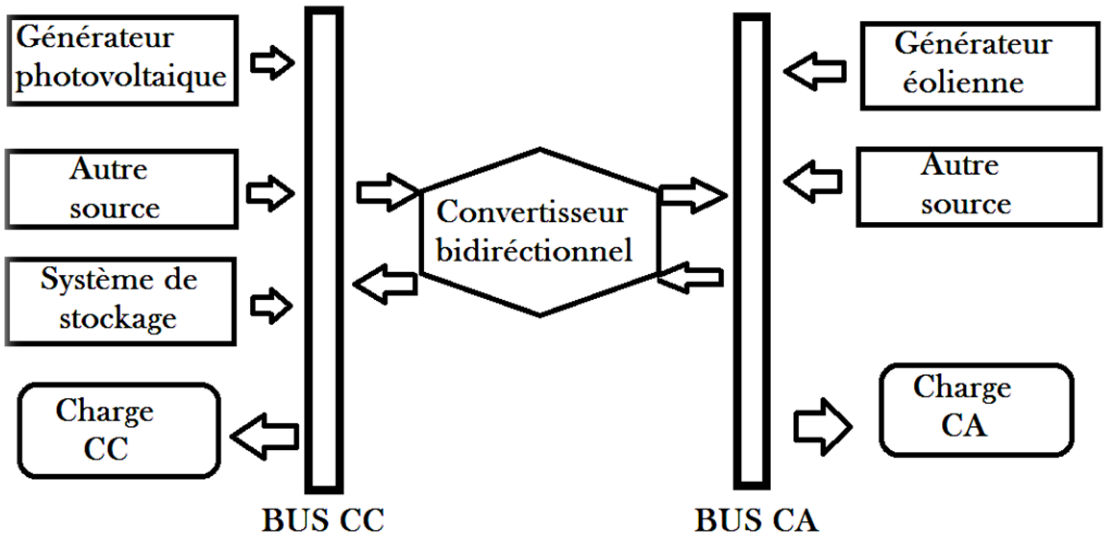

Figure I.3 : Schéma d'un système de puissance en couplage mixte, avec un bus continu et un bus alternatif

I.4. Présentation du (S.E.H) étudie avec stockage

Dans notre étude, nous intéressons principalement aux systèmes hybrides formés par deux sources renouvelables de type photovoltaïque connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT, et éolien a basse d'une MADA. Le stator et le rotor de la GADA sont connectés au réseau à travers une cascade deux redresseur MLI deux niveau et un onduleur MLI), et un stockage électrochimique de type batteries. Dans cette étude, les configurations hybrides étudiées sont caractérisées par la présence d'un bus à courant continu (Bus CC) qui est adapté pour les micro-réseaux et à charges continues.

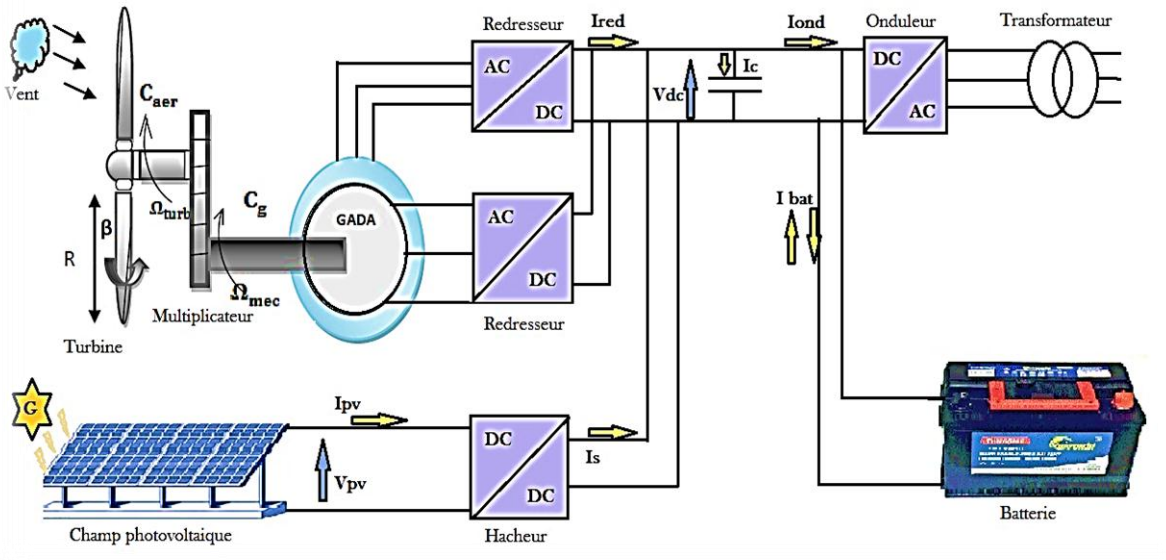

Figure I.4 : Schéma de système hybride étudie

I.5. Avantages et limites des systèmes hybrides (éoliens-photovoltaïques) avec stockage

Les systèmes hybrides les plus répandus sont caractérisés par un couplage éolien-photovoltaïque. L'intérêt de la combinaison de ces deux sources énergétiques consiste en leur efficacité environnementale. Au cours de leur fonctionnement ne génèrent ni émissions nocives, ni gaz polluants. Ils utilisent seulement l'énergie du soleil et du vent comme « carburant », donc ils contribuent activement à réduire le réchauffement climatique **[3]**. D'autre avantage des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques est : flexible, extensible et capable de satisfaire les charge évolutive, sont exploitation est simple et travaux de maintenance réduit.

Néanmoins, l'hybridation de ces sources d'énergies renouvelables pose certains problèmes. D'abord, compte tenu de leur nature stochastique, Il y a une difficulté à pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge.

Ensuite, l'hybridation pose le problème de l'interconnexion et de la gestion énergétique. La commande de ces systèmes est faite en fonction de l'état de charge de la batterie **[3]**. Par la suite, nous allons faire la description des éléments constitutifs du système hybride éolien-photovoltaïque avec stockage électrochimique (batteries).

I.6. Description de la chaine de production photovoltaïque

I.6.1. Rayonnement solaire sur un plan incline

Bien que le rayonnement de la surface du soleil soit constant, au moment où il atteint la surface de la Terre il devient fortement variable, et cela est dû à son absorption et à sa dispersion dans l'atmosphère terrestre. On distingue quatre types de rayonnement **[4]** :

- Le **rayonnement direct :** est le rayonnement reçu directement du Soleil.
- Le **rayonnement diffus :** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages.
- Le **rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol : est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- Le **rayonnement global :** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le Rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface.

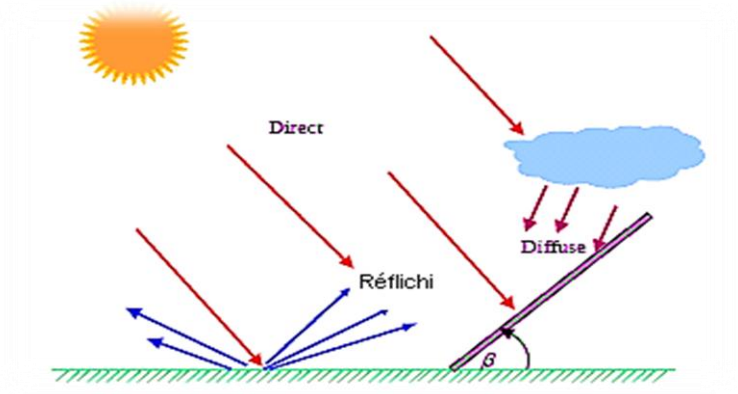

Figure I.5 : Radiation solaire globale sur un plan incliné

I.6.2. La cellule photovoltaïque

I.6.2.1. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur d'habitude du silicium absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique continu sous l'effet photovoltaïque.

Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches **[5]**.

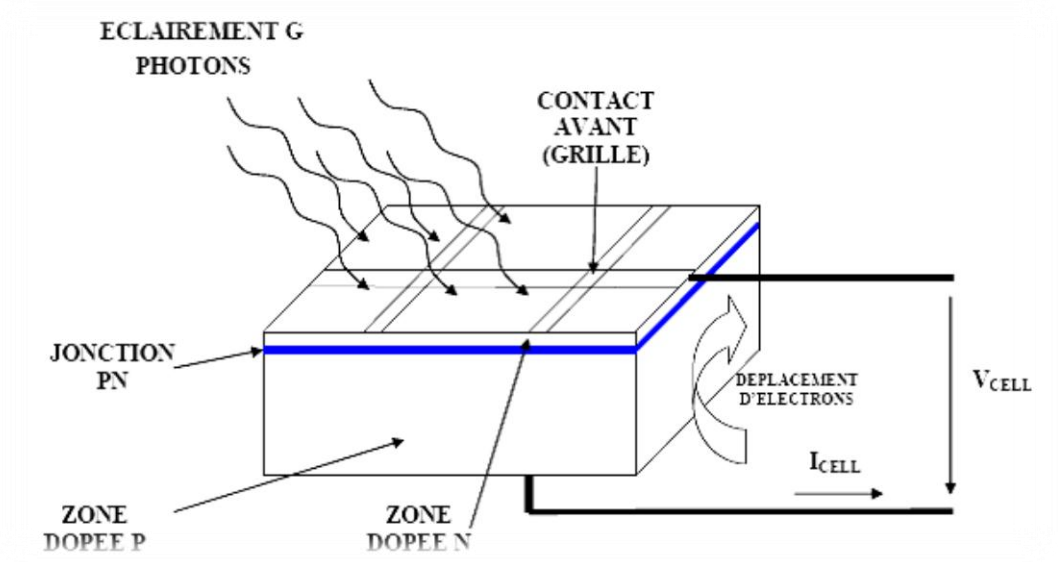

Figure I.6 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.

I.6.2.2. Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La Figure I.7 montre la caractéristique courant-tension (I_c, V_c) pour une cellule photovoltaïque. La cellule étant chargée par une résistance R variable. Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente *1/R*. Si la résistance *R* est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région *AB* de la courbe. Le courant I_c varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant DC **[6]**. D'autre part, si la résistance *R* est grande, la cellule fonctionne dans la région *CD*. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction de la tension V_{co} : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à

la tension de fonctionnement à vide. Dans la région *BC* sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température **[6]**.

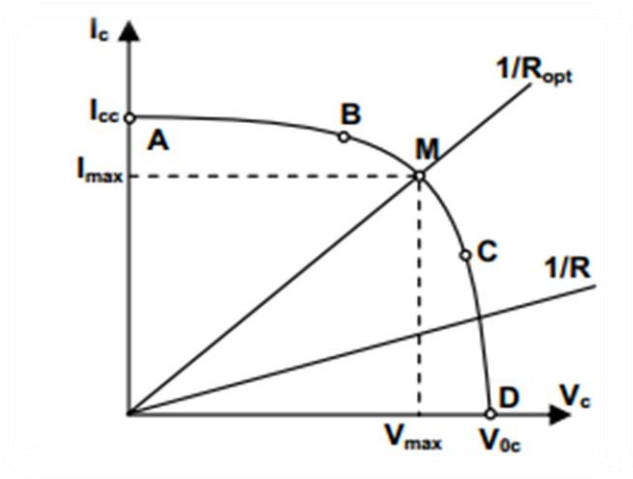

Figure I.7 : Caractéristique $I_c(V_c)$ d'une cellule photovoltaïque

I.6.3. Générateur photovoltaïque

I.6.3.1. Mise en série/parallèle

Pour produire davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module photovoltaïque. Un générateur PV ou champ PV, résulte de l'association de modules PV montés en série et en parallèle **[7].**

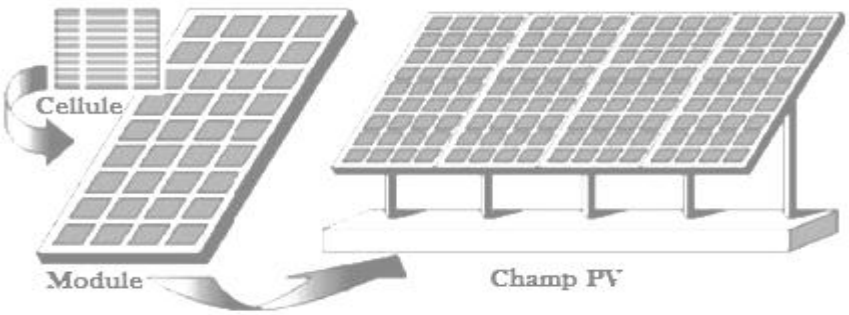

Figure I.8 : De cellule au module au générateur photovoltaïque

On distingue trois types de montage : branchements en série, parallèle et mixte **[7].**

- Le **montage en série** : une association de Ns cellule en série permet d'augmenter la tension de (GPV), les cellules sont alors traversées par le même courant, donc Les voltages s'additionnent et l'ampérage reste identique, c'est le type de montage le plus fréquent pour les systèmes en 48V.
- Le **montage en parallèle :** Une association parallèle de Np cellules permet d'accroitre le courant de sortes de générateur photovoltaïque, donc le voltage reste identique et les ampérages s'additionnent. C'est le type de montage fréquent pour les systèmes en 12V.
- Il est également possible de combiner un **montage en série et en parallèle**. C'est le type de montage le plus fréquent pour les systèmes en 24V

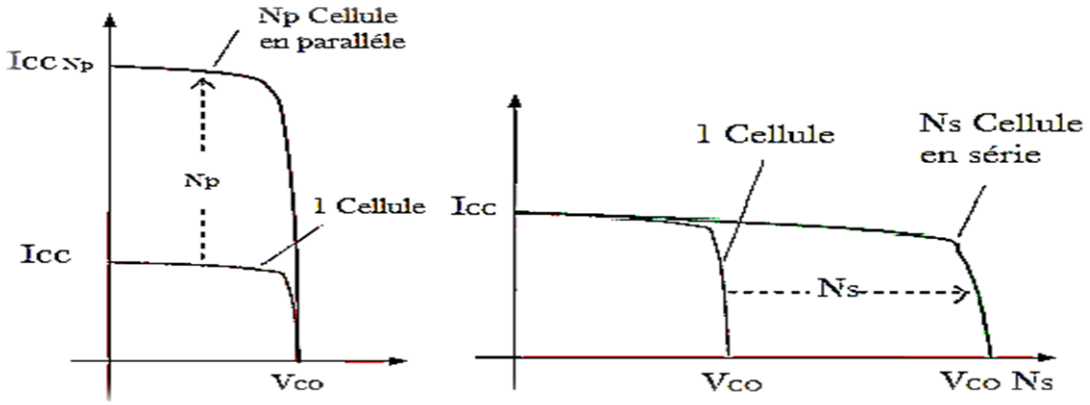

Figure I.9 : Mise en série/parallèle d'une cellule photovoltaïque

I.6.3.2. Protection du générateur photovoltaïque

Pour garantir la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules PV afin d'éviter des pannes. Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque **[7]** :

- La protection par **diodes parallèles** (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules parallèle.
- La **diode série** placée entre le module et la batterie empêche pendent l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour.

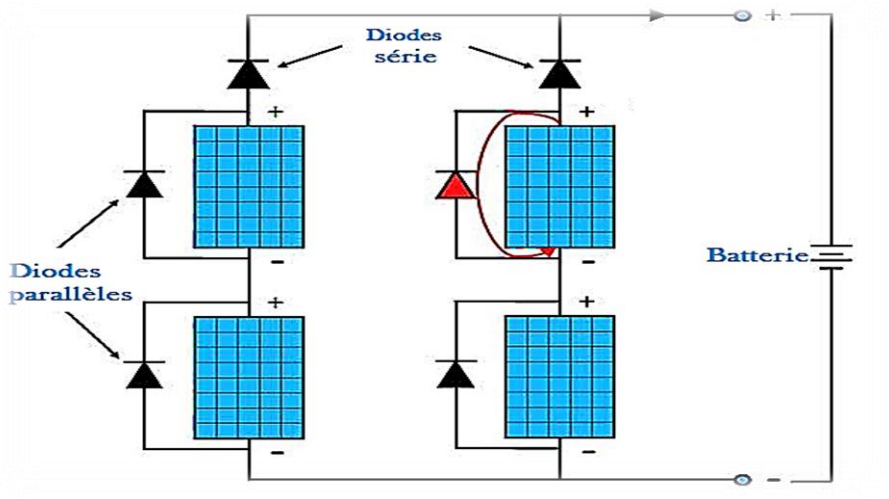

Figure I.10 : Panneau photovoltaïque

I.7. Les convertisseur statique

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa, est de maximiser la production de puissance des sources.

Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs **[8]**.

I.7.1. Les convertisseur DC/DC (hacheur)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue **[8]**.

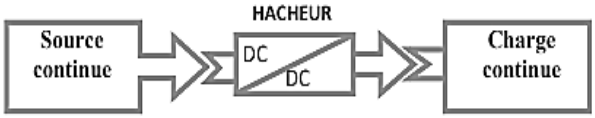

Figure I.11 : Schema de principe d'un hacheur.

I.7.2. Les convertisseur DC/AC (onduleur)

L'onduleur est un montage électronique permettant de transformer une tension continue en une tension alternative. Ils sont utilisés généralement pour la production de tensions alternatives, et aussi pour commander les machines à courant alternatif.

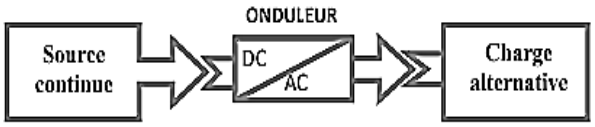

Figure I.12 : Schema de principe d un onduleur

I.7.3. Les convertisseur AC/DC (redresseur)

Les redresseurs permettent de convertir une alimentation alternative en continue. La tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par les composants de puissance utilisés : Les diodes et Les thyristors.

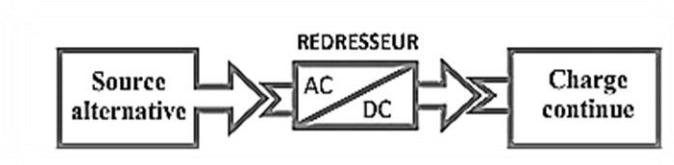

Figure I.13 : Schema de principe d un redresseur

I.8. Description de la chaine de production éolienne

I.8.1. Origine de vent

La source première de l'énergie éolienne est le vent. Le vent nait sous l'effet des différences de températures et de pression. Il est défini comme étant le déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent **[9]**.

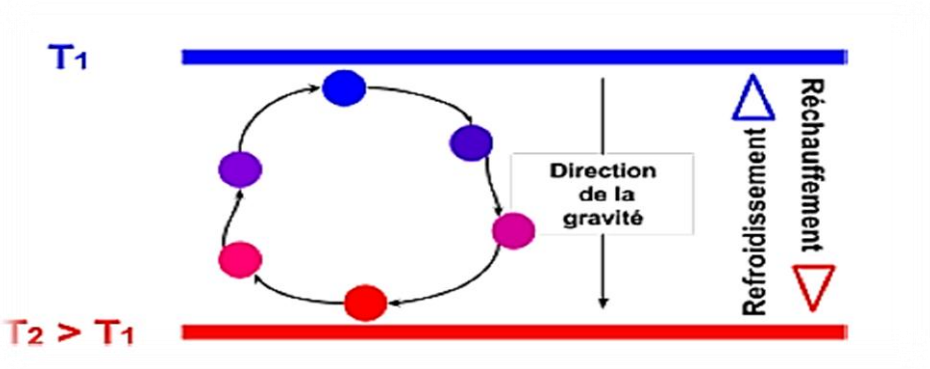

Figure I.14 : Convection naturelle responsable des déférences de densités**.**

I.8.2. Type d'aérogénérateur

Il existe deux familles d'éoliennes selon la technologie du turbine utilisé : les éoliennes à axe vertical (VAWT : Vertical Axis Wind Turbine) et les éoliennes à axe horizontal (HAWT).

- **EOLIENNES A AXE VERTICAL**

Bien que les éoliennes à axe vertical aient été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application étant donné qu'elles sont bien adaptées aux zones de vent perturbées par les habitations, elles sont d'une conception très simple, deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation **[9],** à savoir : les éoliennes de type Savonius et les éoliennes de type Darrieus.

Le fonctionnement des éoliennes de type Savonius (voire Figure I.15) est basé sur le principe de la traînée différentielle et celui de type Darrieus repose sur le principe de la variation cyclique d'incidence.

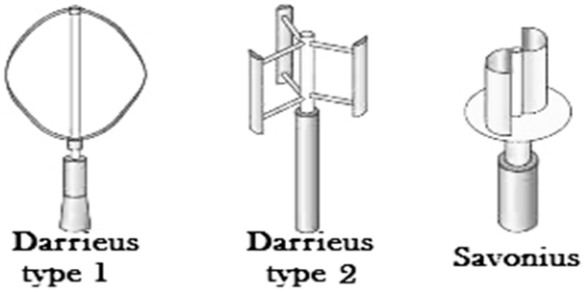

Figure I.15 : Eoliennes a axe verticale : Darrieus type 1, Darrieus type 2, Savonius.

L'avantage principal de la topologie à axe vertical réside dans la possibilité de placer au sol tout l'équipement mécanique et électrique qui constitue la chaîne de conversion électromécanique, nécessite pas l'orientation de rotor dans la direction du vent. Par contre, ces éoliennes présentent certains inconvénients, à savoir :

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Démarrage difficile pour le Darrieus, et masse non négligeable pour le Savonius.

❖ **EOLIENNES A AXE HORIZONTAL**

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT) sont de loin les plus utilisées, cette topologie offre la possibilité de varier l'angle de calage pour contrôler la puissance produite et la vitesse de l'éolienne, est aussi utilisée pour protéger la turbine contre les survitesses lors des tempêtes. Elle présente aussi un rendement aérodynamique élevé par rapport aux topologies à axes vertical.

Les éoliennes de type horizontal peuvent être classifiées selon le nombre de pales qu'elles utilisent, une, deux, trois ou plus. Les structures à trois pales sont les plus répandues pour l'application éolienne **[9]**.

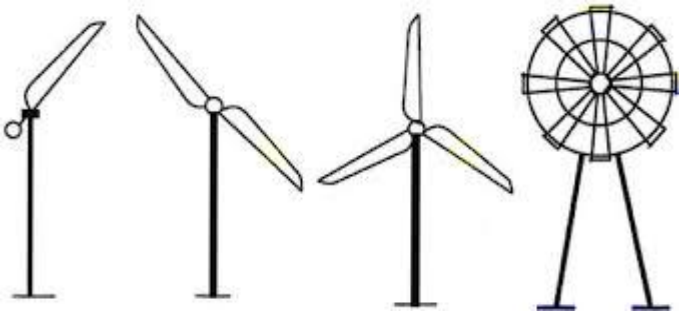

Figure I.16 : Eolienne à axe horizontal, Mono-pale, Bipales, Tripales, Multi-pales.

I.8.3. Fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent captée par les pales, en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assurée par un générateur de type synchrone ou asynchrone **[10]**.

I.8.4. Caractéristique de turbine éolienne

Les courbes caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance Cp qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine, il dépend de l'angle d'inclinaison des pales β, et de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

La figure (I.17) illustre l'évolution de coefficient de puissance Cp en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β.

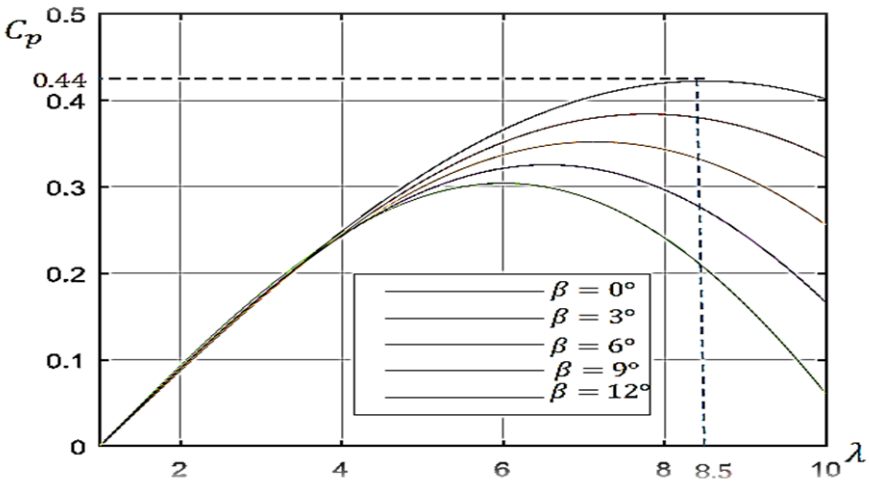

Figure I.17 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine λ

D'après la figure, on peut remarquer que le coefficient de puissance Cp=0,44 passe par un maximum, pour une valeur de l'angle de calage β=0, et une valeur particulière de la vitesse spécifique λ=8,5. Pour optimiser la capture de l'énergie contenue dans le vent, la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation s'adapte avec la vitesse de vent afin que la vitesse spécifique soit optimale **[11]**.

I.8.5. Machine électrique dans les aérogénérateurs

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Mais elles présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et

un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants aux dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes **[12]**.

I.8.5.1. Machine asynchrone double alimentation (MADA)

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. On peut voir sur la figure (I.18) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

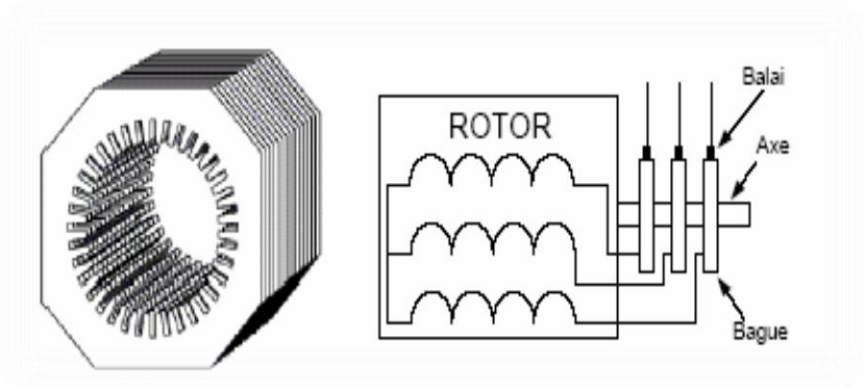

Figure I.18 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine asynchrone à rotor bobiné.

I.8.5.2. Avantages et inconvénients de MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

❖ **Avantages**

- Pour une application éolienne où l'utilisation de la MADA est intense, la vitesse de rotation du rotor est réglée en fonction de la vitesse du vent. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, ce qui permet de tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent **[13]**.

- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement **[14].**

❖ **Inconvénients**

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais **[14]**.
- Le prix de la machine est plus important que celui de la machine à cage.
- Elle nécessite une maintenance, ce qui va augmenter le coût d'exploitation.

I.9. Le dispositif de stockage

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme **[5]**.

I.9.1. Moyenne de stockage

Il existe plusieurs systèmes de stockage qui utilisent différentes technologies et méthodes, ces systèmes permettent de stocker directement ou indirectement l'énergie électrique **[1]**.
Dans le cas de stockage direct, l'énergie est emmagasinée sous différentes formes durant la période de faible demande d'énergie, cette énergie est restitue sous forme électrique en cas de besoin. Par contre, dans le cas de stockage indirect, l'énergie emmagasinée peut être classée en quatre catégories : mécanique, électrochimique et électrostatique, thermique et thermochimique, chimique, par la suite toutes ses formes se transforment en électricité.

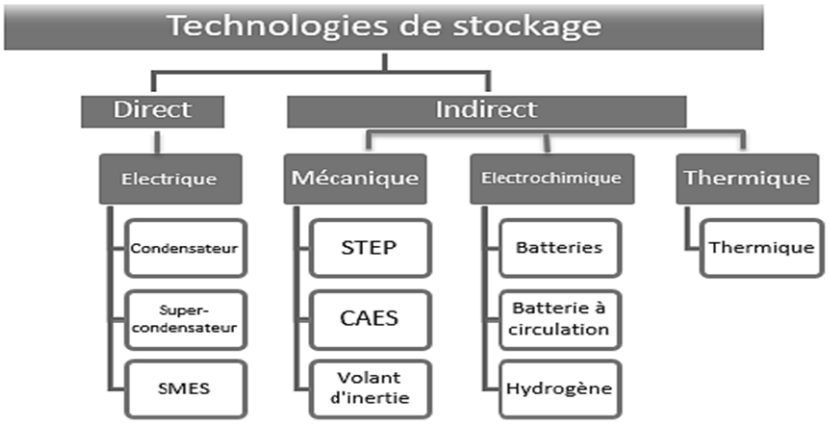

Figure I.19 : Classification des dispositifs de stockage.

I.9.2. Les accumulateurs électrochimique (batterie)

Ce type de stockage, convertie l'énergie chimique en énergie électrique grâce à la réaction électrochimique, les principaux équipements dans ce type sont les batteries. Il existe plusieurs types des batteries telles que le plomb-acide, nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, lithium-ion, lithium-polymère, etc.

La batterie au plomb-acide est la technologie la plus ancienne et la plus utilisée dans le monde, sont les plus répandues car elles offrent le meilleur compromis en termes de coût / performance / entretien. Son électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique, l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb PbO2 et l'électrode négative de plomb Pb **[15]**. La réaction mise enjeu est la suivante : $Pb+PbO2+2H2SO4 \rightleftarrows 2PbSO4+2H2O$.

I.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception de système hybride photovoltaïque et éolienne. Et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, le dispositif de stockage, ainsi que leurs principes de fonctionnements, ce qui permet d'introduire à la modélisation et la commande du système hybride formé par ces deux système

CHAPITRE II

Modélisation et commande du système hybride photovoltaïque-éolien

II.1. Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système S.E.H, nous procédons à la modélisation du système, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous présenterons les modèles de la chaine de conversion photovoltaïque : rayonnement solaire sur un plan incliné, le générateur photovoltaïque. Ensuite, Nous exposons des modèles de la chaine de conversion éolienne à basse de la GADA : le vent, les convertisseurs, et le bus continue, et du dispositif de stockage (batterie).

II.2. Modélisation de la chaine de la conversion photovoltaïque

La chaine de conversion photovoltaïque, constituée d'un générateur PV et l'ensemble : hacheur survolteur et son système de commande, permettant d'extraire la puissance maximale. Cette chaine est représentée en figure II.1. La modélisation de ses différents organes va être examinée dans ce qui suit, en commençant par le rayonnement solaire.

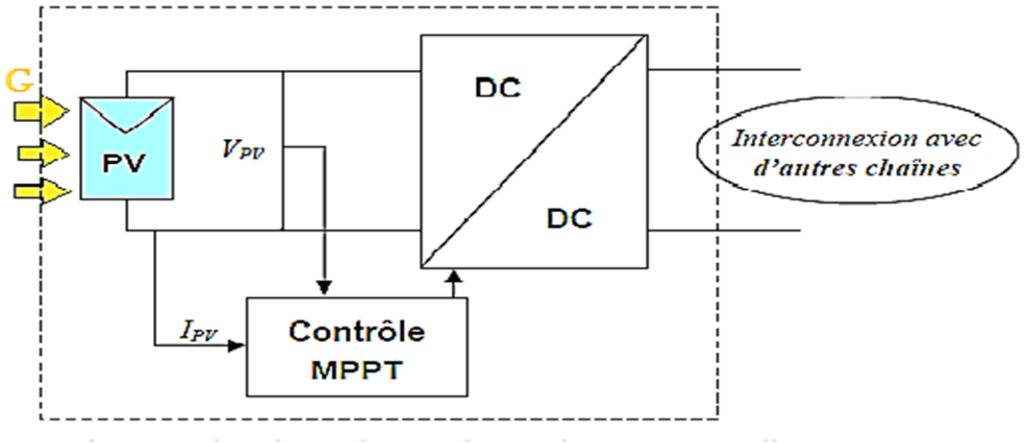

Figure II.1. Chaine de conversion photovoltaïque.

II.2.1. Modélisation du rayonnement solaire

L'énergie d'entrée pour le système photovoltaïque est le rayonnement solaire normal et diffus qui dépend de la position du soleil dans le ciel et la période dans l'année.

L'irradiation globale sur un plan incliné **[16],** est calculée par la relation suivante :

$$G(i,\gamma) = I_{dir}(i,\gamma) + D_c(i,\gamma) + D_s(i,\gamma) \qquad \text{(II.1)}$$

Avec :

$I_{dir}(i,\gamma)$: Rayonnement direct sur un plan direct.

$D_C(i,\gamma)$: Rayonnement diffuse du ciel sur un plan direct.

$D_S(i,\gamma)$: Rayonnement diffuse du sol sur un plan direct.

- **RAYONNEMENT DIRECT**

Le rayonnement direct sur un plan incliné est calculé par la formule suivant :

$$I_{dir}(i,\gamma) = \frac{I_h.\cos\theta}{\sin h} \qquad \text{(II.2)}$$

Ou :

$$\cos\theta = \cos h\,.\sin i\,.\cos(\gamma-\alpha) + \sin h\,.\cos i \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

θ : Angle d'incidence

h : Hauteur du soleil

α : azimut

i : inclination (l'angle que fait le capture avec le plan horizontal).

γ : Orientation (l'angle que fait la normale du capteur et le plant méridien).

I_h : Est le rayonnement direct reçu sur une surface horizontale, ces condition du ciel est donnée par les relations suivantes :

a) Conditions normales par ciel clair :

$$I_h = 1230\ exp.\left[\frac{-1}{3{,}8\ .\sin(h+1{,}6)}\right] \qquad \text{(II.4)}$$

b) Pour un ciel très clair :

$$I_h = 1210\ exp.\left[\frac{-1}{6\ .\sin(h+1)}\right] \qquad \text{(II .5)}$$

c) Pour un ciel pollué :

$$I_h = 1260\ exp.\left[\frac{-1}{2{,}3\ .\sin(h+3)}\right] \qquad \text{(II.6)}$$

RAYONNEMENT DIFFUS :

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments), et provient de toutes les directions **[16]**.

Les expressions empiriques permettant d'estimer la composante du rayonnement solaire diffus pour diverses conditions du ciel sont données ci- dessous :

a) Par ciel clair :

$$D_{c,h} = 125.(\sin h)^{0,4} \qquad \text{(II.7)}$$

- Par ciel très clair, on multiplie cette dernière expression par 3/4, si le ciel est couvert, on multiplie par 4/3.
- Par du ciel sur une surface d'inclinaison quelconque :

$$D_c(i,\gamma) = \frac{1+\cos i}{2}.D_{c,h} \qquad \text{(II.8)}$$

b) Part du sol sue une surface d'inclinaison quelconque :

$$D_s(i,\gamma) = alb.\frac{1-\cos i}{2}.G_h \qquad \text{(II.9)}$$

(Alb) : est l'albédo ou coefficient de réflexion qui dépond de la nature du sol.

Finalement, le rayonnement diffus issu du ciel et du sol est donné par la relation suivante :

$$D(i,\gamma) = D_c(i,\gamma) + D_s(i,\gamma) = \frac{1+\cos i}{2}.D_{c,h} + alb.\frac{1-\cos i}{2}.G_h \qquad \text{(II.10)}$$

II.2.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

En associant les cellules photovoltaïques en série ou en parallèle, on peut constituer un générateur photovoltaïque**.**

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour (*Ns)* cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (*Np*) en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par **[17] :**

$$P_{PV} = N_S.V_{PV}.N_P.I_{PV} \qquad \text{(II.11)}$$

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature, est montré à la figure II.3. Ce circuit est constitué d'une source de courant photoélectrique I, d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, d'une Résistance Rsh exprimant le courant de fuite en parallèle et d'une résistance Rs en série décrivant une résistance interne au passage du courant **[18]**.

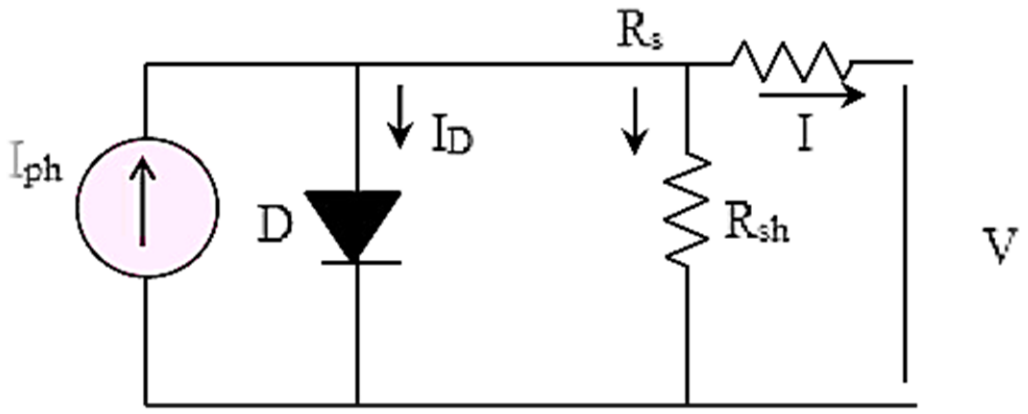

Figure II.2. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont :

Es : Ensoleillement dans le plan des modules (W/m2).

Tj : Température de jonction de la cellule (°C).

Les deux variables de sortie sont :

I : Courant fourni par le groupe de modules (A).

V : Tension aux bornes du groupe de modules (Volts).

Nous obtenons alors l'équation caractéristique pour un groupe de modules photovoltaïques déduite du schéma électrique équivalent de la figure II.3.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff **[5]** :

$$I_G = I_{ph} - I_d - I_{sh} \qquad \text{(II.12)}$$

Avec :

I : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

Id : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

Le courant, I_{ph} est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température des modules et peut mettre sous la forme :

$$I_{ph} = P_1.E_S\,[1 + P_2.(E_s - E_{Sref}) + P_3.(T_j - T_{jref})] \qquad \text{(II.13)}$$

Où :

E_{Sref} = 1000(W/m2) : Ensoleillement de référence ;

T_{Jref} = 25°C : Température de référence des modules ;

P1, P2, P3 : Paramètres constants.

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_j = T_a + E_s(\frac{Noct-20}{800}) \qquad \text{(II.14)}$$

Où :

Ta : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de polarisation de la jonction P-N, Id est donné par l'expression :

$$I_d = I_{sat}.\,[\exp\left(\frac{q(V+R_S*I)}{n.K.T_j}\right)] \qquad \text{(II.15)}$$

Avec I_{sat} : Le courant de saturation (A).

K : Constante de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}\ J/K$).

q : Charge élémentaire($1{,}6 * 10.^{-19}\ C$).

n : Facteur d'idéalité de la jonction.

Le courant de saturation de la diode est :

$$I_{sat} = P_4.Tj^3 \exp(\frac{E_g}{K.T_j}) \quad \text{(II.16)}$$

Ou ;

E_g : Energie de gap

P_4 : Paramètre constant.

Enfin, le courant traversant la résistance shunt s'écrit sous la forme :

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{Sh}} \quad \text{(II.17)}$$

Nous pouvons alors écrire l'équation finale :

$$I_{G=}P_1.E_S\left[1 + \mathrm{P2}.\left(E_s - E_{Sref}\right) + P_3.\left(T_j - T_{jref}\right)\right] - P_4.Tj^3 \exp\left(\frac{-E_g}{K.T_j}\right) * \left[\exp\left(\frac{q(V+R_S*I)}{A.n.K.T_j}\right) - 1\right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad \text{(II.18)}$$

II.2.3. Modélisation du convertisseur (BOOST)

Ce choix a été en effet fait pour la simplicité de la structure, le nombre minimum de composants nécessaires (l'utilisation de la diode du BOOST pour réaliser la fonction de diode anti-retour par exemple). L'élévation de tension est aussi un facteur positif de choix, puisque les pertes sont plus faibles pour une tension plus élevée **[19].** La condition de fonctionnement de cette structure élévatrice est que sa tension de sortie soit plus élevée que sa tension d'entrée (V_{Out}>V_{PV}), le choix de faire fonctionner le convertisseur BOOST en mode de conduction continue, et l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement et le courant dans celle-ci ne s'annule jamais**.** On distingue deux phases de fonctionnement **[20].**

1) Lorsque l'interrupteur **Tr** est fermé, la diode est polarisée en inverse la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance.
2) Lorsque l'interrupteur **Tr** est ouvert, l'étage de sortie (Cs + Chargé) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance.

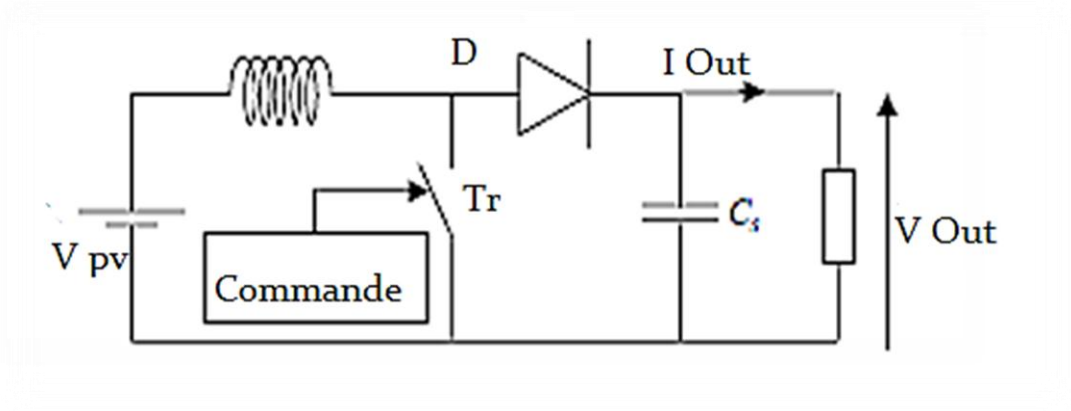

Figure II.3 : Convertisseur DC-DC élévateur de type Boost.

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, qui comporte deux phases.

Phase de 0 à αT (diode bloquée)

$$\begin{cases} V_L = V_{PV} \\ V_{Out} = R.I_{Out} \end{cases}$$

phase de αT à T (interrupteur bloquée)

$$\begin{cases} V_L = V_{PV} - V_{Out} \\ I_{Out} = I_L - I_C \end{cases}$$

Les relations utilisées pour le dimensionnement sont les relations classiques entre la tension de sortie et celle d'entrée et le rapport cyclique :

$$V_{Out} = \frac{1}{1-\alpha} V_{PV} \qquad \text{(II.19)}$$

Une relation analogue lie la valeur moyenne du courant dans l'inductance au courant de sortie :

$$I_L = I_{PV} = \frac{1}{1-\alpha} I_{Out} \qquad \text{(II.20)}$$

II.2.4. Commande MPPT appliquée au système photovoltaïque

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, parmi ces méthodes on a **[21]** :

- Méthodes à base de la mesure d'une fraction de la tensionV_{CO}.
- Méthode a base de la mesure d'une fraction de courantI_{CC}.
- méthode a base du dérivé de la puissance.
  - Méthode de la perturbation et l'observation (P&O).
  - Méthode par incrémentation de conductance(CI).

Le principe de ces méthodes (figure II.6) est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant V_{PV} , lorsque $(\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}})$ est positif ou en diminuant V_{PV}, lorsque $(\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}})$ est négatif.

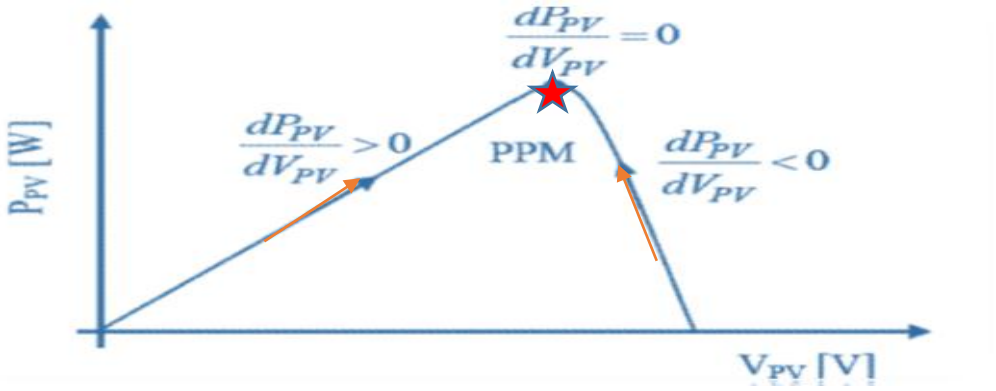

Figure II.4 : Caractéristique du point de puissance maximale *PPM.*

Les algorithmes basés sur la mesure d'une fraction de tension du circuit ouvert ou d'une fraction de courant de court-circuit sont très simples et faciles à implémenter. L'inconvénient majeur est les pertes d'énergie et l'arrêt de transfert de puissance lorsqu'on mesure les grandeurs V_{CO}, $et\ I_{CC}$ Pour surmonter ce problème, on utilise une cellule pilote de même nature que les cellules du panneau. De plus, la détermination de la valeur optimale du paramètre k est très difficile. C'est pourquoi, ces méthodes semblent juste une approximation et elles ne présentent pas assez de précision et par la suite le système ne fonctionne pas toujours au point optimal.

II.2.4.1. MPPT par perturbation et d'observation (P&O)

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus il est basé sur la perturbation du système avec une constante (Cp) à travers l'augmentation ou la diminution de $Vref$ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau **[22],[23].**

La figure II.5 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure 5, la tension V et le

courant I, sont mesurés pour calculer la puissance de sortie P (k). Cette valeur est comparée à la valeur P (k-1) de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle **[21].**

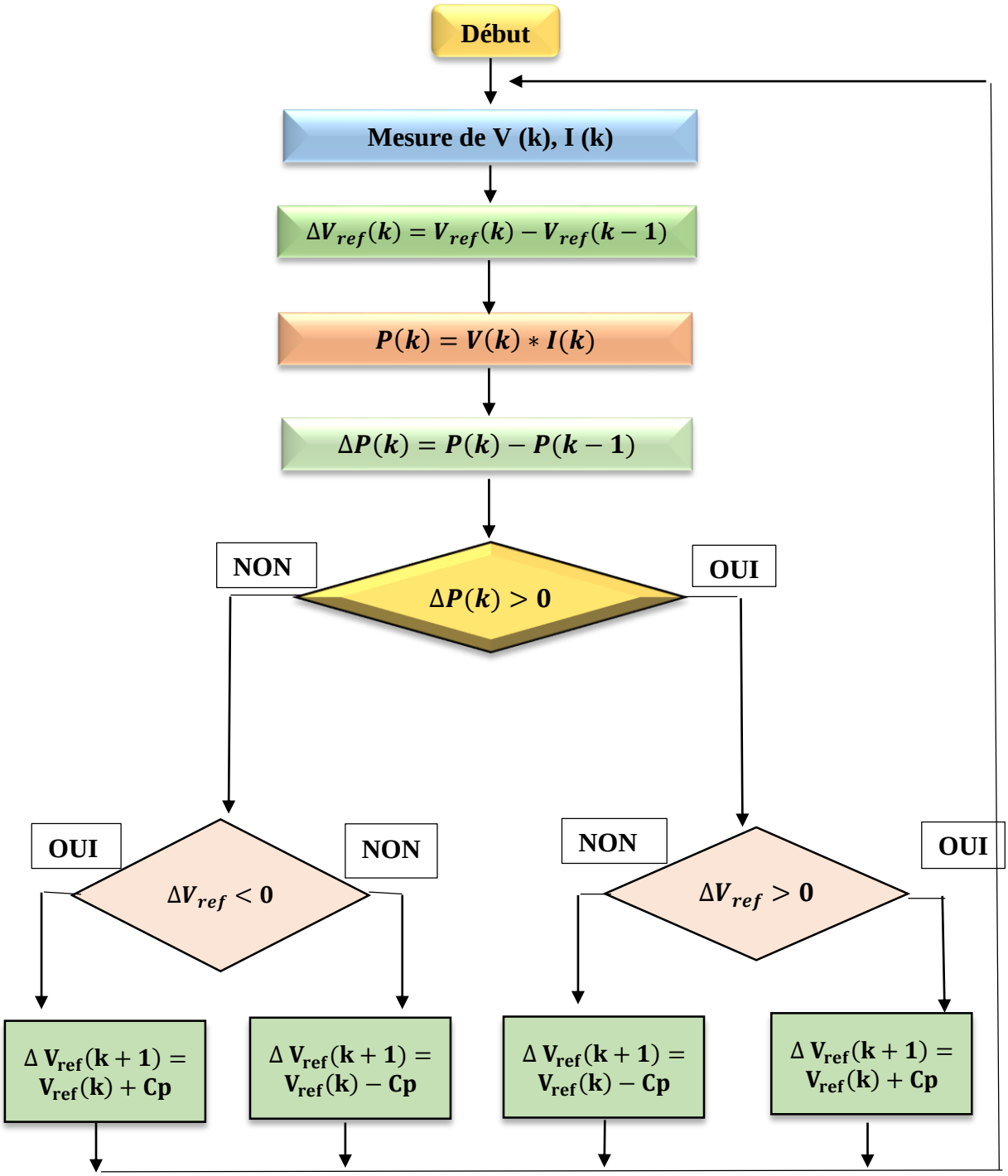

Figure II.5 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (P§O).

II.2.4.2. MPPT par incrémentation de conductance (CI)

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si $(\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}})$ est nulle. Ceci peut être décrit par les équations suivantes **[21]** :

$$P_{PV} = I_{PV}.V_{PV}$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV}.V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV}.\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$$

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = -\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \qquad \text{(III.21)}$$

$(\frac{I_{PV}}{V_{PV}})$: Représente l'opposé de la conductibilité instantanée du panneau photovoltaïque.

$(\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}})$: Représente le terme d'incrémentation de conductance.

La figure II.10 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode (CI). D'après la figure (II.6) il consiste à comparer entre la conductance $(G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}})$ et l'incrément de la conductance $dG = (\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}})$ pour en déduire la position de point de fonctionnement par rapport MPP. Si l'incrément de conductance et supérieur à l'opposé de la conductance (-G) on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de l'inductance on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM **[24]**.

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0\right) \quad \text{Pour : } V = V_{mpp} \qquad \text{(III.22)}$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0\right) \quad \text{Pour : } V < V_{mpp} \qquad \text{(III.23)}$$

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < \frac{-I_{pv}}{V_{pv}}, \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0\right) \quad \text{Pour : } V > V_{mpp} \qquad \text{(III.24)}$$

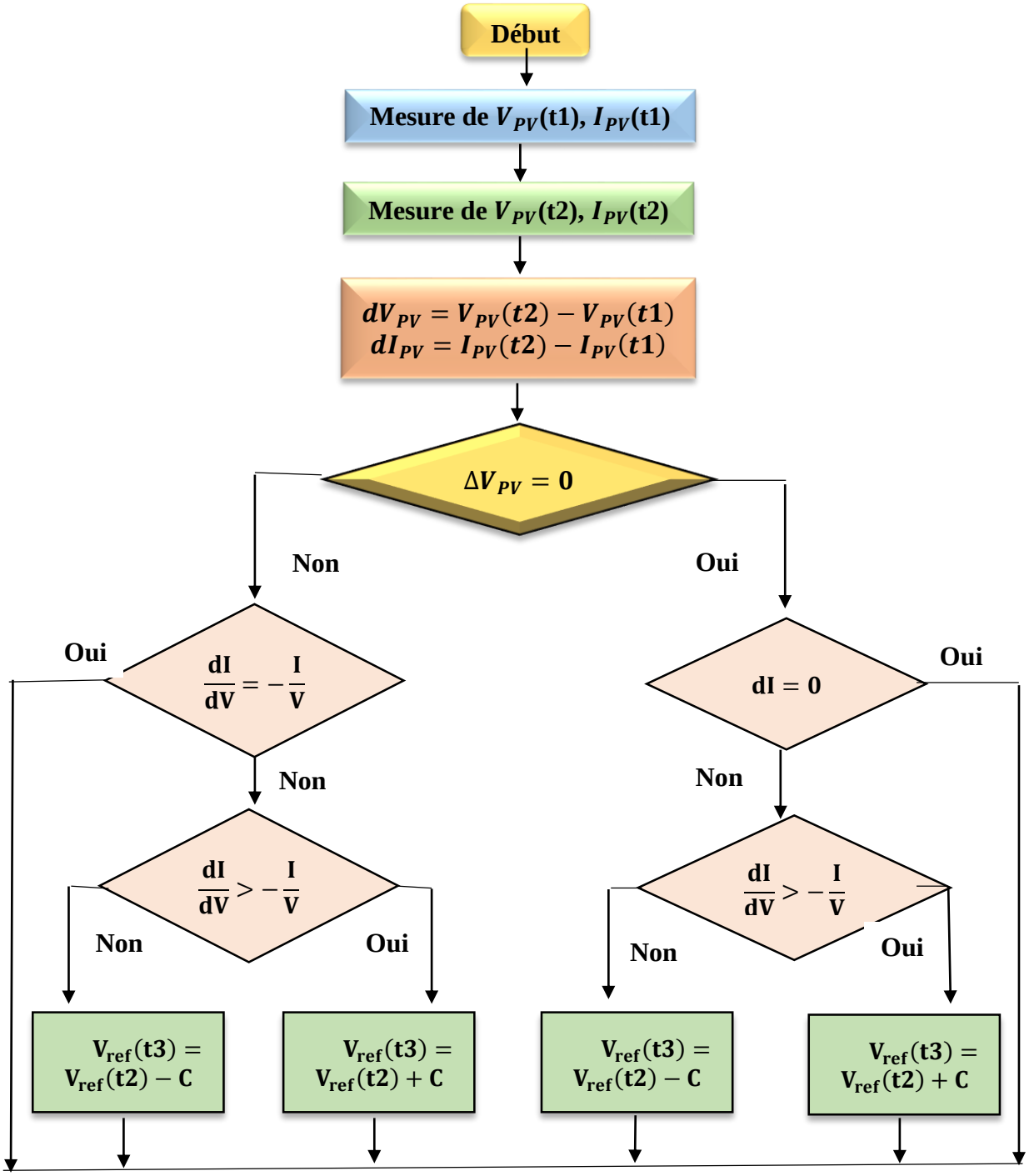

Figure II.6 : Organigramme de la méthode (CI).

La méthode conductance incrémentielle est souvent jugée efficace de point de vue efficacité de recherche du point de puissance maximale **[17].** Cependant l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une capacité de calcul grande, ce qui réduit la période de contrôle du système.

II.3. Modélisation de la chaine de conversion éolienne

Le système éolien est représenté sur la figure (II-11), la turbine transmit l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique par les pales puis en énergie électrique à travers une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Le stator et le rotor de la GADA sont connectés au réseau à travers une cascade deux redresseur MLI deux niveau et un onduleur MLI deux niveaux. L'association des deux bus continus des deux redresseurs forme le bus continu de l'onduleur deux niveaux.

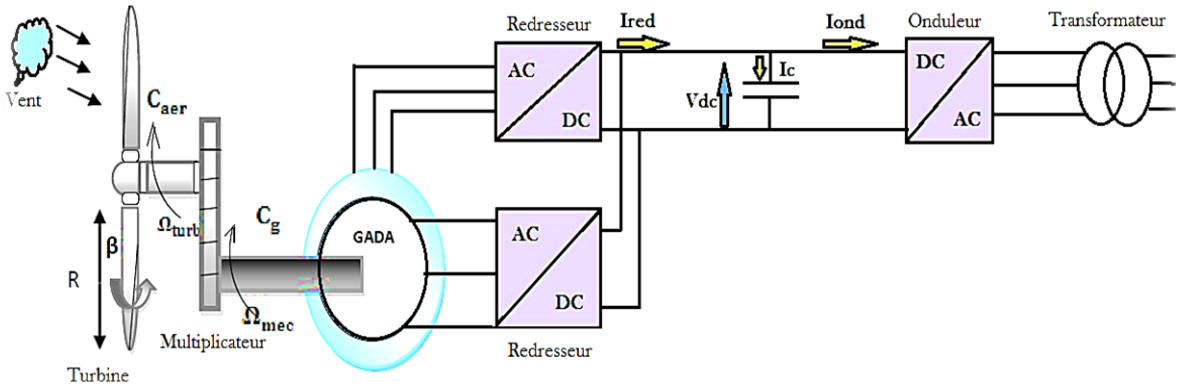

Figure II.7 : Chaine de conversion éolienne

II.3.1. Modélisation du vent

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée d'un système de conversion éolienne. Elle est souvent représentée sous forme d'une fonction scalaire temporelle : $V_v = f(t)$. Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à10m/s.

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2}.\rho.S.{V_v}^3 \qquad \text{(II.25)}$$

Avec ρ : est la densité d'air (Kg.m^3)

$S = \pi R^2$: Est la surface circulaire balayée par la turbine,

V_V : est la vitesse du vent (m/s)

II.3.2. Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ce dispositif est comprenant des pales de rayon R entrainés par le vent et qui à leur tour entrainent la génératrice.

Jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de la puissance maximale théorique $Péol\ max$ peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance Cp de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent **[4]** :

$$C_P = \frac{2.P_t}{\rho.S.{V_{vent}}^3} \qquad \text{(II.26)}$$

La puissance de la turbine éolienne est calculée ainsi :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda)\rho\pi R^2 {V_{vent}}^3 \qquad \text{(II.27)}$$

Le coefficient de couple Cm est assez proche du coefficient de puissance Cp, peut s'exprimer par :

$$T_t = \frac{\mathrm{P_t}}{\Omega_t} = \frac{R_t.P_t}{\lambda.V_{vent}} = \frac{C_p}{\lambda} * \frac{1}{2} * \rho.\pi.R_t^3.V_{vent}^2 \qquad \text{(II.28)}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t.R_t}{V_{vent}} \qquad \text{(II.29)}$$

λ : étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine$\Omega_t.R_t$.

II.3.3. Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , assez lente, à celle que nécessite la génératriceΩ_g. Il est modélisé par l'équation suivante **[25]** :

$$\Omega_t = \frac{1}{G}\Omega_g \qquad \text{(II.30)}$$

$$T_t = \frac{T_{ém}}{G} \qquad \text{(II.31)}$$

Avec :

G : est le gain du multiplicateur.

$T_{ém}$: Le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone.

T_t : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

II.3.4. Modélisation de l'arbre de la machine

La masse de la turbine éolienne est rapportée sur l'arbre de la turbine sous forme d'une inertie J_t qui comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique considère l'inertie totaleJ_{tg} comme étant la somme de l'inertie de la turbine et celle de la GADA.

$$J_{tg} = \frac{J_t}{G^2} + J_g \qquad \text{(II.32)}$$

Où J_{tg} est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la GADA. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique $T_{ém}$ produit par la GADA, le couple de frottement visqueux T_{vis} et le couple issu de multiplicateur de vitesseT_g.

$$T_{méc} = J_{tg}\frac{d\Omega_g}{dt} \qquad \text{(II.33)}$$

$$T_{mec=T_g-T_{em}-T_{vis}} \qquad \text{(II.34)}$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f

$$T_{vis=f\Omega_g} \qquad \text{(II.35)}$$

Après quelques manipulations des équations (II.31) et (II.32) et (II.33), on aura :

$$J_{tg}\frac{d\Omega_g}{dt} + f\Omega_g = T_g - T_{em} \qquad \text{(II.36)}$$

II.3.4. Contrôle et limitation de la puissance des turbines

Pour protéger l'éolienne et assurer son bon fonctionnement à des puissances maximales, nous y intégrons généralement un système de contrôle pour contrôler la puissance aux forts vents. En outre, au-delà d'une certaine valeur de vitesse du vent qui risque d'endommager le générateur, donc l'une des techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines sous les noms de « Pitch Control » **[26].** La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones figure (II.8) :

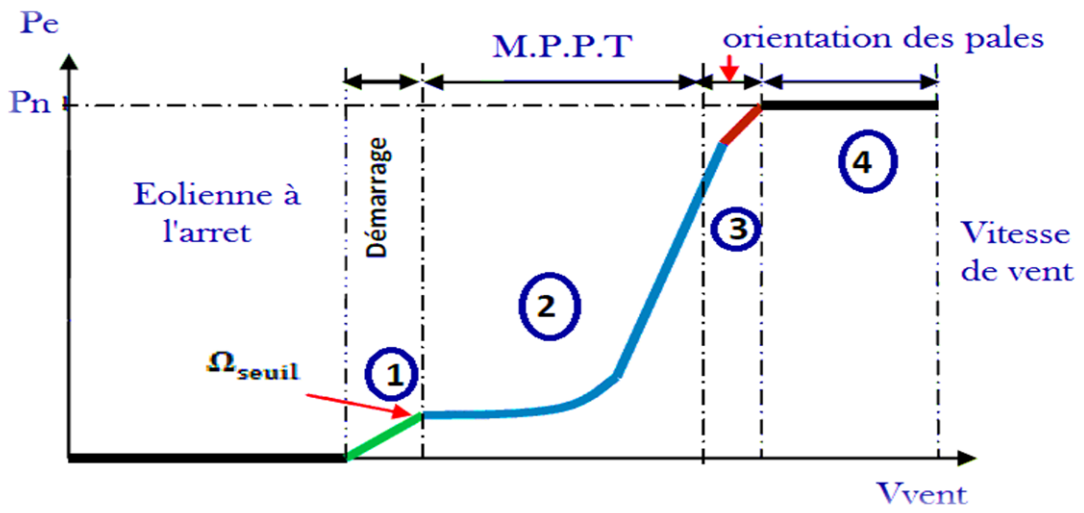

Figure II.8 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, la puissance électrique est assez faible et la vitesse mécanique atteint presque 70% du synchronisme.
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliquée. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire β=2◦.
- **Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale.
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominaleP_{nom}, une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.

II.3.5. Modélisation la génératrice asynchrone a double alimentation

. À cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices à savoir :

- L'entrefer entre le rotor et le stator constant ;
- L'effet d'encoches ainsi l'effet de peau sont négligeables ;
- Les pertes dans le fer (par hystérésis et courant de Foucault) seront négligées ;
- La saturation du circuit magnétique sera négligée ;
- Les grandeurs homopolaires seront considérées comme nulles **[4].**

II.3.5.1. Modèle naturel triphasé de la MADA

Trois types d'équation permettent de modéliser la MADA :

a) Equations électriques ;
b) Equations magnétiques ;
c) Equation mécanique.

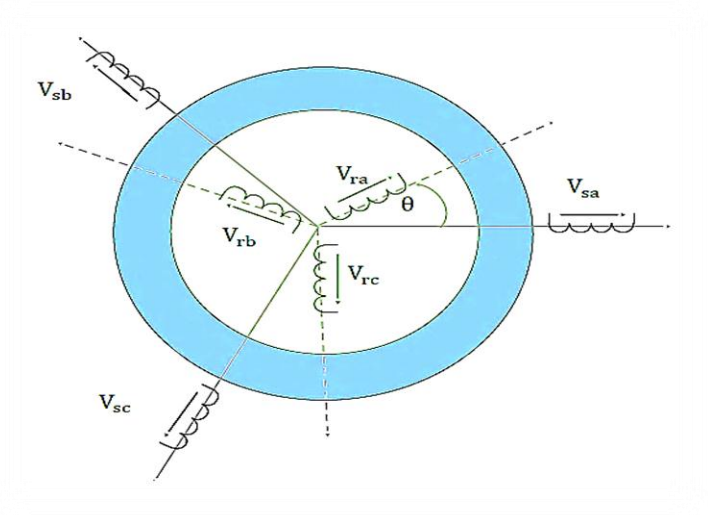

Figure II.9 : Représentation schématique de la MADA

a) Equations électriques

Les enroulements statoriques et rotoriques voire figure précédente (II.9) sont alimentés respectivement par les tensions (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}) et parcourus par les courants (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) Et (i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}) **[10], [11].**

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire :

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.37)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.38)}$$

Les équations électriques en notation matricielle sont :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.39)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.40)}$$

b) Equations magnétiques

Les équations magnétiques sont les équations des flux statoriques et rotoriques $(\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc})$ et $(\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc})$, en fonction des courants statoriques et rotoriques (

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) et (i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}). Ces équations sont obtenues à partir de la matrice inductance$[L(\theta)]$.

Les équations sous forme matricielle seront représentées comme suit :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.41)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.42)}$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \qquad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \qquad \text{(II.43)}$$

Ou :

R_s, R_r : sont respectivement les résistances statorique et rotorique ;

$L_s L_r$: Inductances propres statorique et rotorique ;

$M_{sr} M_{rs}$: Inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

M_s: Inductances mutuelles entre les phases statoriques ;

M_r : Inductances mutuelles entre les phases rotoriques ;

La matrice inductance mutuelle stator-rotor :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

M_{max}: Maximum de l'inductance mutuelle enter une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

c) Equation mécanique

La loi fondamentale de la dynamique permet d'écrire l'équation mécanique de la machine comme suit :

$$J\frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_g - T_{em} \qquad \text{(II.44)}$$

II.3.5.2. Modèle de Park biphasé de la MADA

La modélisation de la MADA passe par des transformations mathématique d'un système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d, q, o), pour décrire le comportement de la machine à l'aide d'équation différentielle a coefficient constant et la simplification des équations des machines électrique triphasée. Pour cella on applique la transformation de Park qui permet de faciliter l'étude de la machine tout en conservant la puissance instantanée **[11].**

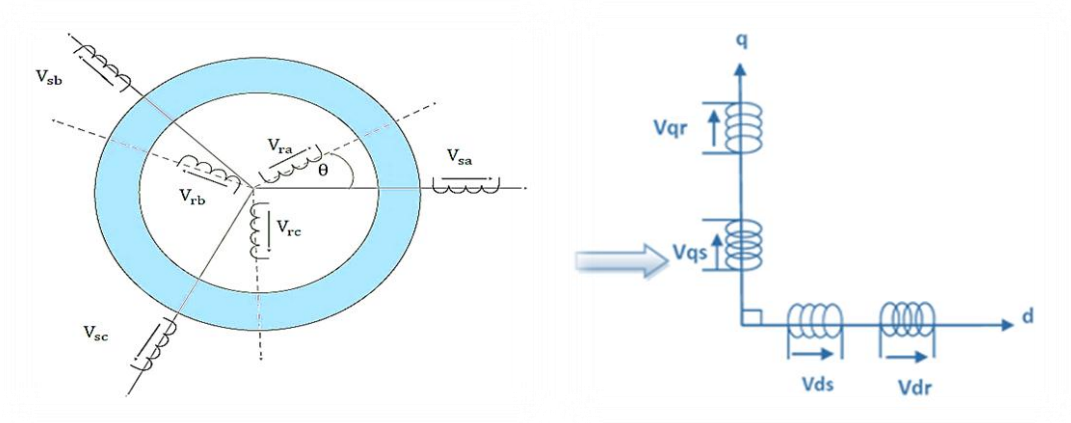

Figure II.10 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

En utilisant la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée, l'équation électrique d'une machine peut s'écrire sous la forme :

$$[v_{abc}] = [R]i_{abc} + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \qquad \text{(II.45)}$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} [v_{abc}] &= [P]^{-1}[v_{dqo}] \\ [i_{abc}] &= [P]^{-1}\,[i_{dqo}] \\ [\phi_{abc}] &= [P]^{-1}[\phi_{dqo}] \end{aligned} \qquad \text{(II.46)}$$

$[R]$: C'est la matrice des résistances

Avec :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

De (II.47) on a :

$$[P]^{-1}[v_{dqo}] = [R][P]^{-1}[i_{dqo}] + \frac{d}{dt}([P]^{-1}[\phi_{dqo}]) \qquad \text{(II.47)}$$

En multipliant (II.43) à gauche par $[P]$ on aura :

$$[P][P]^{-1}[v_{dqo}] = [R][P][P]^{-1}[i_{dqo}] + [P]\frac{d}{dt}([P]^{-1}[\phi_{dqo}])$$

$$[V_{dqo}] = [R][i_{dqo}] + [P]\frac{d}{dt}([P]^{-1}[\phi_{dqo}])$$

$$[v_{dqo}] = [R][i_{dao}] + [P]\frac{d}{dt}[P]^{-1}[\phi_{dqo}] + [P][P]^{-1}\frac{d}{dt}[\phi_{dqo}]$$

Tel que : $$[P]\left[\frac{dy}{dx}[P]^{-1}\right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left[\frac{d\theta}{dt}\right]$$

On obtient finalement Pour un système équilibré les composantes homopolaires sont nulles, de ce fait on conclut les équations électriques dans le repère d q :

:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_{sd}i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt}\phi_{sq} \\ v_{sq} = R_{sq}i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt}\phi_{sd} \\ v_{rd} = R_{rd}i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}\phi_{rq} \\ v_{rq} = R_{rq}i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt}\phi_{rd} \end{cases} \qquad \text{(II.48)}$$

On applique la transformation de Park sur les équations des flux statorique et rotorique on obtient :

$$\begin{cases} \emptyset ds = L_s . ids + M. idr \\ \emptyset qs = L_s . iqs + M. iqr \\ \emptyset dr = L_r . idr + M. ids \\ \emptyset qr = L_r . iqr + M. iqs \end{cases} \quad (II.49)$$

Nous avons exprimé les équations électriques et magnétiques de la machine, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être dérivé de l'expression de la Co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance :

$$C_{em} = p(\emptyset_d i_q - \emptyset_q i_d) \quad (II.50)$$

Nous remplaçant l'expression de l'équation (II-51) dans l'expression de l'équation mécanique (II-34) nous obtenons l'équation suivante :

$$\frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_g - p(\emptyset_d i_q - \emptyset_q i_d) \quad (II.51)$$

Equations des puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P_S = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ P_s = v_{qs} i_{ds} - v_{qr} i_{qs} \end{cases} \quad (II.52)$$

$$\begin{cases} P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad (II.53)$$

II.4. Commande vectorielle de la MADA

II.4.1. Principe de la commande vectorielle

L'objectif de la commande vectorielle est d'obtenir de la machine asynchrone à double alimentation des performances semblables à celle de la machine à courant continu à excitation séparée où il y a un découplage naturelle du couple et du flux magnétique. Pour cela il faut choisir un système d'axe (d, q) et une loi de commande qui assure ce découplage **[26]**

.

La figure II.11 montre le but de la commande vectorielle de la MADA.

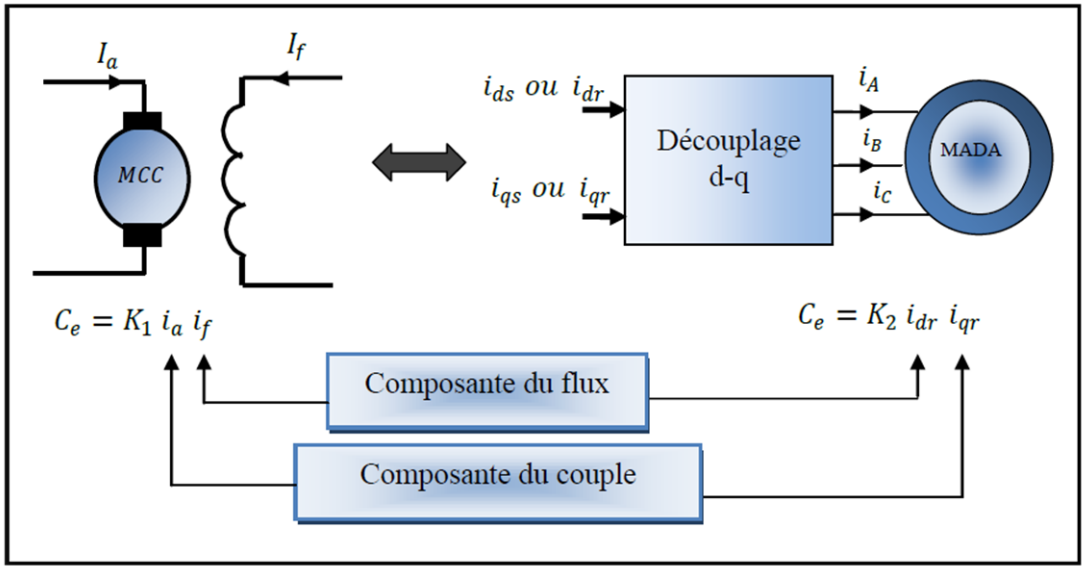

Figure II.11 : Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la Machine.

II.4.2 commande vectorielle par orientation du flux statorique :

La commande vectorielle est basée sur le choix d'un repère de référence. On peut à priori choisir les axes de référence selon l'un des flux de la machine, à savoir le flux statorique, le flux rotorique ou le flux d'entrefer **[20].** Pour orienter le flux statorique, il faut choisir un référentiel (d, q) de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l'axe (od). Cela permet d'obtenir une expression du couple dans laquelle les deux composantes de courant statorique ou rotorique interviennent ; la première produit le flux et l'autre produit le couple.

Dans notre cas on choisit l'orientation de repère (d, q) suivant le vecteur flux statorique directe$\emptyset_{ds}$, qui exige que :

$$\begin{cases} \emptyset_{\mathrm{ds}} = \emptyset_{\mathrm{s}} \\ \emptyset_{\mathrm{qs}} = 0 \end{cases}$$

Rappelons l'expression du couple électromagnétique :

$$\mathrm{C_{em}} = \mathrm{p}(\emptyset_{\mathrm{ds}} \mathrm{i_{qs}} - \emptyset_{\mathrm{qs}} \mathrm{i_{ds}}) \qquad \text{(II.54)}$$

Le principe de ce type d'orientation de flux est illustré par la figure (II.12) :

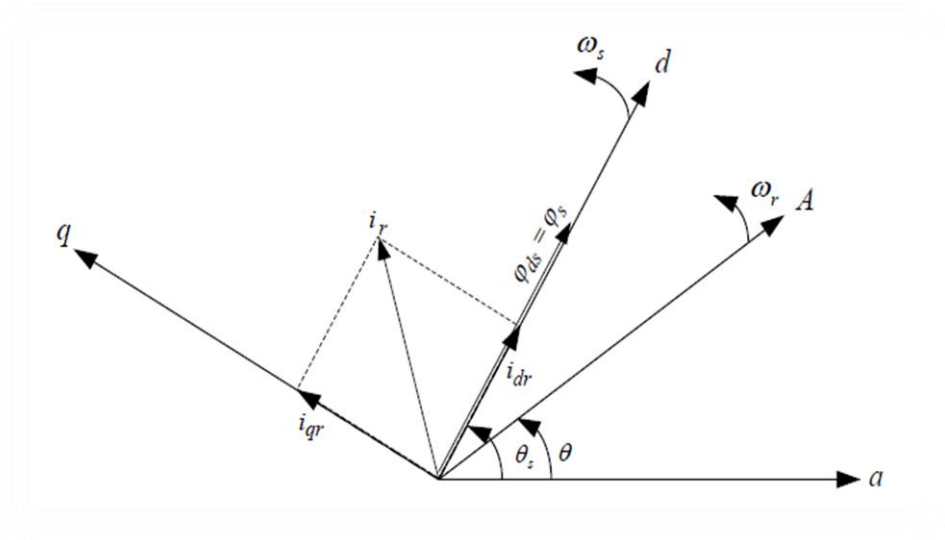

Figure II.12 : Vecteur flux dans le système d'axes choisi

A partir de l'équation du flux statorique (II.49) et suivant la condition d'orientation du flux, les courants statoriques s'expriment par :

$$i_{ds} = \frac{\emptyset_{ds} - M.i_{dr}}{L_s} \qquad \text{(II.55)}$$

$$i_{qs} = \frac{-M.i_{qr}}{L_s} \qquad \text{(II.56)}$$

En remplaçant les deux composantes du courant statorique dans l'équation (II.3) du couple électromagnétique, on obtient l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{-PM}{L_s} \emptyset_s i_{qr} \qquad \text{(II.57)}$$

D'après cette équation et pour φ_s constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le couranti_{qr}. Alors, le couple la MADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

II.5. Modélisation des convertisseurs

II.5.1. Construction du convertisseur

- L'onduleur de tension à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) est un convertisseur statique DC-AC constitué des cellules de commutation généralement à transistors IGBT ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitudes et fréquence variables à partir d'une tension continue, après redressement **[13]**.
- Un redresseur triphasé à (MLI) est un convertisseur statique AC-DC. Son circuit principal est similaire à celui d'un onduleur. La partie continue est connectée à un condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie, monté en parallèle avec l'onduleur.

II.5.2. Modèle du convertisseur

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont de type parallèle double PD3 et constitues d'IGBT et de diodes en antiparallèle commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour le but de Modifier le contenu harmonique de la tension de sortie (qui conserve sa période T) de façon à repousser ses harmoniques vers les rangs (donc les fréquences) élevés, ainsi le filtrage de la tension se trouvera facilité.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables $S_{a.}, S_b, S_c$ en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur **[25].**

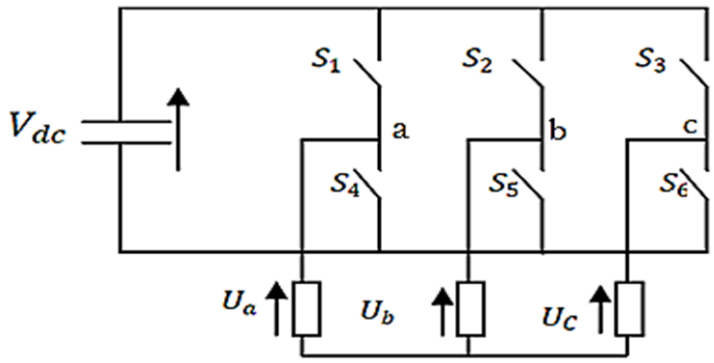

Figure II.3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé

- **Branche1**

$S_a = 0$ *si* S_1 *est* ouvert *et* S_4 *est* fermé

$S_a = 1$ *si* S_1 *est* fermé *et* S_4 *est* ouvert

- **Branche2**

$S_b = 0$ si $S_2 est$ ouvert et $S_5 est$ fermé

$S_b = 1$ si $S_2 est$ fermé et $S_5 est$ ouvert

- **Branche3**

$S_c = 0$ si $S_3 est$ ouvert et $S_6 est$ fermé

$S_c = 1$ si $S_2 est$ fermé et $S_6 est$ ouvert

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \qquad \text{(II.58)}$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$U_a + U_b + U_c = 0 \qquad \text{(II.59)}$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \qquad \text{(II.60)}$$

Dou on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_b = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - 2S_b - S_c) \\ U_c = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - S_b - 2S_c) \end{cases} \qquad \text{(II.61)}$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \qquad \text{(II.62)}$$

De plus la relation entre le courant modulé par le convertisseur I_{dc}et les courants alternatifs (i_a, i_b et i_c) est d´définie par l'équation suivante :

$$I_{dc} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \qquad \text{(II.63)}$$

II.5.3. Commande MLI du convertisseur

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur, et permet d'avoir une bonne qualité de signal (formes sinusoïdales). Elle consiste à convertir une modulante tension de référence (au niveau de commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs. Le signal modulé est généré à la sortie de l'onduleur (au niveau de puissance). Le principe de modulation MLI repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation généralement de forme triangulaire). Dans notre étude, nous avons choisi la technique sinus-triangle pour la commande de l'onduleur (MLI naturelle), qui base sur la comparaison entre deux signaux pour commander chaque bras du convertisseur **[24].**

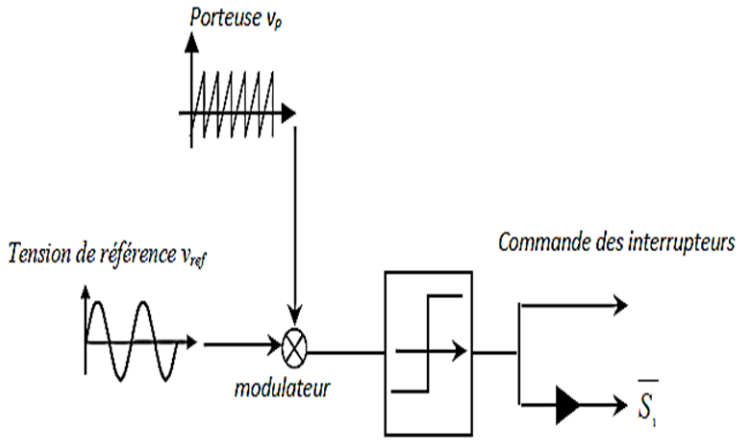

Figure II.14 : Principe de la commande MLI "sinus-triangle"

II.6. Modélisation du bus continu

Le bus continu de la figure (II.15) est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension. **[14]** :

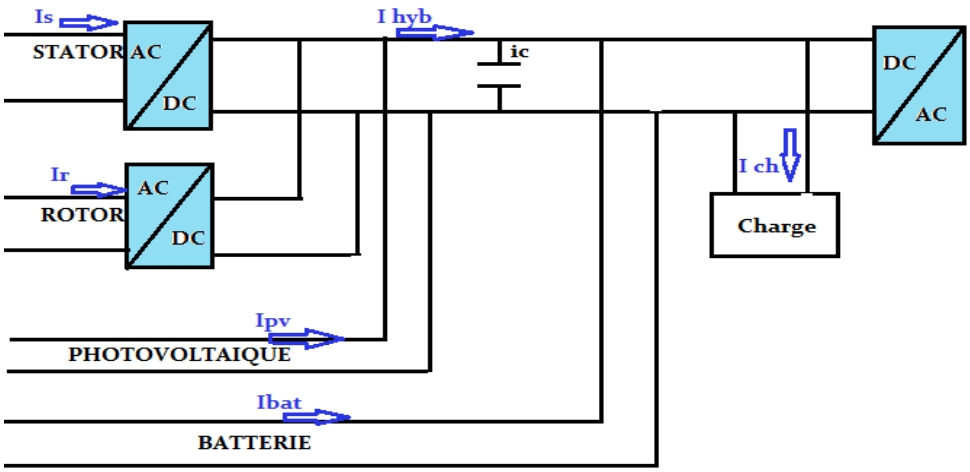

Figure II.15 : Schéma électrique du filtre

D'après la figure (II.15), on a :

$$i_{hyb} = i_{éol} + i_{pv} \qquad \text{(II.65)}$$

$$i_{ch} = i_{hyb} - i_c \mp i_{bat} \qquad \text{(II.66)}$$

Avec :

$$i_c = C\,\frac{dUdc}{dt} \qquad \text{(II.67)}$$

Donc la tension du bus continu est égale :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C}.\,i_c.\,dt \qquad \text{(II.68)}$$

Le courant dans le condensateur est donné par la relation :

II.7. Modélisation du dispositif de stockage

La modélisation de l'élément de stockage de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques ainsi que les éoliennes est importante dans la simulation des systèmes hybrides. Dans notre cas, l'accent est mise sur la technologie de stockage la plus répondue actuellement, c'est à dire la technologie électrochimique Plomb-Acide **[15], [17], [27]** Nous avons opté pour un stockage par batterie au plomb. Notre choix s'est porté sur le modèle dit « CIEMAT » qui est basé sur le schéma suivant (Figure II.16) où la batterie est décrite par une source de tensionE_b et la résistance interne R_b dépendant de la température et l'état de charge de la batterie.

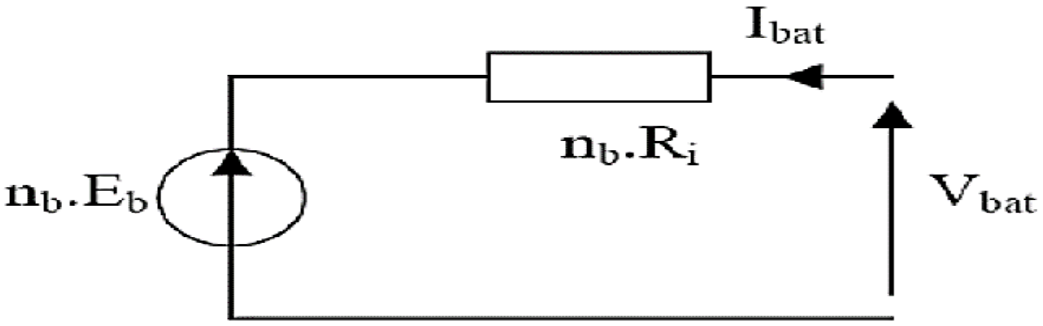

Figure II.16 : schéma équivalant de nb élément en série

Pour un nombre de cellule nb l'équation de la tension est **[17]** :

$$V_{bat} = n_b . E_b \mp n_b . R_b . I_{bat} \qquad \text{(II.69)}$$

V_{bat}: Tension de batterie

I_{bat}: Courant de la batterie

E_b: La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.

R_b: La résistance interne.

L'expression de l'état de charge :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \qquad \text{(II.70)}$$

II.8. Conclusion

Dans cette présentation on a commencée par la modélisation des rayonnements solaire sur un plan incliné, et les composants de la chaine de conversion photovoltaïque : générateur, hacheur, les deux méthodes de MPPT comme l'algorithme décrémentation de l'inductance et méthode de perturbation et observation. Ensuit on a modélisée la chaine de conversion éolienne qui constituée d'une turbine de vent liée à une machine asynchrone à double alimentation (MADA), et on a fini ces modélisations par le un système de stockage électrochimique.

CHAPITRE III

Gestion du Système Hybride Photovoltaïque-Eolien

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous proposons la gestion de l'énergie pour un système hybride constitué de deux sources d'énergie, photovoltaïque et éolienne avec stockage par batteries électrochimiques, qui sont reliées au bus CC.

Pour faire fonctionner de manière optimale nous avons conçu un algorithme sous Matlab-Simulink qui traite les différentes situations possibles.

III.2. Les différentes possibilités

- **Mode 1**

Si la puissance générée par le système hybride est égale à celle demandée par la charge. Dans ce cas la charge va être alimentée et la batterie est déconnectée de la charge

- **Mode 2**

Si la puissance générée par le système hybride est supérieure à celle demandée par la charge, et si Soc > Soc max (batterie complètement chargé). Dans ce cas le surplus de puissance est dirigé vers le réseau, et la batterie est déconnectée de la charge

- **Mode 3**

Si la puissance générée par le système hybride est supérieure à celle demandée par la charge, et si Soc < Soc max (batterie déchargé). Dans ce cas le surplus de puissance est injecté dans la batterie.

- **Mode 4**

Si la puissance générée par le système hybride est inférieur à celle demandée par la charge, et si Soc > Soc min (batterie complètement chargé). Dans ce cas le manque sera compensé par la batterie.

- **Mode 5**

Si la puissance générée par le système hybride est inférieur à celle demandée par la charge. Dans ce cas le manque sera compensé par le réseau.

III.3. Organigramme de gestion d'énergie

Les batteries placée dans un réseau hybride peut subir : Les surcharges pour un dépassement de son EDC àEDC_{max}, les décharges profondes pour une décroissance de son EDC au-dessus deEDC_{min}. De plus, nous proposons un algorithme de gestion d'un réseau hybride autonome. Cet outil doit :

- ✓ Empêcher les décharges profondes de la batterie.
- ✓ Empêcher les surcharges de la batterie.

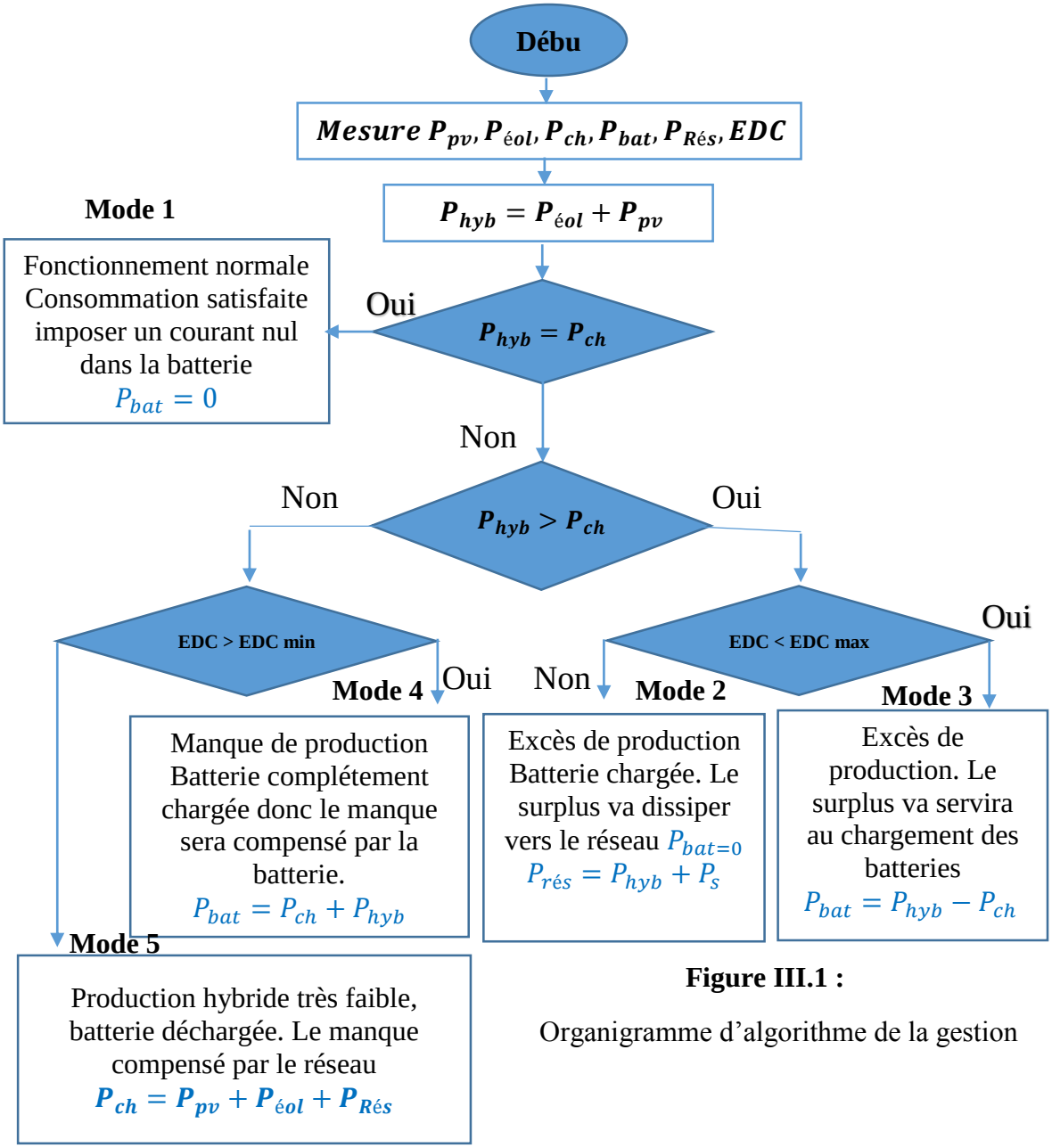

Figure III.1 :

Organigramme d'algorithme de la gestion

III.4. Simulation d'un système global

. Le schéma de la figure III.2 représente l'association de nos deux sources d'énergie et de notre système de stockage avec le circuit de gestion.

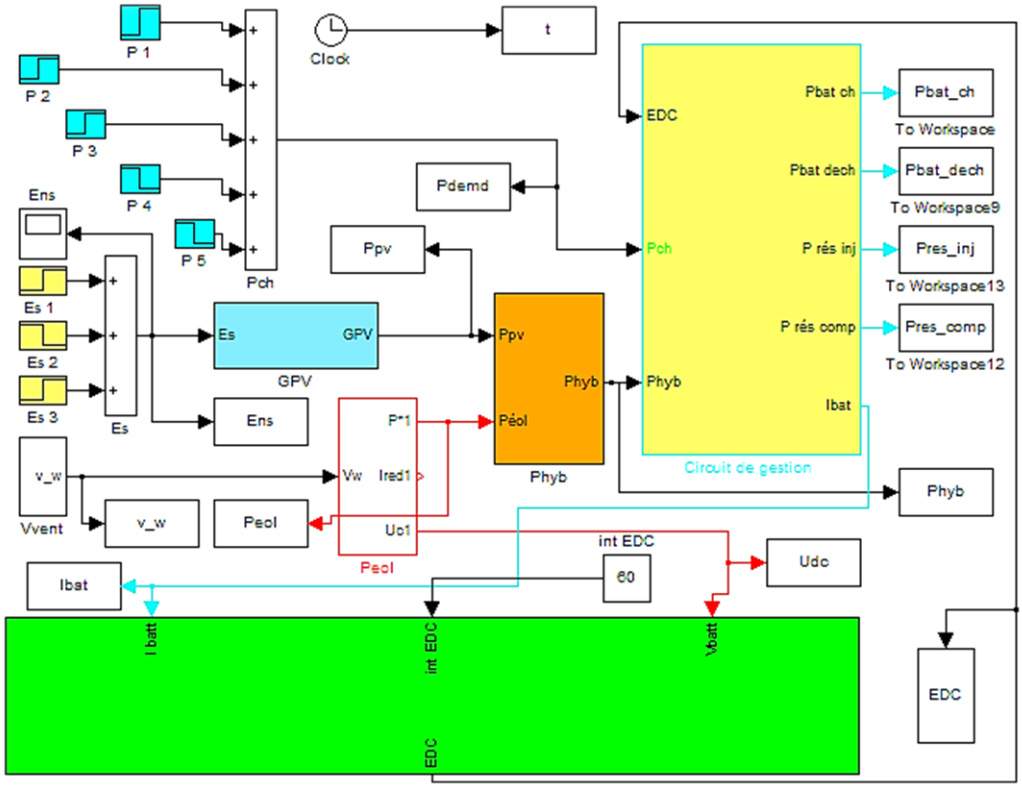

Figure III.2 : Schéma bloc du système global

Avec :

Es1, Es2 et Es3 : L'ensoleillement du système photovoltaïque (Es1+Es2+Es3 = Es).

P ch. : La puissance demandée par la charge (P1+P2+P3+P3+P4+P5 = P charge).

P el : La puissance générée par le système éolien.

P pv : la puissance de système photovoltaïque.

EDC : Etat de charge de la batterie.

Vbat : Tension de la batterie.

Ibat : Courant dans la batterie.

Pr : la puissance du réseau.

Int EDC : Etat de charge initiale de la batterie.

III.4.1. Explication du déroulement du programme de gestion

Tout d'abord on fait un test sur la puissance fournie par le système hybride car c'est elle qui alimente la charge d'une manière directe, si cette puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge, alors on doit évacuer le surplus de puissance vers le réseau. Dans le cas contraire, Si la puissance générée par le système hybride est inférieur à celle demandée par la charge, nous devons appeler un courant de compensation de la batterie, mais seulement après avoir vérifié qu'elle est apte à fournir ce courant, c'est-à-dire que son état de charge est supérieur au Soc min. Et si la puissance hybride générée est inférieur à celle demandée par la charge, et si l'état de charge de la batterie est inférieur au Soc min, Dans ce cas le manque sera compensé par le réseau.

III.4.2. Résultat de simulation et discussion

On a procédé à la simulation du système d'énergie hybride (éolien – photovoltaïque) à un temps de simulation de 8 s. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents modes possible ; on a appliqué au départ un soc initiale égal à 60%, on a fait varier le profil de la charge, ainsi que l'ensoleillement et la vitesse du vent. Les figures (III.3, III.4, III.5 et III.6) présentent respectivement les allures, de la vitesse d'entrainement de la génératrice, de la puissance fournie par le système éolien, le profil d'ensoleillement et la puissance générée par le système photovoltaïque.

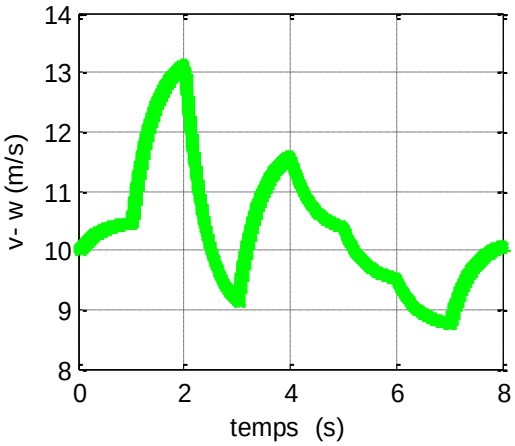

Figure III.3 : la vitesse de vent

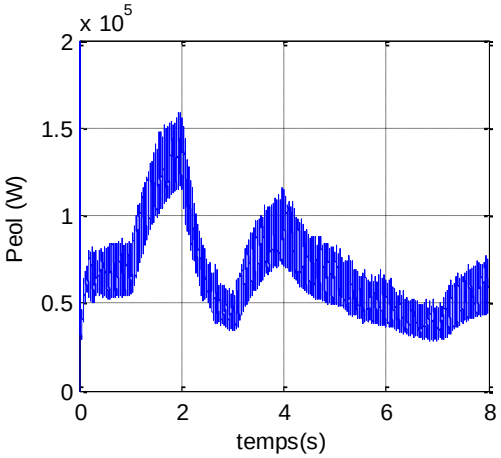

Figure III.4 : la puissance fournie par le système éolien

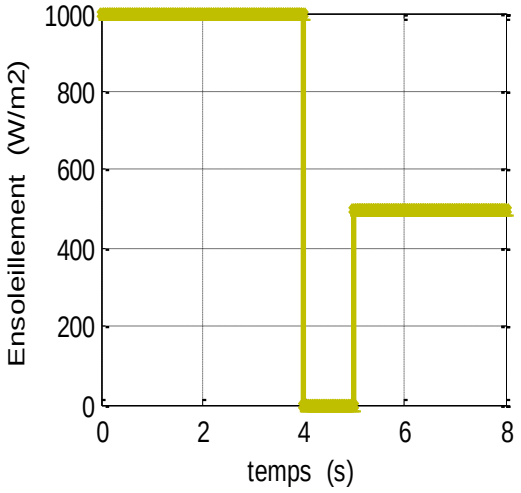

Figure III.5 : profile de l'ensoleillement

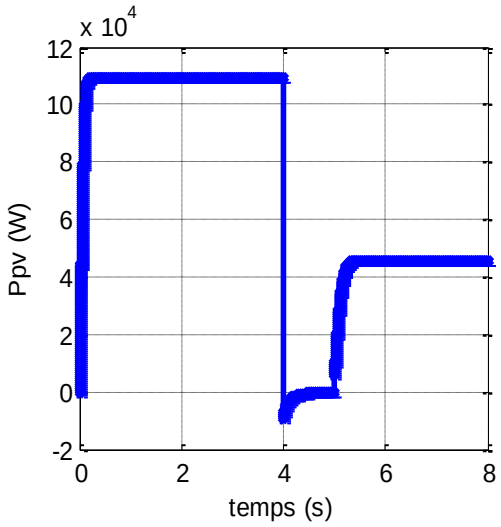

Figure III.6 : La puissance générée Par le système photovoltaïque

Pour le profil de la puissance demande par la charge on à utiliser une charge variable illustre dans la figure (III.7) suivante :

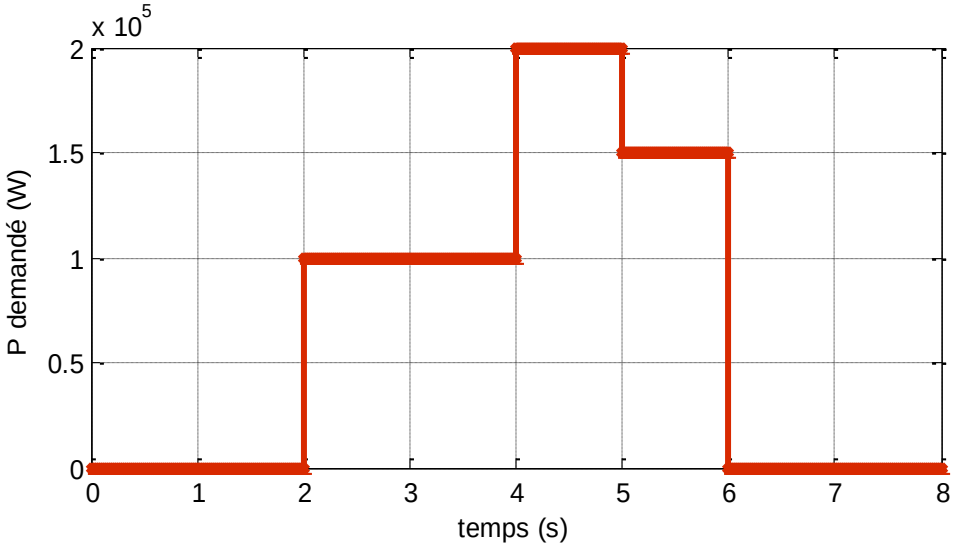

Figure III.7 : Puissance demandée par la charge

La figure (III.8), représente la tension du bus continu. Après un régime transitoire, la tension du bus est gardée constante.

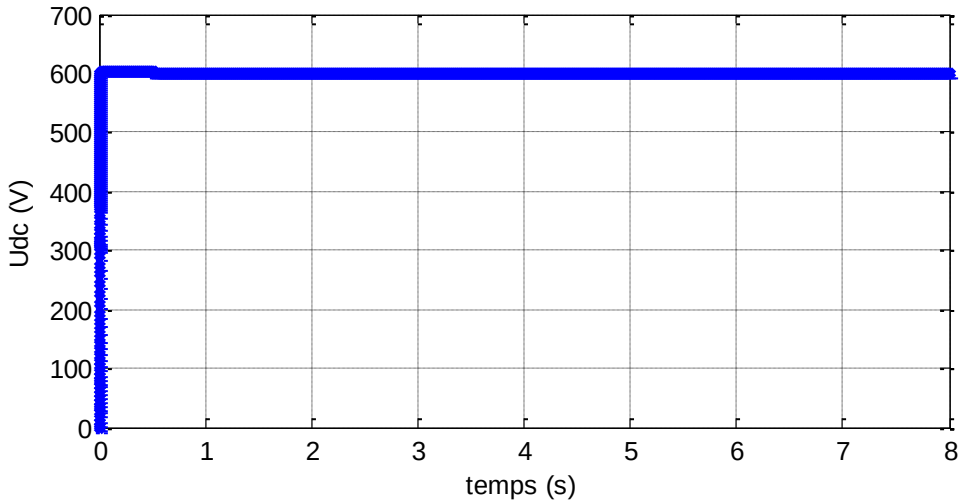

Figure III.8 : Tension du bus continu

La figure (III.9), représente la puissance totale fournie par le système hybride, la puissance demandée par la charge, puissance de réseau, et la puissance de la batterie de charge et décharge.

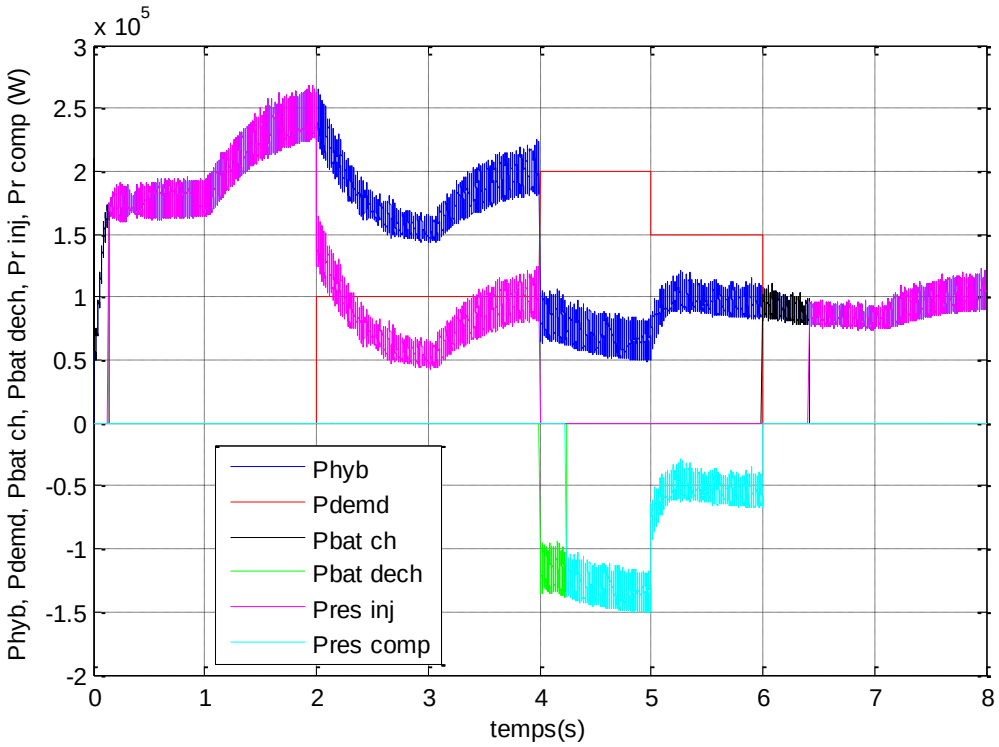

Figure III.9 : Allure des Puissances du système.

D'après ces résultats, on peut déduire les interprétations suivant sur le fonctionnement par phase du système hybride avec l'algorithme de gestion :

Phase 1 (t=0-4s) : On remarque que dans l'intervalle (t=0-0,3s) la puissance fourni par le système hybride est supérieur à la puissance demandé par la charge et initialement EDC= 60% figure (III.10) donc on alimente la charge et le surplus sera à charger les batteries, $EDC < EDC_{max}$(80%).

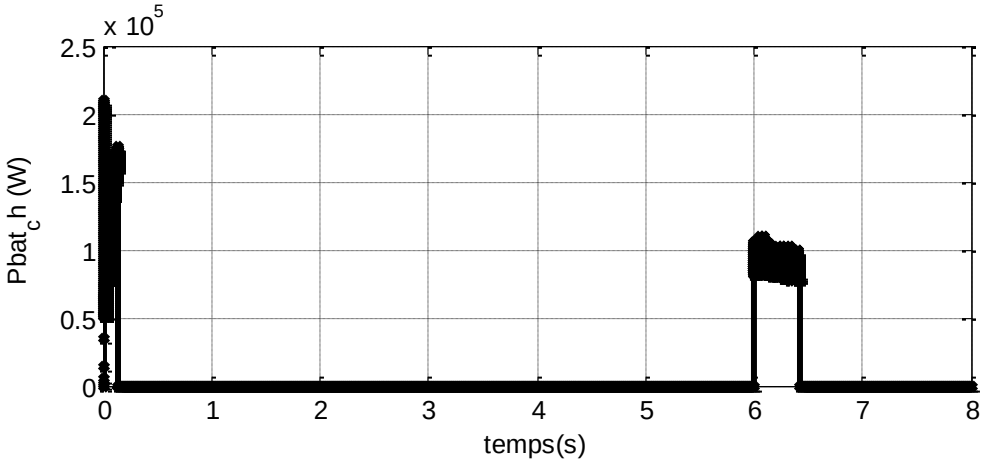

Figure III.10 : La puissance de charge de la batterie.

Une fois que la batterie est complétement chargé (0,3-4s) EDC $=EDC_{max}$, et la puissance fourni par le système hybride est supérieur à la puissance demandé par la charge donc le surplus doit être injecté au réseau électrique (figure III.11).

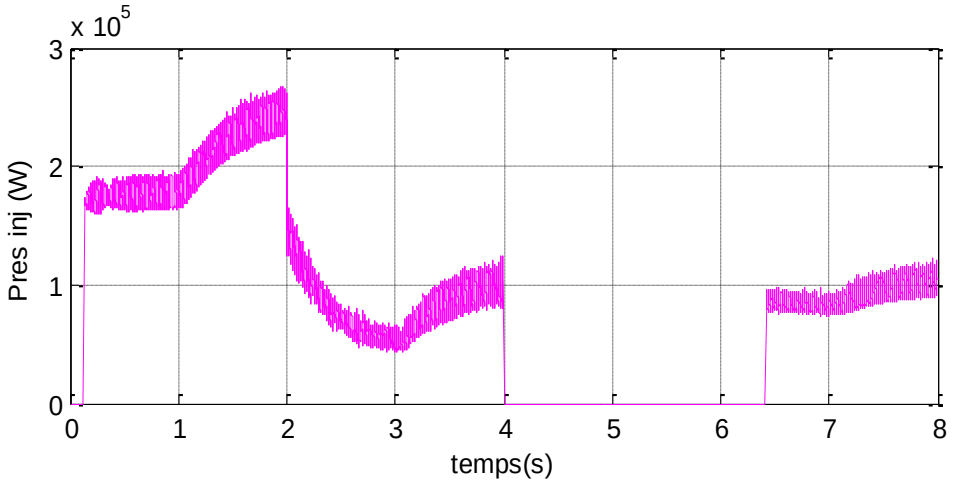

Figure III.11 : La puissance injectée au réseau.

Phase 2 (t=4-4.3s) : la puissance de la charge augmente par rapport à celle du cas précédent comme le EDC $\succ$ EDC_{min}(40%), Donc la batterie va se décharger afin de satisfaire la charge (figure III.12).

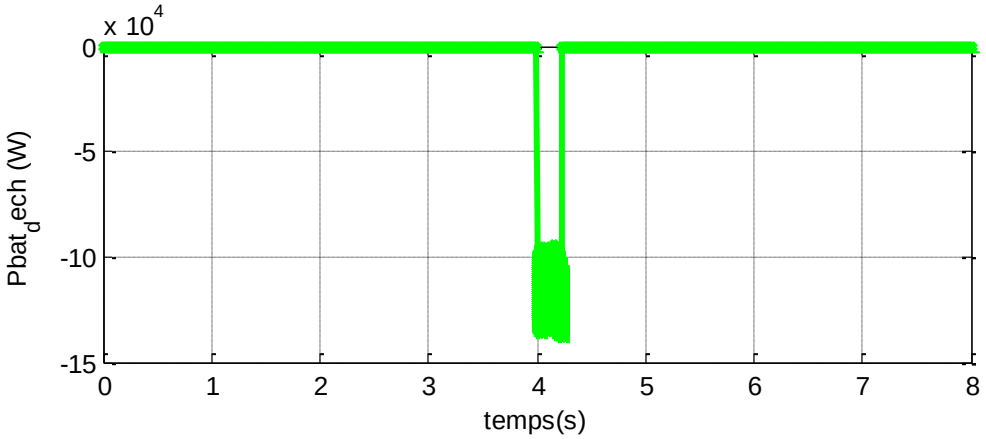

Figure III.12 : La puissance de décharge de la batterie.

Phase 3 (t=4.3-6s) : la puissance fourni par le système hybride est inférieur à la puissance demandé par la charge, et la batterie complétement déchargée EDC=EDC_{min} , donc le manque sera compensée par le réseau électrique (Figure III.13).

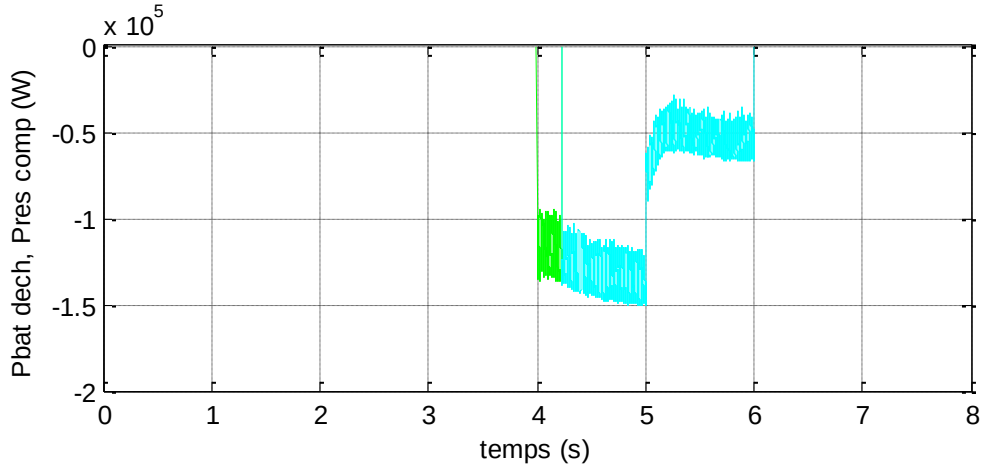

Figure III.13 : La puissance fournie par le réseau.

Phase 4 (t=6-8s) : dans l'intervalle (t=6-6.5s) la puissance fourni par le système hybride est supérieur à la puissance demandé par la charge et l état de charge de la batterie supérieur aEDC_{nax}, donc le surplus va servira au chargement des batteries. Une fois que la batterie est complétement chargé (6.5-8s) EDC $=EDC_{max}$, et la puissance fourni par le système hybride est supérieur à la puissance demandé par la charge donc le surplus doit être injecté au réseau électrique (figure III.11).

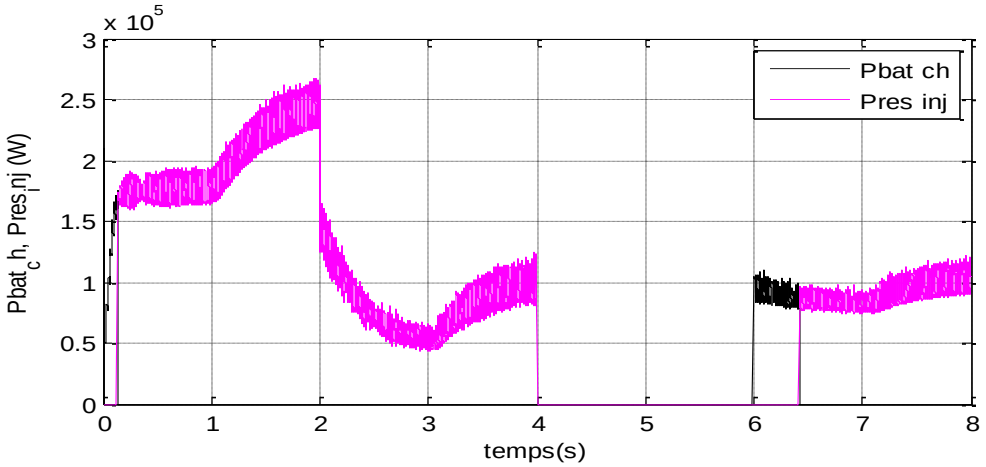

Figure III.14 : La puissance de chargement des batteries et injecté au réseau.

La figure (III.15), représente l'état de charge de la batterie, Pour prolonger la durée de vie on limite la charge et la décharge de la batterie, entre 40% et 80%.

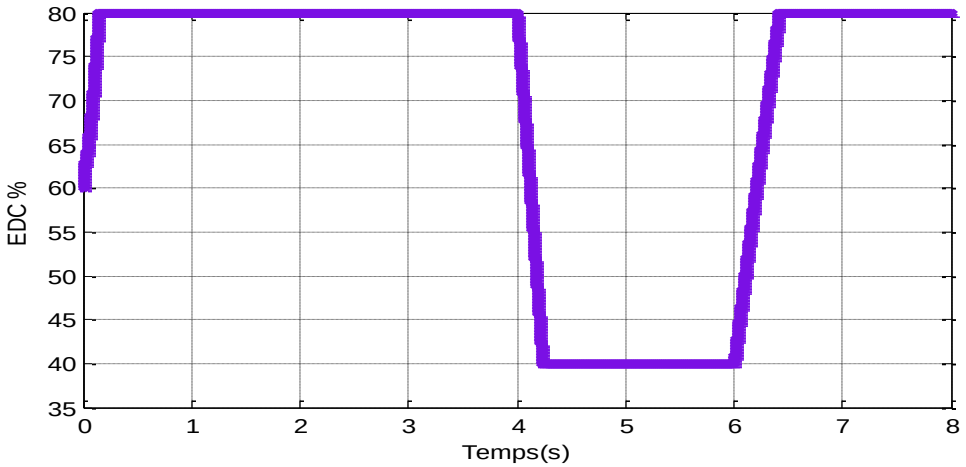

Figure III.15 : Eta de charge de la batterie (EDC).

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini un algorithme destiné à la gestion de l'énergie dans le système hybride étudié. Cet algorithme est basé sur l'analyse des cas de figures (situations) possible lors du fonctionnement de ce système et qui font que cette gestion soit primordiale.

L'algorithme présenté est programmé puis simulé sous Matlab/Simulink afin de vérifier son comportement dans le système étudié. Les résultats de simulations ont montré le bon fonctionnement du système étudié, ces résultats ont été présentés et commenté.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est l'optimisation de la problématique de la gestion d'un système d'énergie hybride (photovoltaïque éolien) avec un stockage électrochimique (batterie) connecté au réseau, auquel on a implanté un algorithme de gestion pour gérer le flux d'énergie entre les différents sources constituants le système globale.

Le problème de gestion de l'énergie dans les systèmes hybride, il faut que à chaque instant connaître les puissances fournies par les sources (éolienne et photovoltaïque dans notre cas), celle demandé par la charge et l'état de charges des éléments de stockages (batteries). Ensuite il faut que l'algorithme de gestion prenne une décision adéquate pour le bon fonctionnement du système.

Le chapitre I de ce mémoire est consacré à la description du système hybride étudié. Ensuite, une étude sera aussi consacrée au fonctionnement de la turbine, de la génératrice asynchrone double alimentation, Le dispositif de stockage, batterie au plomb et le bus à CC sera aussi présenté.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation des différents éléments des deux chaînes de conversion. Ainsi des lois de commande MPPT appliqué au système hybride, la commande MLI des convertisseurs et le contrôle vectorielle de la MADA

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté un algorithme de gestion optimale des flux d'énergie dans les systèmes hybrides d'énergies renouvelables a été effectuée afin de déterminer le bon déroulement de cette algorithme. Nous avons aussi développé un modèle simulé complet de la gestion du système hybride photovoltaïque-éolien.

Ce travail offre quelques perspectives que nous présentons ci-après :

- Amélioration du rendement du système d'énergie hybride en introduisons d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse, puis stocké et enfin réutilisé par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique verte.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] : S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. » Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.

[2] : A. TRAORÉ « gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles » MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UN1VERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES 2016.

[3] : G. KOUCOÏ « gestion d'énergie dans les systèmes hybrides PV/diesel pour zones isolées et rurales, optimisation et expérimentation » INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT thèse pour obtenir le grade de docteur en science 2017.

[4] : B. ZAKARIA « Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Éolien Photovoltaïque : Application pour un Site Isolé » UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN thèse LMD 2016.

[5] : F. BOUMEDIENE « système hybride photovoltaïque éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de bouzaréah » UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID -TLEMCEN Mémoire de Magister 2012.

[6] : I. VECHIU. « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome » thèse doctorat. Université du Havre, 2005. Français.

[7] : M. MLADJAO Mohammad Al anfaf « contribution à la modélisation et a l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges » thèse doctorat. Université de lorraine.

[8] : S. MEZZAI, k. TADJINE « Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) » mémoire Master en Electrotechnique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia 2015.

[9] : A. ABERBOUR « Contribution à l'Amélioration des Performances d'une Chaîne de Conversion Éolienne Autonome » thèse doctorat. Université A.MIRA-BEJAIA 2016.

[10] : N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » mémoire Magistère. Université MENTOURI de CONSTANTINE 2008.

[11] : R. BABOURI « Amélioration des performances des convertisseurs électromécaniques basés sur les machines asynchrones doublement alimentées » thèse doctorat. Université A.MIRA-BEJAIA 2016.

[12] : A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy1 2006.

[13] : H. BENNANI « MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION. Les lois de commande en régime permanent.

[14] : A. TAMAARAT « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse Doctorat en sciences en Electrotechnique. Université Mohamed Khider – Biskra 2015.

[15] : N. ACHAÏBOU « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque » Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger.

[16] : S. GASSAB « Modélisation d'une centrale à énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne » Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 2011.

[17] : M. REDA « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine 2018.

[18] : D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables 2008.

[19] :M. Abdellatif « *Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque »mémoire de magister* UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1-UFAS (ALGERIE) 2014

[20] : C. Alonso. Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III.

[21] : N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation », CDER B.P. 62, Route de l'Observatoire,

Bouzaréah, 16340, Algiers. Ecole Nationale Polytechnique Avenue Hassen Badi, El Harrach, Algérie 2013.

[22] : A. Sahli, “ Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau,” Mémoire de magistère, Université de Sétif, 2012.

[23] : H. Othmani, H chaouali, D .Meghna, A Mamie « Optimisation de la Technique de Perturba action et Observation par la logique floue » Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,

[24] : S. Hal ‘’ Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc. On) et Hill climbing (H.C)’’ Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.

[**25**] : T.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 » Thèse de doctorat de l’école Centrale de Lille, France, 2011.

[26] : TRIA Fatma Zahra « Contribution à la commande d’un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques » mémoire de magister Université d’El- oued 2013

[27] : I. ISSAD, Sofia Lalo uni, Djamila Repiqua « Modélisation et simulation d’un système de stockage dédie au centrales photovoltaïque » Laboratoire de Technologie Industrielle et de l’Information, Faculté de la Technologie, département d’électrotechnique Université Abderrahmane MIRA - Bejaia, Algérie 2014.

[28] : bibliothèque du simulink Matlab 7.11.0 (R2010b).

Annexe

1) Paramètres de la MADA :

$$P_n = 75\ KW$$

$$U = 380$$

$$p = 2$$

$$R_s = 0.03552\ \Omega$$

$$R_r = 0.02092\ \Omega$$

$$L_s = 0.01545\ H$$

$$L_r = 0.01545\ H$$

2) Paramètres de la turbine :

$$P_n = 150\ KW$$

$$R_t = 9.1\ m$$

$$J_t = 2600 Kg.m^2$$

$$f_t = 0.000024.N.m.s/rd$$

$$C_{Pmax} = 0.44$$

$$\rho_{air} = 1.225\ kg/m$$

3) Paramètres d'un panneau photovoltaïque :

$$P_{max} = 110\ W$$

$$I_{max} = 5\ A$$

$$V_{max} = 35\ V$$

$$I_{cc} = 5.4\ A$$

$$V_{co} = 44.4\ V$$

4) Paramètres de la batterie plomb-acide :

$$C_{bat} = 100\ Ah.$$

$$V_{bat-u} = 12V$$

Annexe

Résumé

LE travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'optimisation de la gestion d'énergie hybride, utilisant des panneaux photovoltaïques et une éolienne, intégré avec un système de stockage d'énergie (batterie). Pour adapter la production des sources renouvelables au besoin de la charge , nous intéresser en premier lieu à ces sources d'énergies, prendre connaissance de leurs caractéristiques et comprendre leur fonctionnement et ensuite on a implanté un algorithme de gestion pour gérer le flux d'énergie entre les différentes sources constituantes le système globale.

Mots clés : système d'énergie hybride, éolien, photovoltaïque, systèmes de stockage, MADA, MPPT, gestion d'énergie.

الملخص

ان العمل المقدم في هذه الاطروحة هو مساهمة في تحسين إدارة الطاقة الهجينة ، باستخدام الألواح الكهروضوئية وتور بينات الرياح ، المدمجة مع نظام تخزين الطاقة (البطارية). لتكييف إنتاج المصادر المتجددة مع احتياجات الحمل، فإننا نهتم أولاً بمصادر الطاقة هذه، ونتعرف على خصائصها ونفهم تشغيلها ، ثم قمنا بتنفيذ خوارزمية إدارة لإدارة تدفق الطاقة.